2022 年广东省一类品牌专业建设项目验收佐证材料

3.2.3.1 登记表实施要点之优质教学资源

（智能光电技术应用专业）

中山火炬职业技术学院

2022 年 4 月

目录

1. 获批院级专业教学资源库……..……..…… 3

2. 完成国家级专业教学资源库建设项目并广泛推广应用…….…..……...…… 7

3. 完成 2 本省级精品教材编写并由机械工业出版社出版…….....….. 172

4. 完成 7 门微课…….……...……...…… 322

5. 完成 2 本国家级精品教材编写并由机械工业出版社出版……..……...…..…… 326

中山火炬职业技术学院教务处

通知[2018]13号

关于公布2018年院级专业教学资源库、教学团队及精品在线开放课程建设项目的通知

各系（部）：

根据广东省教育厅《关于做好2017-2020年广东省高等职业教育教学质量与教学改革工程相关工作的通知》（粤教职函〔2017〕184号）及学院《关于组织开展2018年校级质量工程项目申报、立项工作的通知》（中炬职院发〔2018〕11号）文件精神，学院启动了专业教学资源库、教学团队以及精品在线开放课程的申报和评选工作，经个人或团队申报、系（部）推荐以及学院遴选，现对立项项目予以公布，并将相关事项通知如下：

一、立项情况

本次共评选出28项院级建设项目（附件1），其中专业教学资源库6项，教学团队7项，精品在线开放课程15门。

二、项目建设

（一）请项目负责人在项目申报书内容基础上，结合项目建设期限，确定项目实施方案，并填写《中山火炬职业技术学院质量工程建设项目任务书》（附件2）。专业教学资源库、教学团队及精品在线

开放课程建设项目均须建设网站，并上传专业及课程相关材料，项目结题验收时，将检查网站的建设情况。

（二）本次立项项目均为院级教学质量工程建设项目，项目建成后，经学校中期检查、项目验收或成果鉴定后，正式确定为院级项目。

（三）本次立项建设项目经费纳入学院一流院校建设统筹考虑。

三、材料报送

请各项目负责人于2018年6月15日前将《质量工程建设任务书》一式三份交教务处311办公室，同时将电子文档通过OA发送到教务处徐利谋邮箱。

附件：

1. 2018年专业教学资源库、教学团队及精品在线开放课程立项名单

2. 中山火炬职业技术学院质量工程建设项目任务书

教务处

2018年5月25日

附件 1：

2018 年专业教学资源库、教学团队及精品在线开放课程立项名单

序号	项目类别	项目名称	项目负责人	所在系（部）
1	专业教学资源库	精细化工技术专业教学资源库	谷雪贤	生物医药系
2	专业教学资源库	应用电子技术专业教学资源库	梁奇峰	电子工程系
3	专业教学资源库	光电制造与应用技术专业教学资源库	王丽荣	光电工程系
4	专业教学资源库	通信技术专业教学资源库	肖良辉	信息工程系
5	专业教学资源库	会展策划与管理专业教学资源库	郑标文	现代服务系
6	专业教学资源库	机电一体化专业教学资源库	丁俊健	装备制造系
7	教学团队	印刷媒体技术专业教学团队	陈海生	包装印刷系
8	教学团队	健康食品（功能食品）开发及质量监管教学团队	郭艳峰	生物医药系
9	教学团队	现代工程制图与测绘课程教学团队	杨湘洪	装备制造系
10	教学团队	通信技术专业教学团队	肖良辉	信息工程系
11	教学团队	光电技术应用专业教学团队	陈文涛	光电工程系
12	教学团队	财经类专业教学团队	廖葱葱	现代服务系
13	教学团队	市场营销专业教学团队	黄海贵	管理工程系
14	精品在线开放课程	化工检测及过程控制	李小玉	生物医药系
15	精品在线开放课程	天然药物提取分离	刘妍	生物医药系
16	精品在线开放课程	印前处理与排版	官燕燕	包装印刷系
17	精品在线开放课程	网页美工设计	陈静	包装印刷系

18	精品在线开放课程	单片机系统设计与制作	龙涛元	电子工程系
19	精品在线开放课程	电机与拖动基础	郭艳平	电子工程系
20	精品在线开放课程	经济学基础	朱龙凤	管理工程系
21	精品在线开放课程	网络营销推广	丁昭巧	管理工程系
22	精品在线开放课程	电工与电子技术	张堃	光电工程系
23	精品在线开放课程	光学零件镀膜	石澎	光电工程系
24	精品在线开放课程	摄影	李桐鹏	信息工程系
25	精品在线开放课程	4G 移动通信设备开通及优化	刘雪燕	信息工程系
26	精品在线开放课程	国际商务英语	胡廉	现代服务系
27	精品在线开放课程	三维注塑模具设计	程国飞	装备制造系
28	精品在线开放课程	电工技术	黎俊青	装备制造系

中华人民共和国教育部

教职成函〔2015〕10号

教育部关于确定职业教育专业教学资源库2015年度立项建设项目及奖励项目的通知

北京市、天津市、河北省、山西省、辽宁省、黑龙江省、江苏省、浙江省、山东省、河南省、湖北省、湖南省、广东省、四川省、陕西省、甘肃省教育厅(教委)：

按照职业教育专业教学资源库项目建设规划，经自愿申请、资格审查、材料公示、网络预审、专家评议的既定程序，决定2015年立项建设新能源类等22个职业教育专业教学资源库(详见附件1)；按照《职业教育专业教学资源库建设工作指南》(以下简称《指南》)要求，遵循“注重实效、择优奖励、宁缺毋滥”原则，以“国家级职业教育专业教学资源库项目管理与监测平台”监测数据为主要依据，经专家评议推荐，决定对物流管理等4个已验收资源库给予奖励(详见附件2)。现将有关要求通知如下：

一、立项项目要求

（一）各项目主持单位要按照《职业教育专业教学资源库2015年度申请项目专家评议意见表》内容（详见附件3），根据项目资金总额（包括我部确定支持的中央专项资金，详见附件4，和申请时承诺的项目筹措资金），会同联合建设单位修改完善项目建设方案，修订资金管理办法，做好预算编制，填写《职业教育专业教学资源库项目任务书》（样表见附件5，以下简称《任务书》）。各单位要进一步明确建设目标，理清建设思路，聚合团队优势，优化整体设计，强化保障措施，规范预算管理，提升项目建设的科学性、系统性和可行性。

（二）在坚持资源库公益属性的前提下，建立资源建设、更新、使用、运行、推广的有效机制，确保建成后资源库的可持续发展；以杭州职业技术学院“数字校园学习平台”或高等教育出版社“职业教育数字化学习中心”作为共享平台之一，实现多种终端共享、鼓励多平台共享。至我部验收时项目建成和积累资源一律不得用于商业目的。

（三）项目建设资金包括中央专项资金和项目筹措资金两部分。中央财政专项资金一次确定、分两个年度拨付。项目主持单位应加强预算管理，加快预算执行进度，严格执行有关规定。对于

预算执行较差的项目，将停拨或核减中央财政专项资金，由此造成的项目建设资金不足部分按立项承诺自行筹措补足。各项目应于2017年12月底前完成《任务书》规定的建设任务（包含不少于3个月的运用推广），并接受验收。

（四）请项目主持单位于7月3日-7月10日登录中国高职高专教育网（www.tech.net.cn）“职业教育专业教学资源库专栏”，更新《任务书》，上传新的建设方案。

《任务书》和建设方案纸质版（一式3份，内容与平台填报一致），请签章后于7月13日前寄送至我部。

经我部同意的建设方案和《任务书》，将在中国高职高专教育网“职业教育专业教学资源库”专栏公布。有关项目单位须据此开展项目建设。

二、奖励项目要求

（一）各项目主持单位要按照《指南》要求，根据项目资金奖励额度（详见附件6），制定《项目升级改进任务书》（样表详见附件7），明确已验收项目升级改进的目标和任务、建设思路与规划、主要建设内容、时间进度安排、保障措施、资金预算与管理等。升级改进资源库，要按照“碎片化资源、结构化课程和系统化设计”的总体思路，继续扩大资源数量、重新确认和丰富资源类型，以用户

为中心完善运行平台功能，扩大应用推广的力度和成效。

（二）要严格按照《指南》及国家有关规定，加强预算管理，规范财务行为。奖励资金应主要用于按照新的建设标准，优化组库结构、完善已有资源、补充新鲜资源、扩大共享范围、提升用户体验。

（三）升级改进任务须于2015年12月底前完成，项目主持单位应加快预算执行进度。

《项目升级改进任务书》纸质版由主持单位盖章后于7月30日前寄送至我部（一式3份），电子稿发送至指定邮箱。

《项目升级改进任务书》经我部审核同意后，将在中国高职高专教育网“职业教育专业教学资源库”专栏公布。有关项目单位须据此开展升级改进工作。

通信地址：北京西单大木仓胡同37号（100816）教育部职业教育与成人教育司高职与高专教育处

联系人：王　博　任占营（职业教育与成人教育司）

茹家团　王　征（财务司）

联系电话：010-66096232（职业教育与成人教育司）

010-66097508（财务司）

电子信箱：sfgz@moe.edu.cn

附件：1.职业教育专业教学资源库2015年度立项建设项目名单

2.职业教育专业教学资源库2015年度奖励项目名单

3.职业教育专业教学资源库2015年度申请项目专家评议意见表（项目分送）

4.职业教育专业教学资源库2015年度立项建设项目中央专项资金预算控制数（项目分送）

5.职业教育专业教学资源库项目任务书（样表）

6.职业教育专业教学资源库2015年度已验收项目中央专项奖励资金预算控制数（项目分送）

7.职业教育专业教学资源库项目升级改进任务书（样表）

中华人民共和国教育部

教　育　部

2015年6月30日

附件 1

职业教育专业教学资源库 2015 年度立项建设项目名单

项目编号	项目名称	主持单位
2015-1	职业教育新能源类专业教学资源库	天津轻工职业技术学院 佛山职业技术学院 酒泉职业技术学院
2015-2	职业教育通信技术专业教学资源库	深圳职业技术学院 南京信息职业技术学院 石家庄邮电职业技术学院
2015-3	职业教育半导体照明技术与应用专业教学资源库	宁波职业技术学院 中山火炬职业技术学院
2015-4	职业教育刑事执行专业教学资源库	浙江警官职业学院
2015-5	职业教育林业技术专业教学资源库	辽宁林业职业技术学院
2015-6	职业教育老年服务与管理专业教学资源库	北京社会管理职业学院 北京劳动保障职业学院 中国成人教育协会老年教育与服务专业委员会
2015-7	职业教育航海技术专业教学资源库	浙江交通职业技术学院 江苏海事职业技术学院
2015-8	民族文化传承与创新子库——珠算传承与创新	山西省财政税务专科学校
2015-9	职业教育包装技术与设计专业教学资源库	天津市职业大学
2015-10	民族文化传承与创新子库——烹饪工艺与营养传承与创新	浙江商业职业技术学院
2015-11	职业教育汽车技术服务与营销专业教学资源库	湖南汽车工程职业学院 四川交通职业技术学院
2015-12	职业教育特殊教育专业教学资源库	襄阳职业技术学院

项目编号	项目名称	主持单位
2015-13	职业教育服装设计专业教学资源库	山东科技职业学院 杭州职业技术学院 全国纺织服装职业教育教学指导委员会
2015-14	职业教育计算机应用技术专业教学资源库	北京信息职业技术学院
2015-15	职业教育材料成型与控制技术专业教学资源库	陕西工业职业技术学院
2015-16	职业教育焊接技术及自动化专业教学资源库	哈尔滨职业技术学院 常州工程职业技术学院 四川工程职业技术学院
2015-17	职业教育高分子材料加工技术专业教学资源库	广东轻工职业技术学院
2015-18	民族文化传承与创新子库——针灸推拿传承与创新	湖南中医药高等专科学校
2015-19	职业教育种子生产与经营专业教学资源库	河南农业职业学院
2015-20	职业教育法律文秘专业教学资源库	北京政法职业学院 全国司法职业教育教学指导委员会
2015-21	职业教育光机电应用技术专业教学资源库	浙江工贸职业技术学院
2015-22	职业教育现代纺织技术专业教学资源库	江苏工程职业技术学院

附件 2

职业教育专业教学资源库
2015 年度奖励项目名单

项目编号	项目名称	主持单位
2010-07	高等职业教育物流管理专业教学资源库	宁波职业技术学院
2010-01	高等职业教育数控技术专业教学资源库	无锡职业技术学院
2010-03	高等职业教育道路桥梁工程技术专业教学资源库	辽宁省交通高等专科学校
2010-05	高等职业教育建筑工程技术专业教学资源库	四川建筑职业技术学院

抄　　送：有关职业院校
部内发送：有关部领导，办公厅、财务司

教育部办公厅　　主动公开　　2015 年 7 月 7 日印发

附件 3

职业教育专业教学资源库 2015 年度申请项目专家评议意见表

（项目分送）

项目名称	半导体照明技术与应用	主持单位	宁波职业技术学院 中山火炬职业技术学院

专家组评议意见：

专家组认真审阅了项目申报材料，听取了陈述和答辩并现场观看了技术演示，查阅了网络平台运行监测数据，登录试用了资源库。专家组认为，申报工作符合教育部有关要求，专业教学资源库建设思路清晰、目标明确、论证充分、资料详实，数据库系统设计合理，运行及应用情况较好，初步实现了能学、辅教等基本功能。项目组织保障条件具备、所在地区产业基础和发展潜力好，项目财务预算合理，建设方案可行。

专家组提出以下意见：

1. 资源库整体构架和结构设计要进一步体现碎片化资源、结构化课程和系统化设计的总体思路，扩容资源总量，丰富资源类型，体现行业需求和职业特点，在保证资源充分冗余的基础上，突出资源分类集成和应用平台开发。

2. 以用户为中心，完善系统功能，加大应用推广。应针对在校学生、企业职工、社会学习者和教师，进一步梳理应用流程，增强导学、交互、评价功能，加强职业素质培养、知识点学习和技能训练的联系，创新综合职业技能教育模式和实现途径，切实提高资源库对于职业教育教学改革的支撑作用。

3. 目前资源库资源总量还不足，特别是课程的视频资源数量比较单薄，有待丰富。用户涉及面及数量相对较少，资源库影响力还需进一步扩大。

4. 重视加强团队建设，聘请行业企业专家、教育教学专家、网络技术开发专家参加项目建设团队，汇聚国内相同或相近专业领域的学校参与，明确任务分工。进一步细化资金筹措方案、健全资金管理制度和知识产权管理制度，强化网络安全防范工作。

专家组建议立项。

附件 4

职业教育专业教学资源库 2015 年度立项建设项目
中央专项资金预算控制数
（项目分送）

<table>
<tr><td colspan="2">项目编号</td><td>2015-3</td></tr>
<tr><td colspan="2">项目名称</td><td>职业教育半导体照明技术与
应用专业教学资源库</td></tr>
<tr><td colspan="2">项目主持单位</td><td>宁波职业技术学院
中山火炬职业技术学院</td></tr>
<tr><td rowspan="3">中央专项资金预算数控制数（万元）</td><td>总数</td><td>500</td></tr>
<tr><td rowspan="2">其中</td><td>2015 年</td><td>300</td></tr>
<tr><td>2016 年</td><td>200</td></tr>
</table>

职业教育专业教学资源库

项目任务书

专业编号 590241

专业名称 半导体照明技术与应用

所属专业大类名称 电子信息大类

所属专业类名称 电子信息类

项目主持单位（盖章） 宁波职业技术学院

项目主持单位（盖章） 中山火炬职业技术学院

项目主持人 张慧波

联合申报单位 16 所院校和 19 家行业企业（名单见下页）

填写日期 2015 年 7 月 17 日

教育部职业教育与成人教育司制

二〇一五年六月

联合申报单位名单

（按院校与行业企业分类，排名不分先后）

联合申报院校（18 所）：

院校名称	
宁波职业技术学院	重庆电子工程职业学院
中山火炬职业技术学院	威海职业学院
常州信息职业技术学院	广东轻工职业技术学院
南京信息职业技术学院	杭州职业技术学院
深圳信息职业技术学院	北京信息职业技术学院
福建信息职业技术学院	淮安信息职业技术学院
咸宁职业技术学院	湖北国土资源职业学院
惠州市技师学院	厦门集美职业技术学校
天津工业大学	深圳大学

联合申报行业企业（19 家）：

单位名称	
国家半导体照明工程研发及产业联盟	英特尔（中国）有限公司
宁波半导体照明产学研技术创新战略联盟	领航未来（北京）科技有限公司
厦门光莆电子股份有限公司	深圳瑞丰光电子股份有限公司
杭州中为光电技术股份有限公司	广州市鸿利光电股份有限公司
湖南省华磊光电有限责任公司	宁波凯耀电器制造有限公司
重庆卓鹏科技有限公司	深圳市九洲电器有限公司
易美芯光(北京)科技有限公司	广州风标电子技术有限公司
北京申安投资集团有限公司	山西光宇半导体照明股份有限公司
深圳雷曼光电科技股份有限公司	华灿光电股份有限公司
电子工业出版社	

填 写 要 求

一、 请依据专业教学资源库项目建设方案，如实填写各项。

二、 请按下发格式填写，原则上不加页。

三、 请用 A4 纸打印；电子版以 word 文档格式存储。

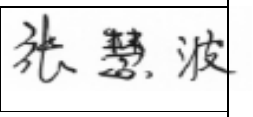
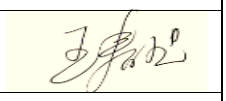
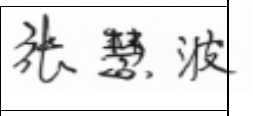
四、 表格文本中外文名词第一次出现时，要写清全称和缩写，再次出现时可以使用缩写。

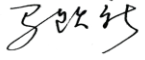
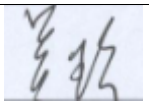
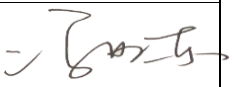
五、 涉密内容不填写，有可能涉密和不宜大范围公开的内容，请在说明栏中注明。

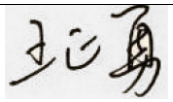
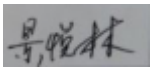
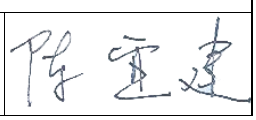
六、 本表栏目未涵盖的内容，需要说明的，请在说明栏中注明。

七、 表 1-2“参与单位及负责人”，按实际参与单位数量填写，每单位填写一张。

1．立项建设单位

<table>
<tr><td rowspan="15">1-1
主持单位及负责人</td><td>单位名称</td><td colspan="5">宁波职业技术学院</td></tr>
<tr><td>单位地址</td><td colspan="5">宁波市北仑区新大路 1069 号</td></tr>
<tr><td>法人代表</td><td>张慧波</td><td>电 话</td><td>057486874502</td><td>签 名</td><td>  </td></tr>
<tr><td>单位名称</td><td colspan="5">中山火炬职业技术学院</td></tr>
<tr><td>单位地址</td><td colspan="5">广东省中山市中山港大道 60 号</td></tr>
<tr><td>法人代表</td><td>王春旭</td><td>电 话</td><td>13702789019</td><td>签 名</td><td>  </td></tr>
<tr><td colspan="6">项目主持人</td></tr>
<tr><td>姓 名</td><td>张慧波</td><td>性 别</td><td>男</td><td>签 名</td><td>  </td></tr>
<tr><td>所在部门</td><td>宁波职业技术学院</td><td>职务</td><td>院长</td><td>专业技术职务</td><td>教授</td></tr>
<tr><td>手 机</td><td>13505889979</td><td>传真</td><td>057486874502</td><td>电子邮箱</td><td>2335245@163.com</td></tr>
<tr><td>通信地址</td><td colspan="3">宁波经济技术开发区新大路 1069 号</td><td>邮 编</td><td>315800</td></tr>
<tr><td colspan="6">项目负责人</td></tr>
<tr><td>姓 名</td><td>吴志荣</td><td>性 别</td><td>男</td><td>签 名</td><td>  </td></tr>
<tr><td>所在部门</td><td>宁波职业技术学院电信学院</td><td>职务</td><td>分院院长</td><td>专业技术职务</td><td>教授</td></tr>
<tr><td>手 机</td><td>13819876062</td><td>传真</td><td>057486874502</td><td>电子邮箱</td><td>50820790@qq.com</td></tr>
<tr><td>通信地址</td><td colspan="3">宁波经济技术开发区新大路 1069 号</td><td>邮 编</td><td>315800</td></tr>
</table>

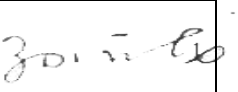
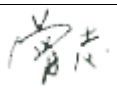
<table>
<tr><td rowspan="5"></td><td colspan="6">项目负责人</td></tr>
<tr><td>姓　名</td><td>马跃新</td><td>性 别</td><td>男</td><td>签 名</td><td>  </td></tr>
<tr><td>所在部门</td><td>中山火炬职业技术学院</td><td>职务</td><td>系主任</td><td>专业技术职务</td><td>教授</td></tr>
<tr><td>手 机</td><td>18928131008</td><td>传真</td><td>0760-88291877</td><td>电子邮箱</td><td>yuexin.ma@163.com</td></tr>
<tr><td>通信地址</td><td colspan="3">中山火炬职业技术学院实训校区 A 栋 710 光电工程系</td><td>邮　编</td><td>528436</td></tr>
<tr><td rowspan="7">1-2
参与单位及负责人（1）</td><td>单位名称</td><td colspan="5">国家半导体照明工程研发及产业联盟</td></tr>
<tr><td>单位地址</td><td colspan="5">北京市海淀区清华东路甲 35 号中科院半导体研究所研发中心楼 5 层</td></tr>
<tr><td>法人代表</td><td>吴玲</td><td>电 话</td><td>01082388180</td><td>签 名</td><td>  </td></tr>
<tr><td colspan="6">项目负责人</td></tr>
<tr><td>姓　名</td><td>冯亚东</td><td>性 别</td><td>男</td><td>签 名</td><td>  </td></tr>
<tr><td>所在部门</td><td>人力资源服务部</td><td>职务</td><td>副秘书长</td><td>专业技术职务</td><td></td></tr>
<tr><td>手 机</td><td>18610689188</td><td>传真</td><td>010-82382380</td><td>电子邮箱</td><td>fengyadong@china-led.net</td></tr>
<tr><td>通信地址</td><td colspan="3">北京市海淀区清华东路甲 35 号中科院半导体研究所研发中心楼 5 层</td><td>邮　编</td><td>100083</td></tr>
<tr><td rowspan="5">1-2
参与单位及负责人（2）</td><td>单位名称</td><td colspan="5">重庆电子工程职业学院</td></tr>
<tr><td>单位地址</td><td colspan="5">重庆•沙坪坝•重庆大学城东路 76 号</td></tr>
<tr><td>法人代表</td><td>聂强</td><td>电 话</td><td>02365926666
13509495509</td><td>签 名</td><td>  </td></tr>
<tr><td colspan="6">项目负责人</td></tr>
</table>

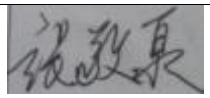
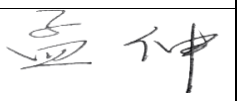
	姓　名	王正勇	性 别	男	签 名	
	所在部门	应用电子学院	职务	分院院长	专业技术职务	教授
	手 机	13330331962	传真	02365927000	电子邮箱	wang_it@163.com
	通信地址	重庆电子工程职业学院应用电子学院			邮　编	401331
1-2参与单位及负责人（3）	单位名称	威海职业学院				
	单位地址	山东省威海市初村北海				
	法人代表	周春杰	电 话	0631-5700888	签 名	
	项目负责人					
	姓　名	景悦林	性 别	男	签 名	
	所在部门	信息工程系	职务	新能源电子技术专业带头人	专业技术职务	讲师
	手 机	15863106155	传真	06315700858	电子邮箱	54682726@qq.com
	通信地址	威海职业学院信息工程系			邮　编	264210
1-2参与单位及负责人（4）	单位名称	常州信息职业技术学院				
	单位地址	江苏省常州市鸣新中路2号				
	法人代表	王丹中	电 话	0519-86338018	签 名	
	项目负责人					
	姓　名	陈宜建	性 别	男	签 名	

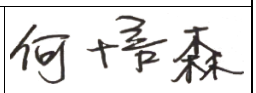
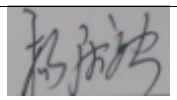
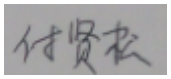
	所在部门	电子与电气工程学院	职务		专业技术职务	讲师 /工程师
	手 机	15961239880	传真	0519-86338148	电子邮箱	Cyjscama@163.com
	通信地址	江苏省常州市鸣新中路 2 号			邮 编	213164
1-2 参与单位及负责人（5）	单位名称	广东轻工职业技术学院				
	单位地址	广州市海珠区新港西路 152 号				
	法人代表	叶小明	电 话	020-61230200	签 名	
	项目负责人					
	姓 名	孟治国	性 别	男	签 名	孟治国
	所在部门	电子通信工程系	职务	专业带头人	专业技术职务	高工
	手 机	13719483860	传真	020-61230018	电子邮箱	Mzg168@sina.com
	通信地址	广州市海珠区新港西路 152 号			邮 编	510300
1-2 参与单位及负责人（6）	单位名称	南京信息职业技术学院				
	单位地址	南京市仙林大学城文澜路 99 号				
	法人代表	王钧铭	电 话	18951690123 025-85842003	签 名	王钧铭
	项目负责人					
	姓 名	于宝明	性 别	男	签 名	于宝明
	所在部门	电子信息学院	职务	院长	专业技术职务	副教授

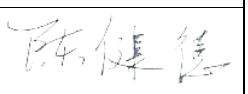
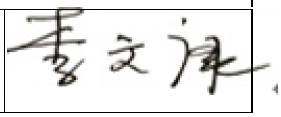
	手 机	18951690298	传真	025-85842256	电子邮箱	yubm@njcit.cn
	通信地址	南京市仙林大学城文澜路 99 号			邮 编	210023
1-2 参与单位及负责人（7）	单位名称	杭州职业技术学院				
	单位地址	杭州下沙高教东区学源街 68 号				
	法人代表	贾文胜	电 话	0571-56700055	签 名	
	项目负责人					
	姓 名	陈云志	性 别	男	签 名	
	所在部门	信息工程学院	职务	院长	专业技术职务	副教授
	手 机	18758285319	传真		电子邮箱	79398687@qq.com
	通信地址	杭州下沙高教东区学源街 68 号			邮 编	310018
1-2 参与单位及负责人（8）	单位名称	深圳信息职业技术学院				
	单位地址	深圳市龙岗区龙翔大道 2188 号				
	法人代表	邢锋	电 话	075589226001	签 名	
	项目负责人					
	姓 名	王新中	性 别	男	签 名	
	所在部门	电子与通信学	职务		专业技术职务	副教授
	手 机	15019464358	传真		电子邮箱	xzwang868@163.com

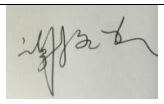
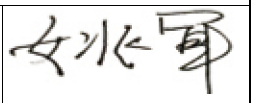
	通信地址	深圳市龙岗区龙翔大道 2188 号			邮　编	518172
1-2 参与单位及负责人（9）	单位名称	北京信息职业技术学院				
	单位地址	北京市朝阳区芳园西路 5 号				
	法人代表	武马群	电 话	010 64312725	签 名	
	项目负责人					
	姓　名	李学礼	性 别	男	签 名	
	所在部门	电子工程系	职务	副主任	专业技术职务	副教授/高工
	手 机	18910055193	传真	010-64312745	电子邮箱	Lixl@bitc.edu.cn
	通信地址	北京市朝阳区芳园西路 5 号			邮　编	100015
1-2 参与单位及负责人（10）	单位名称	福建信息职业技术学院				
	单位地址	福建省福州市鼓楼区福飞路 106 号				
	法人代表	王萍辉	电 话	059187854829 13635291212	签 名	
	项目负责人					
	姓　名	孙学耕	性 别	男	签 名	
	所在部门	电子工程系	职务	系主任	专业技术职务	副教授
	手 机	13809556246	传真	059187243350	电子邮箱	sxgeng@sina.com
	通信地址	福建福州鼓楼区福飞路 106 号			邮　编	350003

<table>
<tr><td rowspan="9">1-2
参与单位及负责人（11）</td><td>单位名称</td><td colspan="5">淮安信息职业技术学院</td></tr>
<tr><td>单位地址</td><td colspan="5">江苏省淮安市高教园区大学城枚乘东路 3 号</td></tr>
<tr><td>法人代表</td><td>田敏</td><td>电 话</td><td>051783808008</td><td>签 名</td><td>  </td></tr>
<tr><td colspan="6">项目负责人</td></tr>
<tr><td>姓 名</td><td>孙云龙</td><td>性 别</td><td>男</td><td>签 名</td><td>  </td></tr>
<tr><td>所在部门</td><td>电子工程学院</td><td>职务</td><td>教研室主任</td><td>专业技术职务</td><td>讲师/工程师</td></tr>
<tr><td>手 机</td><td>13915107261</td><td>传真</td><td>0517-83808218</td><td>电子邮箱</td><td>553344742@qq.com</td></tr>
<tr><td>通信地址</td><td colspan="3">淮安市高教园区枚乘东路 3 号</td><td>邮 编</td><td>223003</td></tr>
<tr><td rowspan="9">1-2
参与单位及负责人（12）</td><td>单位名称</td><td colspan="5">咸宁职业技术学院</td></tr>
<tr><td>单位地址</td><td colspan="5">湖北省咸宁市咸宁大道 118 号</td></tr>
<tr><td>法人代表</td><td>戴国强</td><td>电 话</td><td>15907240366</td><td>签 名</td><td>  </td></tr>
<tr><td colspan="6">项目负责人</td></tr>
<tr><td>姓 名</td><td>曾志</td><td>性 别</td><td>男</td><td>签 名</td><td>  </td></tr>
<tr><td>所在部门</td><td>信息工程学院</td><td>职务</td><td>院长</td><td>专业技术职务</td><td>副教授</td></tr>
<tr><td>手 机</td><td>13135962589</td><td>传真</td><td>07158280709</td><td>电子邮箱</td><td>Lpzz123@163.com</td></tr>
<tr><td>通信地址</td><td colspan="3">咸宁职业技术学院信息工程学院</td><td>邮 编</td><td>437100</td></tr>
<tr><td>1-2</td><td>单位名称</td><td colspan="5">湖北国土资源职业学院</td></tr>
</table>

参与单位及负责人（13）	单位地址	湖北省武汉市汉南区育才路 399 号				
	法人代表	郑乐平	电 话	027-84730266	签 名	
	项目负责人					
	姓 名	张敬泉	性 别	男	签 名	
	所在部门	机电工程系	职务	副院长	专业技术职务	副教授
	手 机	18071037585	传真	027-84730210	电子邮箱	、
	通信地址	湖北省武汉市汉南区育才路 399 号			邮 编	430090
1-2 参与单位及负责人（14）	单位名称	厦门市集美职业技术学校				
	单位地址	厦门市集美区瑶山路 41 号				
	法人代表	杜志忠	电 话	05926210159	签 名	
	项目负责人					
	姓 名	孟伸	性 别	男	签 名	
	所在部门	光电专业部	职务	主任	专业技术职务	助理讲师
	手 机	18650156780	传真	05926248502	电子邮箱	mengshen001@126.com
	通信地址	厦门市集美区瑶山路 41 号			邮 编	361022
1-2 参与单位及负	单位名称	广东省惠州市技师学院				
	单位地址	广东省惠州市江北西区 31 号（惠博沿江路奥林匹克花园旁）				

责人（15）	法人代表	谭建辉	电 话	0752-2731211	签 名	
	项目负责人					
	姓 名	何培森	性 别	男	签 名	
	所在部门	电子工程系	职务	系主任	专业技术职务	高级讲师
	手 机	13068231618	传真		电子邮箱	hzshps@163.com
	通信地址	广东省惠州市江北西区 31 号			邮 编	516003
1-2 参与单位及负责人（16）	单位名称	天津工业大学				
	单位地址	天津市西青区宾水西道 399 号天津工业大学新校区				
	法人代表	杨庆新	电 话		签 名	
	项目负责人					
	姓 名	付贤松	性 别	男	签 名	
	所在部门	电气工程与自动化学院	职务	系主任	专业技术职务	副教授
	手 机	13370351020	传真	022-83955531	电子邮箱	fuxians@163.com
	通信地址	天津市西青区宾水西道 399 号天津工业大学新校区			邮 编	300387
1-2 参与单位及负责人（17）	单位名称	深圳大学				
	单位地址	深圳市南山区南海大道 3688 号				
	法人代表	李清泉	电 话	075526536114	签 名	

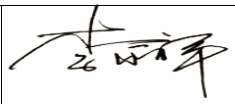
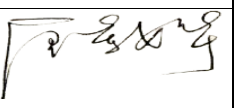
	项目负责人					
	姓　名	柴广跃	性 别	男	签 名	
	所在部门	光电学院	职务	主任	专业技术职务	教授
	手 机	13823337326	传真	0755-26538560	电子邮箱	gychai@szu.edu.cn
	通信地址	深圳市南山区南海大道 3688 号			邮　编	518060
1-2 参与单位及负责人（18）	单位名称	电子工业出版社				
	单位地址	北京市万寿路南口金家村 288 号				
	法人代表		电 话		签 名	
	项目负责人					
	姓　名	陈健德	性 别	男	签 名	
	所在部门	高职理工事业部	职务	主任	专业技术职务	高级工程师 副编审
	手 机	13366185998	传真		电子邮箱	Chenjd@phei.com.cn
	通信地址	北京市万寿路 173 信箱			邮　编	100036
1-2 参与单位及负责人（19）	单位名称	英特尔（中国）有限公司				
	单位地址	北京市北三环东路 36 号环球贸易中心 D 座 20 楼				
	法人代表		电 话		签 名	
	项目负责人					
	姓　名	李文康	性 别	男	签 名	

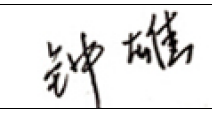
	所在部门	高等教育与职业教育行业业务发展部	职务	中国区经理	专业技术职务	
	手 机	13925007855	传真	020-38771399	电子邮箱	wenkang.li@intel.com
	通信地址	广州市天河北路233号中信广场5103			邮 编	510613
1-2参与单位及负责人（20）	单位名称	领航未来（北京）科技有限公司				
	单位地址	北京市海淀区东北旺来路西路8号5号楼汉王大厦2D51				
	法人代表	谢冬贵	电 话		签 名	
	项目负责人					
	姓 名	姚军	性 别	男	签 名	
	所在部门	产品研发部	职务	技术总监	专业技术职务	
	手 机	13911738814	传真		电子邮箱	peter.yao@36ve.com
	通信地址	北京市海淀区龙岗路清润家园3号楼1002室			邮 编	100192
1-2参与单位及负责人（21）	单位名称	宁波半导体照明产学研技术创新战略联盟				
	单位地址	宁波高新区光华路299弄29号C12幢22层				
	法人代表		电 话		签 名	
	项目负责人					
	姓 名	任奉波	性 别	女	签 名	

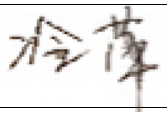
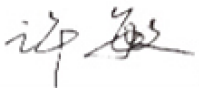
	所在部门	宁波电子行业协会	职务	副会长兼秘书长	专业技术职务	经济师
	手 机	13605742233	传真	0574-87294643	电子邮箱	rfb@nbelec.com
	通信地址	宁波高新区光华路299弄29号C12幢23层			邮 编	315048
1-2参与单位及负责人（22）	单位名称	厦门光莆电子股份有限公司				
	单位地址	厦门市思明区岭兜西路608号				
	法人代表	林瑞梅	电 话	0592-5999181	签 名	
	项目负责人					
	姓 名	林瑞梅	性 别	女	签 名	
	所在部门	总经办	职务	董事长	专业技术职务	高级工程师
	手 机	13806075348	传真	0592-5621415	电子邮箱	lin@xm-gp.com
	通信地址	厦门市思明区岭兜西路608号			邮 编	361009
1-2参与单位及负责人（23）	单位名称	深圳市瑞丰光电子股份有限公司				
	单位地址	深圳市光明新区公明办事处田寮社区第十工业区1栋				
	法人代表	龚伟斌	电 话	0755-29675000	签 名	
	项目负责人					
	姓 名	高开敏	性 别	男	签 名	
	所在部门	人力行政中心	职务	经理	专业技术职务	副教授

	手 机	13923416951	传真	0755-29675111	电子邮箱	kaimin.gao@refond.com
	通信地址	深圳市光明新区公明办事处田寮社区第十工业区 1 栋			邮 编	518132
1-2 参与单位及负责人（24）	单位名称	杭州中为光电技术股份有限公司				
	单位地址	杭州市西湖区西园九路 6 号 7 幢				
	法人代表	张九六	电 话	0571-89905290	签 名	
	项目负责人					
	姓 名	张九六	性 别	男	签 名	
	所在部门	董事办	职务	董事长	专业技术职务	
	手 机	18658178896	传真	0571-88021187	电子邮箱	zhangjiuliu@fast-eyes.com
	通信地址	杭州市西湖区西园九路 6 号 7 幢			邮 编	310030
1-2 参与单位及负责人（25）	单位名称	广州市鸿利光电股份有限公司				
	单位地址	广州市花都区花东镇先科一路 1 号				
	法人代表	李国平	电 话	020-86733333	签 名	
	项目负责人					
	姓 名	雷利宁	性 别	男	签 名	
	所在部门	总经办	职务	总经理	专业技术职务	高级人力资源管理师
	手 机	13609605156	传真	020-86733383	电子邮箱	13609605156@qq.com

	通信地址	广州市花都区花东镇先科一路 1 号			邮　编	510890
1-2 参与单位及负责人（26）	单位名称	湘能华磊光电股份有限公司				
	单位地址	湖南省郴州市高新技术产业园				
	法人代表	毛自力	电 话	0735-2471722	签 名	
	项目负责人					
	姓　名	戚运东	性 别	男	签 名	
	所在部门	总经办	职务	常务副总经理	专业技术职务	
	手 机	15886536111	传真		电子邮箱	15886536111@qq.com
	通信地址	湖南省郴州市高新技术产业园			邮　编	423038
1-2 参与单位及负责人（27）	单位名称	宁波凯耀电器制造有限公司				
	单位地址	浙江宁波北仑大浦河北路 5 号				
	法人代表		电 话		签 名	
	项目负责人					
	姓　名	王建文	性 别	女	签 名	
	所在部门	人力资源部	职务	经理	专业技术职务	高级工程师
	手 机	13738892158	传真	0574-86117638	电子邮箱	stephen@klite.cn
	通信地址	浙江宁波北仑大浦河北路 5 号			邮　编	315800

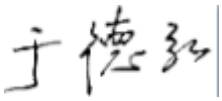
<table>
<tr><td rowspan="8">1-2
参与单位及负责人（28）</td><td>单位名称</td><td colspan="5">重庆卓鹏科技有限公司</td></tr>
<tr><td>单位地址</td><td colspan="5">中国.重庆.九龙坡区冶金四村</td></tr>
<tr><td>法人代表</td><td></td><td>电 话</td><td></td><td>签 名</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6">项目负责人</td></tr>
<tr><td>姓 名</td><td>李永祥</td><td>性 别</td><td>男</td><td>签 名</td><td>  </td></tr>
<tr><td>所在部门</td><td>总经办</td><td>职务</td><td>总经理</td><td>专业技术职务</td><td>高级工程师</td></tr>
<tr><td>手 机</td><td>18974938118</td><td>传真</td><td>023-61373291</td><td>电子邮箱</td><td>56139565@qq.com</td></tr>
<tr><td>通信地址</td><td colspan="3">中国.重庆.九龙坡区冶金四村 重庆卓鹏科技有限公司</td><td>邮 编</td><td>400050</td></tr>
<tr><td rowspan="8">1-2
参与单位及负责人（29）</td><td>单位名称</td><td colspan="5">广州市风标电子技术有限公司</td></tr>
<tr><td>单位地址</td><td colspan="5">广州市高新技术产业开发区科学城科珠路 203 号 902A</td></tr>
<tr><td>法人代表</td><td></td><td>电 话</td><td></td><td>签 名</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6">项目负责人</td></tr>
<tr><td>姓 名</td><td>匡载华</td><td>性 别</td><td>男</td><td>签 名</td><td>  </td></tr>
<tr><td>所在部门</td><td>总部</td><td>职务</td><td>总经理</td><td>专业技术职务</td><td>总工</td></tr>
<tr><td>手 机</td><td>13902409520</td><td>传真</td><td>020-86003016</td><td>电子邮箱</td><td>kuang@windway.cn</td></tr>
<tr><td>通信地址</td><td colspan="3">广州市高新技术产业开发区科学城科珠路 203 号 902A</td><td>邮 编</td><td>510663</td></tr>
<tr><td>1-2</td><td>单位名称</td><td colspan="5">四川九洲光电科技股份有限公司</td></tr>
</table>

参与单位及负责人（30）	单位地址	四川绵阳科创园区九洲大道 259 号				
	法人代表		电 话		签 名	
	项目负责人					
	姓 名	钟雄	性 别	男	签 名	
	所在部门	研发部	职务	副总工程师	专业技术职务	高级工程师
	手 机	13502828948	传真	0755-26740206	电子邮箱	allan.zhong@scjz-led.com
	通信地址	深圳市南山区高新科技园科技南 12 路九洲电器大厦 8 楼			邮 编	518057
1-2 参与单位及负责人（31）	单位名称	易美芯光（北京）科技有限公司				
	单位地址	北京市经济技术开发区经海五路 58 号院数字工厂 3 号楼 3 层				
	法人代表	范振灿	电 话	010-56381638	签 名	
	项目负责人					
	姓 名	刘国旭	性 别	男	签 名	
	所在部门	总裁办	职务	副总裁	专业技术职务	高级工程师（教授级）
	手 机	13717575234	传真	01056381638	电子邮箱	Jayliu@shineon.cn
	通信地址	北京市经济技术开发区经海五路 58 号院数字工厂 3 号楼 3 层			邮 编	100176
1-2 参与单位及负	单位名称	北京申安投资集团有限公司				
	单位地址	北京市大兴区榆垡工业园区榆顺路 7 号				

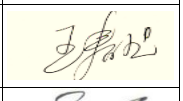
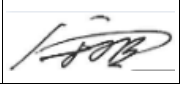
责人（32）	法人代表	庄申安	电 话	010-89216999	签 名	
	项目负责人					
	姓 名	冷萍	性 别	女	签 名	
	所在部门	总经办	职务	副总经理	专业技术职务	政工师
	手 机	13552264788	传真	01086916888	电子邮箱	1434702227@QQ.COM
	通信地址	北京市大兴区榆垡工业园区榆顺路 7 号（申安集团）			邮 编	102602
1-2 参与单位及负责人（33）	单位名称	山西光宇半导体照明股份有限公司				
	单位地址	山西省临汾市尧都区尧庙光宇工业园				
	法人代表	许福贵	电 话	0357-2165031	签 名	
	项目负责人					
	姓 名	许敏	性 别	女	签 名	
	所在部门	研发部	职务	技术总监	专业技术职务	高级工程师
	手 机	13835363818	传真	010-62153948	电子邮箱	xumin@gyled.com.cn
	通信地址	北京市海淀区大钟寺 13 号华杰大厦 5c9			邮 编	100098
1-2 参与单位及负责人 (34)	单位名称	深圳雷曼光电科技股份有限公司				
	单位地址	深圳市南山区西丽白芒百旺信工业园二区八栋雷曼大厦				
	法人代表	李漫铁	电 话	0755-86139688	签 名	
	项目负责人					

	姓　名	龚慧	性 别	女	签 名	
	所在部门	人力资源中心	职务	总监	专业技术职务	
	手 机	13823729337	传真	0755-86139001	电子邮箱	gongh@ledman.com.cn
	通信地址	深圳市南山区西丽白芒百旺信工业园二区八栋雷曼大厦			邮　编	518000
1-2 参与单位及负责人 (35)	单位名称	华灿光电股份有限公司				
	单位地址	武汉东湖开发区滨湖路八号				
	法人代表	周福云	电 话	027-82668866	签 名	
	项目负责人					
	姓　名	严丹	性 别	女	签 名	
	所在部门	人力资源部	职务	资深人力资源主管	专业技术职务	
	手 机	13918520850	传真		电子邮箱	yandan@hcsemitek.com
	通信地址	湖北省武汉市东湖开发区滨湖路8号			邮　编	430023

2. 首席顾问

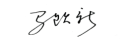
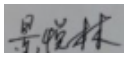
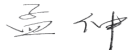
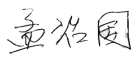
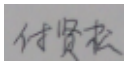
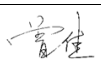
姓名	李晋闽	性别	男	签 名	
所在单位	中科院半导体所	职务	原所长	专业技术职务	研究员
手机	13501029800	传真	01082305341	电子邮箱	jmli@semi.ac.cn
通信地址（邮编）	北京市海淀区清华东路甲 35 号				
姓名	于德弘	性别	男	签 名	
所在单位	西安交通大学	职务	副校长	专业技术职务	教授
手机	13991339406	传真		电子邮箱	Ydh1069@163.com
通信地址（邮编）	陕西省西安市咸宁西路 28 号				

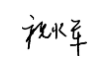
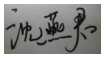
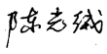
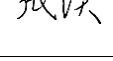
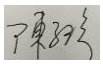
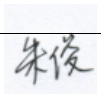
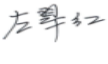
3. 项目建设指导小组

序号	姓 名	所在单位及部门	职务	性别	年龄	专业领域	专业技术职务	签名
1	李晋闽	中科院半导体研究所	原所长	男	58	半导体材料与器件	研究员	
2	于德弘	西安交通大学	原副校长	男	66	制造过程仿真与控制、高职教育研究	教授	
3	王春旭	中山火炬职业技术学院	院长	男	55	法学	教授	
4	聂强	重庆电子工程职业学院	院长	男	50	高职教育研究	教授	
5	宋文官	中国教育技术协会实践教学委员会	主任	男	58	电商、物流	教授	

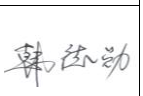
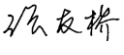
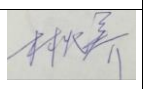
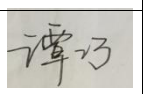
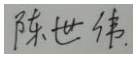
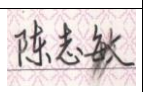
6	孙卫平	工业和信息化职业教育教学指导委员会	副主任委员	男	51	职业教育	教授	
7	严新桥	宁波市教育局高教处	处长	男	52	高等教育研究		
8	柴灿	电子工业出版社职业教育分社	副社长	男	42	职业教育	副编审	
9	艾一平	人社部职业技能鉴定中心	副主任	男		职业教育	高级	
10	刘木清	复旦大学		男	50	光源与照明	教授	
11	任奉波	宁波电子行业协会、宁波半导体照明产学研技术创新战略联盟	副会长、秘书长	女	63	半导体照明领域产业研究及行业管理	经济师	
12	袁长安	半导体照明联合创新国家重点实验室	项目总监	男	39	半导体照明	研究员	
13	李文康	英特尔（中国）有限公司高等教育与职业教育行业业务发展部	中国区经理	男	38			
14	林胜	宁波升谱光电半导体有限公司	研发副总	男	45	半导体照明		
15	钟雄	四川九洲光电科技股份有限公司研发部	副总工程师	男	47		高级工程师	
16	林瑞梅	厦门光莆电子股份有限公司	董事长	女	49		高级工程师	
17	张九六	杭州中为光电技术股份有限公司	总经理	男	36			
18	雷利宁	广州市鸿利光电股份有限公司	总经理	男	42	高级人力资源管理师	高级注册人力资源管理师	

4. 项目开发团队

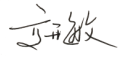
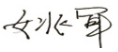
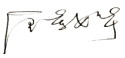
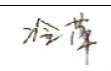
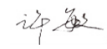
序号	姓名	所在单位及部门	性别	年龄	职务	专业技术职务	职业资格证书	专业领域	项目分工	签名
1	吴志荣	宁波职业技术学院电信学院	男	59	分院院长	教授	高级考评员	电子技术、专业建设	框架结构设计	
2	马跃新	中山火炬职业技术学院	男	57	系主任	教授	工程师	材料工程	框架结构设计	
3	胡克满	宁波职业技术学院电信学院	男	35	分院院长助理	副教授	维修电工高级	电子	课程建设	
4	王正勇	重庆电子工程职业学院应用电子学院	男	48	分院院长	教授	高级考评员	光电技术	框架结构设计	
5	景悦林	威海职业学院信息工程系	男	36	新能源电子技术专业带头人	讲师	高级技师	能源电子	课程建设	
6	孙云龙	淮安信息职业技术学院、电子工程学院	男	35	教研室主任	讲师/工程师	技师	光电子技术	课程建设	
7	孟伸	厦门市集美职业技术学校	男	32	主任	助理讲师	集成电路装调高级工	半导体照明	课程建设	
8	孟治国	广东轻工职业技术学院电子通信工程系	男	45	系主任	教授	高级工程师	物理	课程建设	
9	姚善良	湖北国土资源管理职业学院	男	36	副院长	副教授、高级工程师		半导体照明设计	课程建设	
10	汪涛	咸宁职业技术学院信息工程学院	男	43	教研室主任	副教授	高级	电子	课程建设	
11	付贤松	天津工业大学电气工程与自动化学院光源与照明系	男	39	系主任	副教授		半导体照明集成技术	课程建设	
12	曾佳	宁波职业技术学院电信学院	女	37	专任教师	讲师	维修电工高级	电子	课程建设	

13	祝水军	宁波职业技术学院电信学院	男	40	专任教师	讲师	维修电工高级	电子	课程建设	
14	沈燕君	宁波职业技术学院电信学院	女	31	专任教师	讲师	维修电工高级	电子	课程建设	
15	陈光绒	宁波职业技术学院电信学院	男	51	专业主任	高级工程师	技师	物联网	课程建设	
16	张溪	宁波职业技术学院电信学院	男	53	专任教师	高级工程师	维修电工高级	半导体照明	课程建设	
17	陈子珍	宁波职业技术学院海天学院	男	45	分院副院长	高级工程师	维修电工高级	电气自动化	课程建设	
18	梁律	宁波职业技术学院	男	34	教务管理	讲师	计算机数据分析		资源建设	
19	陈文涛	中山火炬职业技术学院	男	43	教研室主任	副教授	考评员	光电子技术	未来课堂	
20	朱俊	中山火炬职业技术学院	女	28	教师	讲师	高级工	光电子技术	课程建设	
21	刘登飞	中山火炬职业技术学院	男	37	教师	讲师	技师	光电技术与LED应用	课程建设	
22	刘睿强	重庆电子工程职业学院应用电子学院	男	43	系主任	副教授	高级技师	半导体技术	课程建设	
23	王林泓	重庆电子工程职业学院应用电子学院	女	41	专业带头人	副教授	电子装接工考评员	仪器仪表	课程建设	
24	陈学昌	重庆电子工程职业学院应用电子学院	男	36	教务科长	讲师	技师	应用电子技术	课程建设	
25	赵淑平	重庆电子工程职业学院应用电子学院	女	39	骨干教师	副教授	电子装接工考评员	光电技术	课程建设	
26	左翠红	威海职业学院信息工程系	女	49	系副主任	教授	电子技师高级考评员	电子产品开发	课程建设	

27	孙学耕	福建信息职业技术学院	男	47	系主任	副教授	高级考评员	电子技术应用	课程建设	
28	陈宜建	常州信息职业技术学院	男	36	主任	工程师	无线电技师 考评员 照明设计师	照明设计	课程建设	
29	王新中	深圳信息职业技术学院	男	36	主任	副教授	电子元器件考评员	应用电子	课程建设	
30	李学礼	北京信息职业技术学院	男	40	系副主任	副教授	技师	电子技术	课程建设	
31	于宝明	南京信息职业技术学院	男	50	分院院长	副教授	高级技师	通信技术	课程建设	
32	吴弋旻	杭州职业技术学院	女	50	专业主任	教授	高级工程师	应用电子	课程建设	
33	何培森	惠州技师学院电子工程系	男	52	系主任	高级讲师	高级技师	电子产品研发	课程建设	
34	柴广跃	深圳大学光电工程学院光源与照明系	男	56	系主任	教授		半导体光电子	课程建设	
35	余佑财	咸宁职业技术学院信息工程学院	男	48	副院长	副教授	高级、质量督导员	电子	课程建设	
36	王宝英	重庆电子工程职业学院应用电子学院	女	36	骨干教师	讲师	电子装接工考评员	微电子技术	课程建设	
37	彭华	重庆电子工程职业学院应用电子学院	女	37	系主任	副教授	电子装接工考评员	光电技术	课程建设	
38	毛小群	重庆电子工程职业学院应用电子学院	女	35	副系主任	讲师	电子装接工考评员	光电技术	课程建设	
39	周莹	重庆电子工程职业学院应用	女	34	骨干教师	讲师	电子装接工考评员	电子技术	课程建设	

		电子学院								
40	付渊	重庆电子工程职业学院应用电子学院	男	45	骨干教师	副教授	电子装接工考评员	电子技术	课程建设	
41	毛朝庆	重庆电子工程职业学院应用电子学院	男	34	实训中心主任	实验师	高级电子装接工	电子技术	课程建设	
42	韩德勋	重庆电子工程职业学院应用电子学院	男	50	党总支书记	讲师	中级电子装接工	光电制造技术	课程建设	
43	夏西泉	重庆电子工程职业学院应用电子学院	男	45	副院长	副教授	技师电子装接工	通信技术	课程建设	
44	文国电	重庆电子工程职业学院应用电子学院	男	49	教学督导	副教授	高级电子装接工	无线电技术	课程建设	
45	张友桥	宁波职业技术学院电信学院	男	54	专任教师	讲师	技师	电子	课程建设	
46	翁芸	宁波职业技术学院电信学院	女	43	分院办公室主任	副高		电子	课程建设	
47	李伟	宁波职业技术学院电信学院	男	40	实训中心主任	讲师	技师	微电子	课程建设	
48	林火养	福建信息职业技术学院电子工程系	男	35	专业主任	讲师	一级建造师	光电技术	课程总体设计	
49	谭巧	福建信息职业技术学院电子工程系	女	34		讲师	一级建造师	半导体技术	子项目设计及教学	
50	陈世伟	福建信息职业技术学院电子工程系	男	30		助讲	高级工	光学工程	子项目设计及教学	
51	陈志敏	三创电子	男	40	车间主任	工程师		电子技术	实践教学与指导	
52	楚微玮	咸宁职业技术学院信息工程学院	女	31	教 师	讲师	高级	电子	课程建设	
53	陈慧挺	中山火炬职业技术学院光电工程系	男	34	教师	高级工程师	考评员	光电检测技术		

54	王丽荣	中山火炬职业技术学院光电工程系	女	39	教研室主任	工程师	考评员	光电制造技术		
55	刘晓飞	中山火炬职业技术学院光电工程系	女	36	教研室主任	讲师	考评员	精密机械技术		
56	王志刚	中山火炬职业技术学院光电工程系	男	35	教师	副教授	技师	电子技术		
57	陈伟文	中山火炬职业技术学院光电工程系	男	47	教师	讲师	考评员	机械工程		
58	马骏	国家半导体照明工程研发及及产业联盟	男	32	人力资源部部长			人力资源管理	资源开发	
59	窦佳佳	国家半导体照明工程研发及及产业联盟	男	28	人力资源部			人力资源管理	资源开发	
60	杨广华	天津工业大学电气工程与自动化	男	42	副主任	中级		半导体照明		
61	王巍	天津工业大学电气工程与自动化	男	45		教授		智能控制		
62	张建新	天津工业大学电气工程与自动化	男	36		副教授		半导体照明		
63	宁平凡	天津工业大学电气工程与自动化	男	33		中级		半导体照明		
64	王宁	天津工业大学电气工程与自动化	男	30		中级		智能控制		
65	梁立君	天津工业大学电气工程与自动化	男	28		初级		照明光学		
66	陈健德	电子工业出版社高职理工事业部	男	49	主任	高级工程师、副编审			资源建设	

67	王建文	宁波凯耀电气股份有限公司人力资源库	女	35	经理	高级工程师			资源建设	
68	高开敏	深圳瑞丰光电子股份有限公司	男	39	人资源经理	副教授	企业人力资源管理师一级		资源建设	
69	戚运东	湘能华磊光电股份有限公司	男	48	常务副总经理				资源建设	
70	姚军	领航未来（北京）科技有限公司	男	45	技术总监			系统设计架构	资源建设	
71	李永祥	重庆卓鹏科技有限公司	男	38	总经理	高级工程师	高级	软件工程	资源建设	
72	匡载华	广州市风标电子技术有限公司	男	50	总经理	总工	工程师	通信工程	资源建设	
73	刘国旭	易美芯光（北京）科技有限公司	男	49	副总裁	教授级高级工程师	高级	半导体照明	资源建设	
74	冷萍	北京申安投资集团有限公司	女	45	副总经理	政工师		半导体照明	资源建设	
75	许敏	山西光宇半导体照明股份有限公司	女	32	技术总监	高级工程师		半导体照明	资源建设	
76	龚慧	深圳雷曼光电科技股份有限公司	女	37	人力资源总监				资源建设	
77	严丹	华灿光电股份有限公司	女	30	资深人力资源主管				资源建设	

5. 建设目标与思路

5.1 总体目标

针对半导体照明技术与应用及相近专业学生就业的“LED 灯具设计与制造”、“LED 电源与驱动控制”、“LED 照明工程应用”三个工作领域，依托国家半导体照明工程研发及产业联盟支撑，通过校际合作、产教融合的模式，整合院校和行业资源，建设具有“能学”、“辅教”、“培训”、“认证”等多重功能的教学资源库和多平台的应用体系，规范和引领全国的职业院校半导体照明技术专业课程体系形成和改革，促进泛在、移动、个性化学习方式的形成。实现在线学习、辅助教学、培训认证、招聘就业、资讯交流等多种功能，成为活跃度较高并持续应用的资源库。

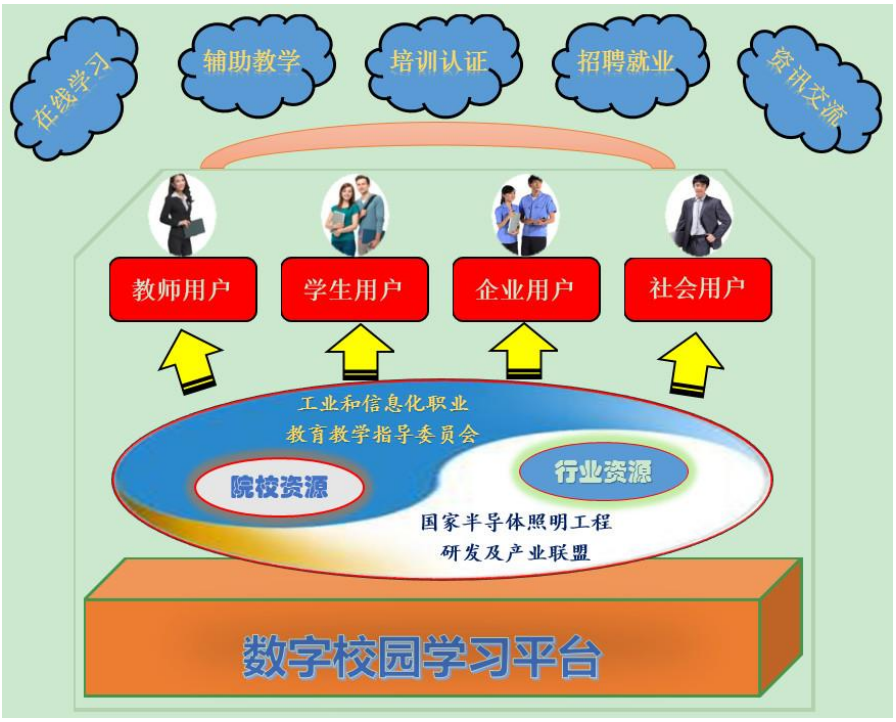


图 5-1　半导体照明技术与应用专业教学资源库建设目标

5.2 分类目标

5.2.1 创新专业教学资源的共建共享机制

国家示范性院校共同主持，联合国家半导体照明工程研发及产业联盟，创新校际合作、校企联合专业教学资源库共建共享机制。

5.2.2 对接职业标准构建结构化课程体系

在行业指导下，专业企业共同调整优化培养方案，以职业岗位实践能力培养为主线，完善基于工作过程的结构化课程体系，不同职业岗位可以通过选择不同方向的课程模块。

5.2.3 建设层次递进通用加个性资源体系

分通用的专业基础课程、适合不同区校的专业方向核心课程、校本适用（未列入建设计划）的个性课程三个层次，按照素材→积件→模块→课程→专业，由低到高建设资源体系；资源达到教学、学习、培训通用，个性化学习实用的要求。

5.2.4 打造技术先进实用便捷的应用平台

以移动互联技术为支撑，可以通过 PC+APP 实现随时随地学习和交流；以大数据分析为基础，建设具有学习引导、课程学习、网络指导、评价测试、知识拓展、仿真训练等功能的在线学习和辅助教学资源平台。

5.2.5 建立资源库建设应用质量保障体系

针对资源库的建设者、学习者和管理者制订各项应用激励制度和经费使用制度，构建规范的资源库建设和应用机制，保障资源优质、高效运行。

5.3 建设思路

5.3.1 社会调研、组织团队

由于本专业涉及的产业链长，除电子信息行业相关外，还与照明、微电子、广告等行业有关，故在组织相关院校，联合国家产业联盟，进行 LED 专业资源库建设论证时，同时与其他相关行业协会及行政主管部门联络沟通，组织资源库建设专家团队和各子项目建设团队。

5.3.2 整体规划、系统设计

组织专家团队，规划资源库整个框架结构和学习应用功能，院校与企业相互合作，建设任务各有侧重，课程建设以院校为主，行业企业配合，培训论证、企业资讯等以行业企业为主，院校配合，在全国打造一个招生、教学、就业一体化的校企合作新模式。

5.3.3 统筹规划、实施

统筹考虑资源库的建设内容，合理安排建设资金的使用，继续完善前期基本建成的7门课程资源与应用推广，重点建设后续至少9门的教学资源与课程构建，同时构建适用学生和企业员工的职业资格证书培训论证、本科学历的多层次的学习系统。

5.3.4 共建共享、合作共赢

在资源库建设初期，打造资源建设者又是应用者的建设资源库新机制，组织各建设院校使用网络优质课程资源，并构建优质课程资源共享规范，总结应用经验并建立制度。

5.3.5 持续更新、能学辅教

在资源库建设期间，首先在参与建设的 37 家学校和企业范围内全面应用资源库，并每年以 20%的速度逐年扩大应用范围。同时把 LED 专业资源库建设的成果向应用电子技术等电子信息类专业推广，指导专业升级改造。

总之，资源库建设做到“规划有专家、内容有项目、项目有团队、实施有制度、质量有保障、推广有措施”。

6. 建设规划

6.1 课程体系建设规划

在行指委的指导与产业联盟的协助下，与行业企业密切合作，整合各地的教学内容、改革教学模式。通过“行业专家确定典型工作任务→学校专家归并行动领域→行业专家论证行动领域→学校专家开发学习领域→校企专家论证课程体系”的“五步工作机制”，实现校企专家共同参与课程体系设计。通过工作任务归并法实现典型工作任务到职业岗位转换，通过工作过程分析法实现从职业岗位到学习课程转换，通过工作任务还原法实现从学习课程到学习项目转换的“三阶段分析法”构建基于工作过程的专业核心课程体系。

6.2 资源体系建设规划

对接用户多样需求，建设“普适+个性”的资源体系。跟踪半导体照明行业企业发展、技术进步需求，动态更新课程资源和教学内容；构建优质并具有引领作用的通用、核心课程的模块化课程，素材、积件、模块、课程由低到高递进组合的资源体系。

统一资源建设标准，实现资源在不同门户间交换与整合。按照“能学”、“辅教”的功能定位，支持模块化课程教学和学习的要求，统一资源技术规范，为资源在不同门户间互联、互通、以及互访和互动奠定基础。

6.3 应用平台建设规划

紧扣“能学”、“辅教”功能，围绕用户建设应用平台。使各类教学资源实现教师教学、学生学习、企业培训通用，具有知识拓展、仿真训练、项目协作、测评认证功能，能根据用户需求形成个性化教学、学习和培训方案。

注重用户操作体验，形成个性化服务支撑系统。通过提供资源垂直智能搜索、相关课程自动推荐、开放信息推广展示、全媒体浏览支持、核心资源访问控制、资源信息推荐浏览等资源管理等手段，满足培养方案、个性化课程定制，支持教师在线备课、网上测评；满足学生在线学习、在线测试、职业提升等需求；帮助企业网上招聘和学生应聘。

6.4 建设机制建设规划

建立校际、校企共建共管共享项目管理机构，明确各级项目管理负责人、技术负责人的职责职能。建立项目实施管理机制，制定项目计划管理、进度管理、合同管理、质量管理、技术管理、成本管理、资源管理、研发管理、事务管理、应用管理办法。

6.5 应用机制建设规划

制订信息化教学管理办法、信息化学习管理办法；建立共建单位与用户应用反馈制度和更新维护机制，满足教学需求和技术发展的需要。利用移动互联技术，实现随时随地学习和交流；采用异地冗余备份等手段确保满足万人规模同时在线访问。

7．建设内容及可监测指标

7.1 构建半导体照明技术与应用专业教学资源库内容框架



图 7-1 半导体照明技术与应用专业教学资源库内容框架图

平台最终将建设成为全国职业院校 LED 专业教学的能学辅教的应用中心，全国 LED 产业发展、人才需求、培训进修的信息中心，全国 LED 行业人才专业化发展的服务中心。

7.2 完成 16 门专业基础课和专业课的课程程资源建设与应用

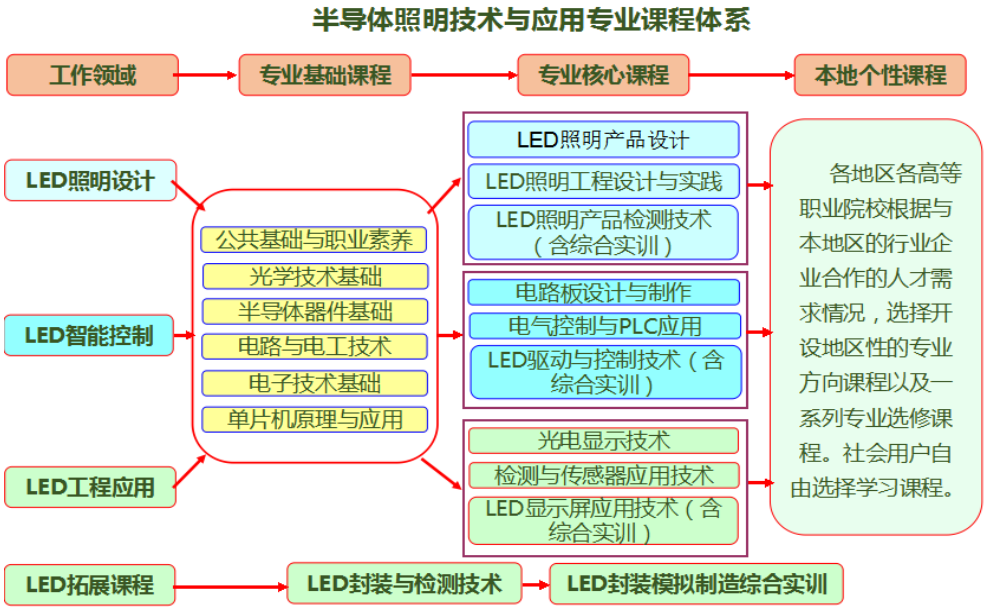


图 7-2 资源库专业课程体系

资源库系列课程及资源建设监测指标

课程类别	课程名称	监测指标							
		基本资源	学习引导	课件积件	微课视频	动画仿真	图片	产品案例	题库
专业基础课程	光学技术基础	课程教学大纲 职业活动教学设计 学习引导 电子教材 多媒体课件积件 评价标准 试题库	5	60	90	40	300	100	600
	半导体器件基础		5	60	90	40	300	100	600
	电路与电工技术		5	60	90	40	300	100	800
	电子技术基础		8	100	150	60	300	100	800
	单片机原理与应用		5	60	90	40	300	100	600
LED 驱动设计	电路板设计与制作		5	60	90	40	300	100	600
	电气控制与 PLC 应用		5	60	90	40	300	100	800
	LED 驱动与智能控制（含综合实训）		8	100	150	60	300	100	800
LED 工程应用	光电显示技术		5	60	90	40	300	100	600
	检测与传感器应用技术		5	60	90	40	300	100	600
	LED 显示屏应用技术（含综合实训）		8	100	150	60	350	100	1000
LED 灯具设计	LED 照明产品设计		8	100	150	60	300	100	600
	LED 照明产品检测技术		5	60	90	40	300	100	600
	LED 照明设计与工程应用（含光源与灯具测试综合实训）		8	100	150	60	350	100	1000
专业拓展	LED 封装与检测技术		5	60	90	40	300	100	600
	LED 封装模拟制造综合实训		2	20	30	20	100	50	200
	合计		92	1080	1590	700	4200	1450	10000

7.3 完成 5 个子库以及 2 个应用保障体系的建设

资源库整体监测指标

名　称	承担责任单位	监测指标
专业建设库	参与资源建设院校为主，合作企业为辅	1、10 个学校的专业调研报告 2、30 个岗位职业能力分析报告 3、1 个普适的专业人才培养方案 4、4 个不同专业方向的实验室等教学条件配置方案 5、2 个半导体照明产业发展报告

		6、参与资源建设学校所在地产业分析报告 7、10 个校企合作案例
课程学习库	参与课程建设院校为主，合作企业为辅	1、16 门课程教学大纲 2、16 门课程辅教、导学资源 3、16 门课程教学、学习资源 4、16 门课程评价测试题库 5、总资源 1.8 万条，并构建满足课程学习的交流互动平台
行业标准库	以国家 LED 产业联盟为主，企业及院校为辅	行业标准和工作流程。依托资源库建设团队与国家半导体照明工程研发及产业联盟的标准委员会及行业协会合作，通过资源库平台公布推广 LED 产业的 18 项国际标准、70 项国家标准，开发和更新行 36 项业标准、130 项技术标准和技术规范，开发企业急需的行业岗位技术标准，推动产业和职教相互对接、不断走向规范。
产业资讯库	以国家 LED 产业联盟为主，院校和企业为辅	产业资讯和企业文化。定期发布产业发展信息，每年组织 LED 行业企业及院校召开技术论坛，发布产业动态、产业数据，产业数据，企业文化案例。 聘请企业讲师进校园。聘任百名企业家进入学校开设讲座；聘任百名企业能工巧匠进入学校，帮助学校开发课程，承担专业实践课程教学任务。
培训认证库	以国家 LED 产业联盟和行业协会为主，院校和企业为辅	1. 在人社部职业技能资格处指导下，与各地方人社部门及行业企业合作开发半导体照明职业资格，为产业从业人员提供技能人才评定工作。 2. 在科技部相关部门指导下，CSA 牵头联合产业龙头企业、相关院校及科研院所共同制定《半导体照明工程师专业能力规范》（包含初、中、高三级工程师岗位要求及职责），以《规范》为依据进行工程师评定工作。 3. 与北京航天航空大学共同合作半导体照明专业网络学历项目，为高职毕业生及产业从业人员提供专科、本科学历提升服务，构建长期职业发展通路。 4. 与人社部职业技能鉴定中心合作开展 CETTIC LED 系列职业培训。 5. 实现年培训、认证量达到千人以上。
用户导航体系	主持学校和资源库平台支持单位	1、构建院校门户，在用户平台设置院校用户导航系统，具有指导用户使用的功能 2、构建企业门户，在用户平台设置企业用户导航系统，具有指导用户使用的功能 3、构建社会门户，在用户平台设置社会用户导航系统，具有指导用户使用的功能
应用管理体系	以主持学校和参与建设的院校为主，国家	1、成立 LED 专业教学资源库建设领导小组并正常运作

	LED 产业联盟、行业协会和企业为辅	2、制订学生网络学习学分认定办法并具体实施 3、制订资源库建设和应用激励机制并具体实施 4、制订资源库建设管理制度并具体实施 5、制订资源库建设经费使用管理制度并具体实施

7.4 确定课程建设单位，完成校本教材或出版教材的编写

资源库教材编写规划表

教材名称	出版教材或者校本教材
光学技术基础	出版教材或者校本教材
半导体器件基础	出版教材或者校本教材
电路与电工技术	出版教材或者校本教材
电子技术与实践	出版教材或者校本教材
单片机原理与应用	出版教材或者校本教材
LED 照明产品设计	出版教材或者校本教材
LED 照明产品检测技术	出版教材或者校本教材
LED 照明设计与工程应用	出版教材或者校本教材
电路板设计与制作	出版教材或者校本教材
电气控制与 PLC 应用	出版教材或者校本教材
LED 驱动与控制技术	出版教材或者校本教材
光电显示技术	出版教材或者校本教材
检测与传感器应用技术	出版教材或者校本教材
LED 显示屏应用技术	出版教材或者校本教材
LED 封装与检测技术	出版教材或者校本教材
LED 封装模拟制造综合实训	出版教材或者校本教材

7.5 制订资源库在线学习课程建设内容要求及监测指标

资源库网络课程有多种应用模式，可以辅助教学，也可以学生在线自主学习。规划 16 门课程中，有 8 门课程达到在线学习课程的内容要求。在线学习课程的内容规范及监测指标如下：

资源库课程建设内容及监测指标

资源类别	具体内容	监测指标	参考形式
课程大纲			
	课程简介	课程简介含课程目标、课程性质与定位、专业/岗位要求等。	文本或视频（不超过 5 分钟）
	课程整体设计	含课程中所有知识点的设计、学习情境设计、能力训练项目描述、整体考核方式等。	文本

	学习指南	学习指南即课程导学，教师对学生学好本门课程的建议与指导。	文本
	学习内容介绍	具体课程的学习目的、学习任务、学习的结构、模块或单元学习目标等内容。	文本
	考评方式与标准	考评方式与标准是对学习者学习效果的评价，包括考核的形式、内容及所占比重等。	文本或图片
教学团队			
		课程负责人及教学团队的基本信息	文本或图片、视频
学习内容	以下内容为围绕一个项目或者一个知识技能点进行的学习内容的设计，有学习内容和课后评价。		
	关键字	如：LED 灯具	文本
	知识点、技能点	本单元的知识点、技能点介绍	文本或图片
	重难点	重点是教学的核心知识。难点是指学生不易理解的知识，或不易掌握的技能技巧。	文本
	学习前要求	学习该知识点前，学生应该已经学过的知识点或应已掌握的技能描述。	文本、图片、视频
	学后应达到程度要求	学完该知识点后，学生应掌握的知识点和技能点，包括相对职业岗位中对应的技能、素质要求等。	文本、图片、视频
	实践项目或案例	针对知识点中重难点或学生不易掌握部分设计的实践项目或案例。	文本、图片、视频、仿真、动画等
	在线答疑	针对学生学习前预习后提出的问题的回答。	文本、图片、视频
学习评价			
	作业	课后作业或实践项目，要让学生在平台上在线提交	练习题库
	水平测试	针对该知识点的测试题，考核学生是否掌握学习的内容，如分数未达到指定要求，可建议学生重复学习，暂缓学习下一知识点	测试题库

7.6 资源库平台建设应用与服务监测指标

与英特尔（中国）有限公司、领航未来（北京）科技有限公司合作，完善资源库平台建设。

A.平台能够满足的技术要求

（1）不限注册用户数量，至少同时在线用户数 2000 人以上，支持 1000 人同时

在线考试。

（2）在系统性能无法满足并发访问需求时，支持服务器横向扩展。

（3）平台能支持主流浏览器（IE、Chrome、Safari、Firefox）；能够适配主流的移动平台，包括 ios 和 android；提供 API 接口和其他系统进行集成；提供完善的数据备份方案，确保数据安全。

B.平台能够符合的功能要求

(1) 平台使用帮助。提供网站地图、导航菜单、课程资源列表、学习步骤指引等一系列辅助工具帮助初次接触平台的学生能迅速掌握平台的使用方法；提供文字指引和视频教程帮助教师掌握在平台上建设课程、组织教学、管理学生、安排考试和成绩评定的方法。

（2）课程建设与教学组织管理。学生能在线注册，限时报名，能够依据责任教师要求组成教学班；教师可以上传常见格式的教学资源文件：office、flash、pdf、mp3、mp4 等；支持 zip 和 rar 格式文件的上传和服务器端解包；对资源文件进行版权保护管理，如提供 pdf 加密等；提供文本类资源的全文检索功能，允许通过关键字搜索列出所有相关资源；提供各种在线工具帮助教师编排课程内容、创建学习单元、根据学生学习进度按顺序发布学习内容并控制学生学习的节奏；允许按课程表时间进行设置，提供课程的开放和关闭功能；提供分组教学功能，学生可以分组讨论。

（3）交流互动。学生可以在线查看课程开设日程、教师发布的教学任务等；教师可以批量或点对点和学生进行沟通，包括提问、收集答案、讨论等；具备虚拟课堂功能，能够演示文档、音频、视频给学生观看；学生可以在线提问、要求老师提供在线协助、小组内进行讨论等；能够记录教师和学生的所有交流记录

（4）测试考核。允许通过在线编辑或文件导入的方式生成测试题库；提供单选、多选、判断、填空、简答等多种主观与客观题型；提供测试或考核的自动批改功能，并生成相应成绩表，可以导出为 Excel 格式的文件；提供限时测验、即时反馈、试卷分析等，并能根据学生的历史测验记录进行综合统计分析，为学生提供学习建议、资源或课程推荐等

（5）统计管理。教学管理人员可以根据权限跟踪统计教师、学生的教学记录并生成在线报表，可以导出为 Excel 文件；教师可以跟踪课程、资源等的使用情况、评估资源的有效性并持续改进；学生可以查看自己学习情况的横向统计报告，了解自己的学习进度

（6）学分认证。根据教师和教学管理人员设置的元课程信息对学生的学分申请进行认定；平台提供统一的标准数据接口，以便各个学校教务系统与平台实现对接，从而实现对学生成绩、学分等信息的集成。

8．建设步骤

半导体照明技术与应用专业教学资源库建设团队按照项目周期，按计划进行资源库建设。具体建设步骤如下表所示。

	时间范围	建设内容	
自主建设与组织申报阶段	2014.06 | 2015.06	产业调研	调研近十年 LED 产业发展，预测未来产业对专业人才的需求状况，研究形成“半导体照明行业人才市场需求调研报告”。
		组建团队	组织由学校、行业、企业专家组成的资源库建设领导小组，资源库建设委员会，特别是国家 LED 产业联盟的加入。组建 50 名企业兼职教师，帮助开发课程，进入高职院校承担实践课程教学。
		开发方案	在调研的基础上，确定“LED 照明设计”、“LED 智能控制”和“LED 工程应用”为方向的普适的专业人才培养方案。
		机制设计	针对过去资源库应用存在的问题，深入研究用户、建设者、管理者的心态，制订了对用户、建设者人员和管理人员的各项激励措施。
		资源建设	构建数字化校园学习平台，初步建成 7 门课程的教学资源建设，并组织学生开展网络学习。
项目建设及试运行阶段	2015.07 | 2016.07	高端设计	根据学校、企业、社会的需求和教育部资源库建设精神，对资源库整体架构和功能进行完善设计。资源库要能向学校、企业和社会提供 LED 产业的丰富生动全面的教学资源（课程资源、行业规范标准、技术资料等），能提供在线学习功能（能进行网上自主学习、评价、交流互动和管理），还能提供各类资源的检索服务。
		任务细化	根据完善的建设与应用规划，细化建设任务，确定各项子项目的建设内容，与各参与建设单位进行深入交流沟通的基础上，确定各子项目的责任单位和责任人。
		资源建设	各子项目建设单位进行资源建设。完成其余 9 门课程资源建设，按课程资源建设规范，制订课程教学大纲和课程教学整体设计，把企业项目制作成教学案例，整合开发课程程教学资源（电子教案、项目案例、教学录像、试题库、虚拟仿真等）。
		教学改革	信息化的课程教学方法手段的改革与课程资源建设同步进行。制订信息化教学的各项规章制度，促进各参与课程建设的学校，在进行课程资源建设的同时，积极组织本校师生利用资源库的资源，为教师提供“辅助教学”功能，为学生提供“网络自主学习”功能，取得应用经验，发现应用中的不足。

		培训认证	完善产业发展信息，构建网络培训学院，首先开展人社部职业培训证书（CETTIC LED 系列）和人社部半导体照明领域专项能力考核鉴定（职业资格）的认证培训，制订半导体照明技术与应用专业相关的中、高级职业资格评价标准，争取得到劳动部门的认定。
深化建设与构建机制阶段	2016.7 | 2016.12	**完善更新**	在前期课程学习应用的基础上，按照行业企业标准，开发更新课程相关岗位的项目训练学习包，加强课程指导教师对学生学习的指导，增加辅助教学或者可学习的动画、虚拟仿真、微课等动态资源。
		文化育人	定期组织校企对接、校园招聘、教学改革研讨、LED 专项技能竞赛等活动，引入企业元素，培养学生相关 LED 职业能力，以及对该行业职业技能学习的积极性。
		高本互通	全国的 LED 专业的职业教学，在创办初期，中高职和本科之间关系密切，在国家 LED 产业联盟协调下，初步构建了中、高职和本科间的课程体系的规范，但互通立交桥还未建立，探索通过制订一定的管理机制，沟通高职与本科两大资源库的联接，实现资源和学分互认，打通高职本科之间的隔阂。
		平台按需开发	为了实现在线学习的学分认定，对数字化学习校园的功能提出了更高的要求，要求网络平台智能化，对于学习者的学习状况能够感知、分析、记录、管理，同时具体提醒、交流等功能，对于课程管理者要能够对学习者的整个学习状况数据进行分析，判断学习效果，认定学分。
		总结检查	依据资源库任务书和子项目任务书，检查各个项目建设情况、建设质量和经费使用情况检查。总结前期取得的建设成果，思考应用推广措施。
推广应用并持续更新	2017.01 | 2017.12	前期的边建设边应用的资源库建设模式所取得的各种管理机制和应用激励机制，通过各种宣传、论坛、研讨、竞赛等活动，逐渐从资源建设参与单位向全社会推广，特别是通过联盟在行业中影响，辐射至全国各地企业提升社会服务功能，探索可持续发展的运行机制。资源库应用模式能够逐渐在职业院校推广，促进职业教学信息化教学改革的进程。	

进行常规化运行	2018.01 |	资源库进入常规化运行状态，每年将对资源库资源建设、应用或者管理作出重大贡献的给予表彰奖励。

9. 措施保障

9.1 组织保障

成立项目领导小组。成立以牵头院校校长为组长、子项目负责人为成员的项目领导小组，负责项目统筹规划、组织实施、监督协调，审定《半导体照明技术与应用专业资源库建设项目管理办法》、《半导体照明技术与应用专业资源库建设项目资金管理办法》等制度。

成立项目办公室。项目领导小组下设项目建设办公室，设在牵头院校教务处，负责项目建设组织实施、日常管理，检查项目计划、进度、成本等执行情况，组织开展绩效评估和考核，提出评估意见和改进建议，组织项目验收工作。

组建子项目团队。实行目标管理，明确子项目负责人，由其牵头组建各子项目实施团队，负责子项目的建设工作，并对资料的真实性、完整性和知识产权负责。

9.2 机制保障

建设目标责任机制。所有子项目负责人定期对建设过程进行监控管理，并向牵头单位汇报。对未按要求完成建设任务的，及时督促并追究相应责任。

建立目标绩效考核机制。制定量化绩效考核办法，实行目标考核奖励机制。设立项目专项奖励基金，根据评估与考核结果实施奖惩，做到“多劳多得、优质优酬”。

建立质量效果评审机制。制定资源评审标准和资源遴选流程，对资源质量进行评价。根据试运行效果对资源库的评审与鉴定。

建立资源内容更新机制。根据产业发展和技术进步对资源库的内容进行更新。研发形式多样的优质资源，更好地满足教学、人才培养和技术应用的需要。

知识产权保护。建设成果归国家所有，参与单位和个人享有署名权；根据《知识产权法》维护著作权人合法权益，违法单位和个人独自承担相应的法律责任。在资源开发过程中，坚持“实名制”和原创性，做到产权清晰，确保资源无知识产权争议。

9.3 经费保障

资金预算与管理。项目资金包括国家奖励、地方政府资金、参与院校自筹三个部分。项目资金使用按照项目资金管理办法，严格执行预算管理，实行专项管理、专款专用，确保建设资金合理合法合规使用。参建单位应及时将财务决算上报主持院校并接受监督。

项目监控和审计。以建设方案为依据，成立专门的监控小组与审计小组对每个项目进行全过程全方位绩效审计。

10.预期效果与应用推广目标

10.1 预期效果

10.1.1 校协企深度融合，建成具有国家水准的动态资源库

本资源库建设首先由拥有占全国 LED 产值的 70%的企业成员的产业联盟提出，各职业院校积极响应，形成了良好的校企合作共建资源库的建设应用环境，专业教学资源库建成后，将会成为全国职业院校 LED 相关专业师生和企业员工的集教学、培训、进修、信息交流等功能的资源平台，注册用户数达到 5000 人以上，活跃用户数达到 2000 人以上，满足学校、社会等多层次人群的多样化学习需求，将成为每年更新量不少于 10%的活跃度高，系统运行稳定、技术先进的专业教学动态资源库。

10.1.2 引领 LED 专业改革，规范并提升专业人才质量

逐渐改变各职业院校 LED 专业培养计划不规范、培养目标单一、专业教师欠缺、产业信息不畅等问题，以专业教学资源去规范各学校的专业人才培养方案，拓展专业培养方向以适应企业发展对人才的需要，加强各学校的之间的专业建设和信息的交流，培养专业教师，整体提高半导体照明技术与应用职业教育水平，提升人才培养质量，全面促进高等职业教育教学水平的提高。

10.1.3 形成了一套保障资源库可持续运行的激励机制体制

资源库能保证正常持续运行，使资源建设者能持续地应用并更新资源库的资源，使社会上有能力有水平的专家加入资源库建设和应用的行列、使学习者有持续学习的动机，必须有一整套激励机制去配套管理。资源库建设期内，逐渐探索构建系列的措施和出台系列的激励政策，形成了一套保障资源库可持续运行的激励机制体制。

10.1.4 组织各种交流及竞赛活动，形成系列的企业指导教学、学校服务企业成果。

通过教学资源库项目建设，已经把行业、企业、学校紧密地联系起来了，通过一系列的合作交流，形成一系列的企业指导人才培养、学校服务企业开展培训技术研发等成果案例。

10.2 应用推广目标

应用推广分二步走。项目建设前期（2015 年 7 月-2016 年 12 月），主要还是完善资源，同时在参与建设的 37 家学校和企业范围内全面应用资源库。探索建立推广应用的机制体系；项目建设后期（2015 年 7 月-2016 年 12 月），逐渐向全社会推广，并每年以 20%的速度逐年扩大应用范围。同时把 LED 专业资源库建设的成果向应用电子技术等电子信息类专业推广，指导专业升级改造。具体措施如下：

10.2.1 组建资源库建设共享联盟

组建由高职院校、行业企业参与的半导体照明技术与应用专业教学资源库建设联盟，建立定期会议讨论制度，加强各资源库建设单位之间的交流沟通，构建资源库正常运行机制。

10.2.2 通过国家联盟推进共享资源进程

充分利用联盟的成员企业成员众多的特点，把 LED 成员企业作为推广应用的重点工作之一，针对 LED 企业员工总体学历层次偏低、经过系列学习和培训比例低等特点，组织企业员工通过网络在线进修提高，鼓励企业制订激励员工学习专业技术、考取专业技术证书的机制体制，促进资源库的应用。

10.2.3 把 LED 专业教学资源库逐渐与 LED 网络培训学院等实现对接

加强与行业协会、LED 产学研合作联盟平台合作，逐渐打通中职、高职和本科人才培养体系之间的衔接，实现资源互通共享。

10.2.4 组织各种活动和竞赛，推广社会影响

组织半导体照明技术与应用专业教师参加利用网络课程资源，开展微课等信息化教学比赛，组织教学改革论文研讨会；组织高职学生参加半导体照明技术与应用专业相关技能比赛，由 LED 产品生产企业和虚拟仿真企业共同发起，通过教学资源库平台发布专项职业技能比赛，激发资源应用的积极性。

11.验收要点

11.1 资源建设与集成

11.1.1 专业资源基础建设

完成专业人才需求调研报告、职业岗位能力分析、专业人才培养方案，构建普适性并兼顾区域性的专业课程体系；从专业建设和发展角度规划专业实践及师资条件配置，明确专业办学条件配置，提供实验实训条件及场景建设要求。

11.1.2 课程资源与应用

课程资源建设与课程资源应用同步进行。完成16门课程（加3门综合实训项目模块）的教学资源，每门课程包括课程团队、课程学习引导、课程教学大纲、课程教学或者学习资源（含课件、文本、图片、微课、录像、动画等资源形式）、学习评价、题库等；课程建设负责院校在课程建设同时承担课程在线指导与应用职责，课程资源应用以注册学生数、活跃学生用户数、在线学习用户类型分布情况及资源更新量等指标进行监测，具体监测要求按照教育部规定指标执行，所负责课程需接受对课程应用的绩效考核。

11.1.3 企业资源与服务

行业标准和工作流程。在平台上及时反映LED产业可以公布的国际标准、国家标准、行业标准以及企业的岗位技术标准。资源库建设团队与国家产业联盟的标准委员会合作，开发企业急需的行业岗位技术标准。

产业资讯和企业文化。以资源库建设为契机，依托国家产业联盟、行业协会等行业企业，定期发布产业发展信息，每年组织LED行业企业及院校召开技术论坛，发布产业动态、产业数据，产业数据，企业文化案例。

聘请企业讲师进校园。聘任百名企业家进入学校开设讲座；聘任百名企业能工巧匠进入学校，帮助学校开发课程，承担专业实践课程教学任务。

职业资格标准制定和鉴定培训。在网络平台构建网络培训学院，制订行业职业技术标准，开展人社部职业培训证书（CETTIC LED系列）和人社部半导体照明领域专项能力考核鉴定（职业资格）培训和鉴定工作。与国内名牌大学合作，采用网络课程学分互认等形式，开展网络学历认证，逐渐打通LED专业专科与本科学历之间的立交桥。在高职毕业工作三年及企业员工中，进行半导体照明工程师的认证（CSA），为职业院校学生构建长期职业发展通路。实现年培训量达到千人以上。

11.2 平台应用与服务

11.2.1 高度可用的软硬件平台

平台支持大量用户并发访问；支持包括PC（mac）、移动设备（Android、IOS）在内的主流客户端；支持在性能无法满足并发访问需求时以横向扩展的方式提高平台的整体负载能力，从而满足不断增长的资源库在线学习需求；

11.2.2 完善的平台使用帮助

平台学习使用门槛低：提供网站地图、导航菜单、课程资源列表、学习步骤指引等一系列辅助工具帮助初次接触平台的学生能迅速掌握平台的使用方法；提

供文字指引和视频教程帮助教师掌握在平台上建设课程、组织教学、管理学生、安排考试和成绩评定的方法。

11.2.3 资源建设与运用一体化

平台支持所有主流的数字化教学资源的上传、编排、存储和版权保护；支持教学组织者和学习者对资源内容按关键字进行检索和关联应用；支持教师以课程为单位组织在线教学，包括学生注册报名、组班、发布学习内容、控制学习进度、安排学习效果监测、安排学生分组讨论、进行在线提问答疑、跟踪监测学生学习状况并进行分析统计反馈和教学资源的个性化推荐、组织考试并进行成绩评定和跨学校的学分互认。

12. 经费预算与管理

_____（项目编号）经费预算与管理一览表

项目名称：　　预算编制人（签字）：　　项目负责人（签字）：　　单位负责人（签字并盖章）：

序号	资金用途	项目建设资金总数	资金来源（单位：万元）													
			申请中央专项资金				项目筹措资金									
			合计	占项目建设资金的比例（%）	其中		合计	占项目建设资金的比例（%）	其中							
					2015年度	2016年度			举办方或地方财政投入资金		行业企业支持资金		相关院校自筹资金			
									2016年度	2017年度	2016年度	2017年度	2016年度	2017年度		
	合计															
1	素材制作															
	其中：1.1															
	1.2															
	……															
2	企业案例收集制作															
	其中：2.1															
	2.2															
	……															
3	课程开发															
	其中：3.1															
	3.2															

	……													
4	特殊工具软件制作													
	其中：4.1													
	4.2													
	……													
5	应用推广													
	其中：5.1													
	5.2													
	……													
6	调研论证													
	其中：6.1													
	6.1													
	……													
7	专家咨询													
	其中：7.1													
	7.2													
	……													
8	其他		——	——										
	其中：8.1 平台维护		——											
	8.2 资源导入		——											
	……		——											
附注（项目筹措资金承诺书或佐证资料）														
1														
2														

<table>
<tr><td>3</td><td colspan="6"></td></tr>
<tr><td>4</td><td colspan="6"></td></tr>
<tr><td rowspan="4">5</td><td colspan="3">主持单位银行账户信息</td><td colspan="3">财务部门负责人信息</td></tr>
<tr><td>银行开户单位名称</td><td colspan="2"></td><td>姓名</td><td></td><td>QQ 号码</td></tr>
<tr><td>开户银行</td><td colspan="2"></td><td>电子邮箱</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>银行账号</td><td colspan="2"></td><td>手机号码</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

说明：1. 项目主持单位须会同联合建设单位，根据教育部确定支持的中央专项资金预算（附件 4）和申报时项目主持单位承诺的“项目筹措资金”，依任务详细填列；

2. 根据项目实际，设置明细开支项目，表内数字一律保留两位小数；

3. 附注 1 载明项目筹措资金取得的依据（佐证资料按序附在《任务书》所有内容之后），若以非货币形式对项目进行投入的情况，必须予以说明；

4. 附注 2 载明取得固定资产的品名、型号、单价、数量、采购方式等；

5. 附注 3 载明进一步能够说明本预算的其他事项，如：拨付给联合建设单位的资金预算安排情况以及后续管理措施等；

6. 附注 4 载明修改完善后的《职业教育××专业教学资源库建设项目专项资金管理办法》（简称《资金管理办法》）；

7.《资金管理办法》一般包括总则、管理机构及其职责、预算管理、专账管理、支出管理、拨付给合建单位的资金管理、决算管理、资产管理、内部控制、绩效评价、附则等内容，体系自定，并按有关程序报批印发；

8. 按要求填写附注 5 的所有项目，不得缺项。

13. 其他说明

13.1 项目建设对策措施

13.1.1 创建信息化教学体制机制

制订实施资源共建实施与管理办法、资源共享实施与管理办法，通过政府承诺，院校与行业、院校与平台企业、院校与合作企业、校际签订共建共享协议，建立政府支持，行业指导、校企合作、校际合作共建共享的信息化教学体系建设体制，形成利益相关各方优势互补，权责利明晰，资源共享，共同发展的项目管理体制和有序运行机制。项目团队要有职业教育专家领军，行业专家指导，遴选企业、院校骨干教师参加建设工作；项目要由全国示范性院校牵头，全国优质专业参与，形成校企融合、优势互补、分工明确、协作有序、执行有力，且能够代表专业领域全国一流水平。

13.1.2 深化人才培养体系的改革

制订实施信息化教学改革行动计划，在行业指导下，开展职业调研，明确行业发展现状和趋势，企业人才需求类型层次，职业岗位工作项目任务和知识、能力、素养要求；校企合作、校际合作修订人才培养方案，明确能力本位培养目标、规格要求和质量标准，围绕能力本位培养目标，建立职业实践活动为主线，基于工作过程的项目化课程体系，试点开发结构化课程，建设碎片化资源体系和应用平台，推进教师转变教学方式和学生转变学习方式，为大规模开发教学资源库积累经验，探索操作模式，为教学资源库建设和有效应用奠定坚实的基础。

13.1.3 建设与应用同步组织实施

基于资源共建实施与管理办法、资源共享实施与管理办法，采取边建设边推送边应用的策略，尽量缩短建设与使用周期，提升项目建设和使用效率；利用教育部职业教育师资培训基地，面向全国半导体照明技术与应用专业教师，开展信息化教学能力培训，提高资源库使用推广力度。

13.1.4 合理分配与使用项目资金

制订实施《半导体照明技术与应用专业资源库项目资金分配与使用办法》，形成项目建设经费合理分摊和绩效管理机制。不断完善项目资金使用与管理制度，按照目标相关性、政策相符性、经济合理性要求，科学编制并及时调整优化预算编制；按照规范有效、监督公开透明的要求，完善项目经费管理机制，确保经费投入和使用保障项目建设顺利进行和高质量完成。

14. 立项建设单位承诺

（含不用于商业目的的承诺）

宁波职业技术学院和中山火炬职业技术学院作为半导体照明技术与应用专业教学资源库申报的牵头院校，将严格按照项目申报通知和申报指南的内容和要求，会同行业、联合申报院校以及企业，保质保量完成资源库的建设任务，形成我国高等职业教育半导体照明技术与应用专业改革特色和示范引领的教学资源库。我们郑重承诺：1.按照建设目标，严格执行建设规划及建设计划安排的时间进度；2.按照建设内容，整合专业课程优势资源及各类社会资源，推进专业教学资 源高质量地建设与集成；按照“共建共享、边建边用、反馈促建”的原则，实现 教学资源库的应用推广和持续更新；3.按照项目与建设要求，保证建设经费专款专用，确保项目建设顺利实施。4.本项目所形成的所有成果，不用于商业用途。

宁波职业技术学院（签章）

日期：2015年 4月 16日

中山火炬职业技术学院（签章）

日期：2015年 4月 8日

项目主持单位（盖章）

主持单位法人代表（签名）

年 月 日

资源库验收通过文件链接网址：
https://www.tech.net.cn/web/articleview.aspx?id=20180712092742554&cata_id=N003

网页信息保存（见附件表格标红行）：

关于公布职业教育专业教学资源库2018年验收结果的通知

教职成司函〔2018〕91号

发布时间：2018-07-12　信息来源：教育部网站

有关省、自治区、直辖市教育厅（教委），新疆生产建设兵团教育局，职业院校：

按照《关于做好职业教育专业教学资源库2017年度相关工作的通知》（教职成厅函〔2017〕23号，简称《通知》）要求，今年应对2015年度立项建设的“新能源类”等22个资源库、2017年度延期验收的“园艺技术”等2个资源库、2017年度验收暂缓通过的“数控技术”等2个资源库升级改进奖励项目和2016年度支持的“会计”等4个资源库升级改进奖励项目，共30个项目进行验收。

根据《通知》规定，经主持单位申请、我部审核，同意“刑事执行”“民族文化传承与创新子库珠算传承与创新”“民族文化传承与创新子库针灸推拿传承与创新”3个资源库、“会计”“酒店管理”2个资源库升级改进奖励项目延期验收。专家组按照规定程序在线审阅验收材料、登录试用，听取陈述答辩，参考运行监测数据，重点评议了资源库的任务完成度，预算执行、管理与绩效，资源开发与建设，以及资源库的应用与推广、特色与创新、管理与共享、教学实践应用、社会服务、资源更新应用长效机制等情况，并出具了意见建议。根据专家组意见，经研究确定，“新能源类”等24个资源库通过验收、“民族文化传承与创新子库烹饪工艺与营养传承与创新”资源库暂缓通过验收。验收结论详见附件。

验收通过的资源库，要根据专家意见进一步提升建设和应用水平。立足“能学、辅教”的功能定位，持续推进专业教学改革；遵循“一体化设计、结构化课程、颗粒化资源”的建构逻辑，持续提升资源库建设水平；强化“使用便捷、应用有效、共建共享”的应用要求，持续完善运行平台功能、提高教与学的效果；健全以用促建、共建共享的长效机制，确保每年新增和更新资源比例不低于验收时总量的10%，每年新增用户数量不低于验收时总量的10%，并保持用户活跃程度。我司将继续加强对已验收资源库的运行监测，不定期公布建设与应用情况报告；对已验收的资源库中资源更新不力或应用情况较差的提出警告，经警告仍无有效改进的，终止后续建设、取消国家级资源库资格，相关建设单位列入教育行为负面清单。

延期验收和验收暂缓通过的资源库须按照《教育部办公厅关于做好职业教育专业教学资源库2018年度相关工作的通知》（教职成厅函〔2018〕14号）要求组织整改，与下一批次应验收资源库一并接受验收。

联系地址：北京西单大木仓胡同37号（邮编：100816）

教育部职业教育与成人教育司高职发展处

联系电话/传真：010-66096232

联系人：孙辉　　任占营

电子邮箱：sfgz@moe.edu.cn

附件：验收结论

教育部职业教育与成人教育司

2018年7月5日

附件

验收结论

资源库编号	资源库名称	主持单位	验收结论
2015-1	新能源类	天津轻工职业技术学院 佛山职业技术学院 酒泉职业技术学院	通过
2015-2	通信技术	深圳职业技术学院 南京信息职业技术学院 石家庄邮电职业技术学院	通过
2015-3	半导体照明技术与应用	宁波职业技术学院 中山火炬职业技术学院	通过
2015-4	刑事执行	浙江警官职业学院	延期验收
2015-5	林业技术	辽宁林业职业技术学院	通过
2015-6	老年服务与管理	北京社会管理职业学院 北京劳动保障职业学院 中国成人教育协会老年教育与服务专业委员会	通过
2015-7	航海技术	浙江交通职业技术学院 江苏海事职业技术学院	通过
2015-8	民族文化传承与创新子库——珠算传承与创新	山西省财政税务专科学校	延期验收
2015-9	包装技术与设计	天津市职业大学	通过
2015-10	民族文化传承与创新子库——烹饪工艺与营养传承与创新	浙江商业职业技术学院	暂缓通过
2015-11	汽车技术服务与营销	湖南汽车工程职业学院 四川交通职业技术学院	通过
2015-12	特殊教育	襄阳职业技术学院	通过

2015-13	服装设计	杭州职业技术学院 山东科技职业学院 全国纺织服装职业教育教学指导委员会	通过
2015-14	计算机应用技术	北京信息职业技术学院	通过
2015-15	材料成型与控制技术	陕西工业职业技术学院	通过
2015-16	焊接技术及自动化	哈尔滨职业技术学院 常州工程职业技术学院 四川工程职业技术学院	通过
2015-17	高分子材料加工技术	广东轻工职业技术学院	通过
2015-18	民族文化传承与创新子库——针灸推拿传承与创新	湖南中医药高等专科学校	延期验收
2015-19	种子生产与经营	河南农业职业学院	通过
2015-20	法律文秘	北京政法职业学院 全国司法职业教育教学指导委员会	通过
2015-21	光机电应用技术	浙江工贸职业技术学院	通过
2015-22	现代纺织技术	江苏工程职业技术学院	通过
2014-1	园艺技术	辽宁农业职业技术学院 江苏农林职业技术学院	通过
2014-9	鞋类设计与工艺	温州职业技术学院 全国纺织服装职业教育教学指导委员会鞋服饰品专业指导委员会	通过
2010-01	数控技术	无锡职业技术学院	通过
2010-05	建筑工程技术	四川建筑职业技术学院	通过

2010-08	会计	山西省财政税务专科学校 山东商业职业技术学院	延期 验收
2012-2-8	酒店管理	天津市职业大学	延期 验收
2011-1-4	软件技术	常州信息职业技术学院	通过
2012-2-6	金融	浙江金融职业学院	通过



3D打印材料及典型案例分析

主编　吴姚莎　陈慧挺

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

目　录

第一章 3D 打印概述.....5
1.1 3D 打印技术简介.....5
1.2　3D 打印技术分类.....5
1.3 3D 打印的原理.....8
1.3.1　熔融沉积成型原理.....8
1.3.2　选择性激光烧结原理.....9
1.3.3　光固化成型原理.....10
1.3.4 分层实体制造增材制造技术.....11
1.5　3D 打印技术优势.....12
1.6　3D 打印的应用.....12
1.7 国内外 3D 打印技术现状.....15
1.8　3D 打印材料要求及分类.....16
1.8.1 金属材料.....17
第二章 3D 打印金属材料.....22
2.1 粉末床熔融金属 3D 打印工艺.....22
2.2 直接能量沉积工艺.....23
2.3 其他金属 3D 打印工艺.....24
2.4 金属粉末的制备.....25
2.5 一种金属粉末生产的代替方法.....27
2.6 金属 3D 打印的未来.....35
第三章 3D 打印高分子材料.....39

3.1 高分子材料的优势 39
3.2 高分子材料的特性 40
3.3 聚乳酸材料 41
3.4 ABS 丝材.....43
3.5 聚苯砜丝材 44
3.6 聚碳酸酯丝材 44
第四章 3D 打印光敏树脂材料 54
4.1 光固化 3D 打印技术简介尬 54
4.1.1 喷射型光固化 3D 打印 54
4.1.2 激光固化快速成形 3D 打印 55
4.1.3 连续液体界面制造 3D 打印 56
4.2 光敏树脂的组成 57
4.2.1 预聚物 58
4.2.2 活性稀释剂 60
4.2.3 光引发剂 62
4.2.4 其它助剂 66
第五章 3D 打印无机非金属材料 69
5.1 陶瓷 3D 打印材料.....69
第六章 3D 打印生物材料.....77
6.1 医用金属材料 80
6.2 医用无机非金属材料 82
6.3 医用高分子材料 84

6.5 细胞参与的生物 3D 打印材料 87
第七章 新型 3D 打印材料.....92
7.1 金属 3D 打印典型应用 92
7.1.1 航空航天应用 93
7.1.2 汽车行业应用 94
7.2 光敏树脂 3D 打印典型应用 96
7.2.1 工业应用 97
7.2.2 建筑行业应用 98
7.2.3 教育行业应用 99

第一章 3D 打印概述

1.1 3D 打印技术简介

3d 打印也称增材制造（additive manufacturing, AM），是一种以数字模型文件为基础，运用粉末状金属或塑料等可粘合材料，通过逐层打印的方式来构造物体的技术。3d 打印机则出现在上世纪 90 年代中期，即一种利用光固化和纸层叠等技术的快速成型装置。它与普通打印机工作原理基本相同，打印机内装有液体或粉末等“印材料”，与电脑连接后，通过电脑控制把“打印材料”一层层叠加起来，最终把计算机上的蓝图变成实物。其技术的出现，被认为是“一项将要改变世界的技术”，引起全世界的关注。随着科技的不断进步，新材料的不断研制成功，3D 打印应用领域不断展开，使得其不再局限于制造领域，引领了社会变革的潮流。

1.2 3D 打印技术分类

3D 打印技术有着巨大的市场应用前景，近年来在世界范围内逐渐成为研究热点，在许多国家的工业制造中得到了广泛的应用，催生出一个全新的技术领域。作为一种快捷简便的成型技术，在产品原型设计、模具的制造和艺术创作生产、珠宝精细制作等领域都有涉及，3D 打印在这些领域的发展用于替代一些传统的复杂精加工工艺。此外，近年来 3D 打印技术备受关注，飞速发展，逐渐适用于航空航天、医学、工业、电子加工等领域。为新时代创新发展开拓了广阔的空间。

当前该技术的研究集中在打印成本的降低，打印精度的提高，打印出产品的强度、刚度的增强，打印时间的缩短四个方面。

目前的 3D 打印技术主要可以分为以下几种类别：熔融沉积快速成型（Fused Deposition Modeling），简称为 FDM、选区激光烧结（Selective Laser Sintering），简称为 SLS、立体光刻/光固化快速成型（Stereo Lithography Apparatus），简称 SLA、三维粉末粘接（Three Dimensional Printing and Gluing），简称为 3DPG、激光选区熔融成型（Selective Laser Melting,）简称为 SLM、分层实体制造（Laminated Object Manufacturing）简称 LOM、电子束选区熔化（Electron Beam Melting），简称为 EBM、电子束熔丝沉积成形（Electron Beam Freeform Fabrication）简称为 EBF、金属激光熔融沉积（Laser Direct Melting Deposition）简称为 LDMD。

1) 熔融沉积快速成型（FDM）是将预先制备好的丝状的热塑性高分子材料在一定温度下熔融，施加压力使其通过具有一定口径的喷头挤压出来层层堆积并冷却固化。所采用的热塑性高分子材料包括丙烯腈-丁二烯-苯乙烯（ABS）、聚碳酸酯（PC）、聚砜（PSF），聚乳酸（PLA）等。成型时，首先在喷头中加热使丝状高分子材料熔融具有流动性，再加压使其从喷嘴挤出，随着打印机控制喷头的矢量移动，熔融的高分子在基座上逐渐涂覆堆积，并在空气中冷却进而达到快速固化的目的。经过多次循环，反复打印得到三维产品。FDM 的整个系统构造原理简单和操作摆脱繁琐复杂的工艺，设备维护成本较低，系统安全系数高。 所采用的打印材料通常是绿色环保的高分子

聚合物，可在多种环境中安装使用，成型工艺简洁干净，操作方便不产生费料。

2) 光固化快速成型（SLA）方法[24]是目前 3D 打印快速成型技术中最引人瞩目的一种方法，关于 SLA 的研究较为系统细致，技术最为成熟。SLA 技术具有成型速度快、原型精度高等优势而且非常适合制作精度要求较高，结构复杂的模型的制造。SLA 所采用的打印原料一般为液态的光敏树脂，成型原理是通过一定波长的光源辐照，引发打印原料中的化学交联反应进而使其快速凝固，逐层堆叠得到最终的的固化打印件。其中打印原料的性能，打印件固化程度的好坏对成型零件的力学强度，稳定性具有直接影响，一定程度上制约着 SLA 技术的发展前景。

3) 分层实体制造技术（LOM）的原料是通常是片状或薄膜材料，例如常见的纤维素纸、金属箔（铜箔、铝箔等）、高分子膜等。成型时，首先用热熔胶涂敷在原材料表面，根据所需模型的每个截面进行切割并层层粘接，进而实现打印件的立体成型。该方法具有成型速度快，适合大尺寸零件的成型的优点，缺点在于原材料浪费较为严重，打印件的表面质量较差。

4) 电子束选区熔化（EBM）与以上几种打印技术的最大不同在于成型过程处于真空环境下，并以金属粉末为材料源，采用电子束为能量源，将金属粉末在粉末床上不断地均匀铺展的同时用高能电子束扫描加热使其熔融，熔融的金属液体相互汇聚凝固，反复重复这一过程实现完整金属部件的打印。这是目前少数可用于金属零件成型加工

的 3D 打印技术，并且制备出的金属零件结构精细、综合性能良好，然而组成打印设备的粉末床和真空腔室的尺寸限制着金属打印件的尺寸。

5) 激光选区熔化成形技术（SLM）[27]的成型原理与电子束选区熔化成形技术类似，同样是基于金属粉末在粉末床上铺展和熔融，不同之处在于采用激光束代替了电子束，由于激光高精度高能量的特性，通过这种打印技术同可以打印出结构更为复杂、性能更为优异、表面形貌良好的金属零件，但目前这种技术的缺点是无法成形出大尺寸的零件。

6) 金属激光熔融沉积成形技术（LDMD）与 SLM 技术类似，采用高能激光束为热源，采用自动送粉设备将金属粉末准确地输送到激光在成形表面上所形成的熔池中。随着激光束的矢量移动，实现粉末的不间断熔融和固化，进而得到打印的金属模型。相比于 EBM 和 SLM，LDMD 的优势在于可以制备大尺寸的金属部件，但缺点在于成型精度较差，无法制备具有复杂结构的零件。

7) 电子束熔丝沉积成形技术（EBF）是采用电子束为加热源热源为电子束，预制的金属丝为原材料，为了避免金属的氧化，同样需要在真空环境下操作。成型时，通过送丝装置将金属丝按照一定轨迹送入熔池，熔融后固化。该方法成型效率高，成型后的零件内部质量好，但精度较差，对原材料的塑性要求较高。

1.3 3D 打印的原理

1.3.1 熔融沉积成型原理

熔融沉积成型是发展最早，应用最广，技术最为成熟的 3D 打印技术，优点在于打印系统构造简单、操作简便、成本低廉、适用于多种材料的打印、原材料利用率较高。熔融沉积成型的工作原理如图 1-1 所示。送丝系统将打印丝材送入打印喷头内加热熔融，通过加压使熔融的材料通过一定直径的喷头挤压出来，随着计算机程序控制喷头在三维方向上进行矢量运动，挤出的物料在工作台上进行选择性沉积，物料经过空气快速冷却固化，逐层粘接形成立体三维结构。

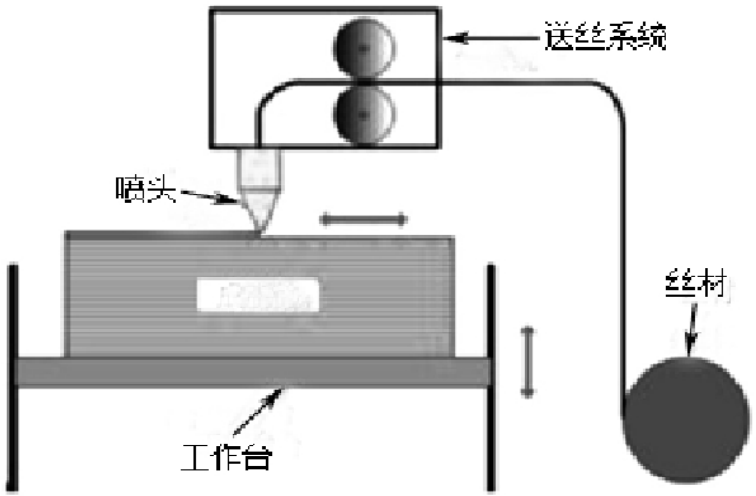


图 1-1　熔融沉积成型原理

1.3.2　选择性激光烧结原理

SLS 技术的原理为分层叠加，在计算机程序的调控下，利用高能激光将金属粉末材料熔融烧结、实现逐层堆积成形。该技术的原理如图 1-2 所示。首先，采用计算机软件绘制要打印的样品的三维实体模型，导出文件。打印时对粉料预热，当原材料的温度达到设定值后，通过粉缸的上升将带动粉末原料均匀铺展在工作台上，操作计算机软件控制设定功率的激光束使其按照一定的速度和轨迹运动对粉末截面进行层层扫描。在高能激光的扫描下，粉末原料熔融后烧结，

尚未接触激光的粉末作为与下一层粉末的支承层。待各个层次的粉末都烧结以后，工作台将根据粉末层的厚度依次下降，实现逐层烧结，整个过程不断地循环，直到获得最终的打印部件即可。

相比其他传统的成型技术，SLS 将金属部件的加工从刀具、压具、模具等器材中解放出来，并可以轻松实现具有复杂内部结构零件的快速成型，制造难度和成型周期远远小于传统工艺。此外，可用于 SLS 技术的原材料范围广泛，只要是经过高温可以熔融粘结的粉体材料均可用于 SLS 成型。并且 SLS 工艺简单、材料高效率利用。

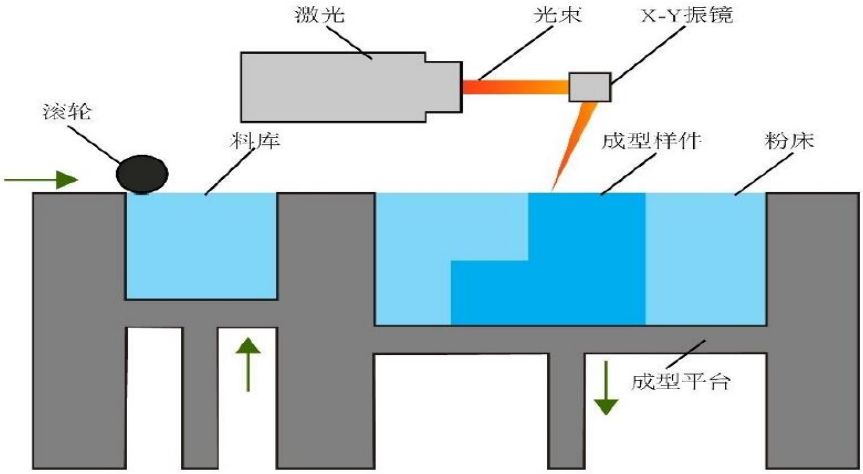


图 1-2　激光烧结原理

1.3.3　光固化成型原理

光固化 3D 打印技术是通过向原料中引入光引发剂，在材料打印的过程中通过紫外光等特定波长的光照使材料迅速固化成型，具有成型速度快、精度高，非常适合制作精度要求高，结构复杂的原型的优势。而且就发展来看，光固化成型技术相对成熟，应用广泛，无疑是最具发展潜力的一种 3D 打印技术。但目前的光固化 3D 打印也存在一些缺点，例如打印产物韧性较差，可打印的树脂种类较少。图

1-3 为光固化 3D 打印成型的原理图。用特定波长的紫外光辐照液态光敏树脂，激发引发剂发生自由基反应进而交联固化，层层堆叠得到三维实体。

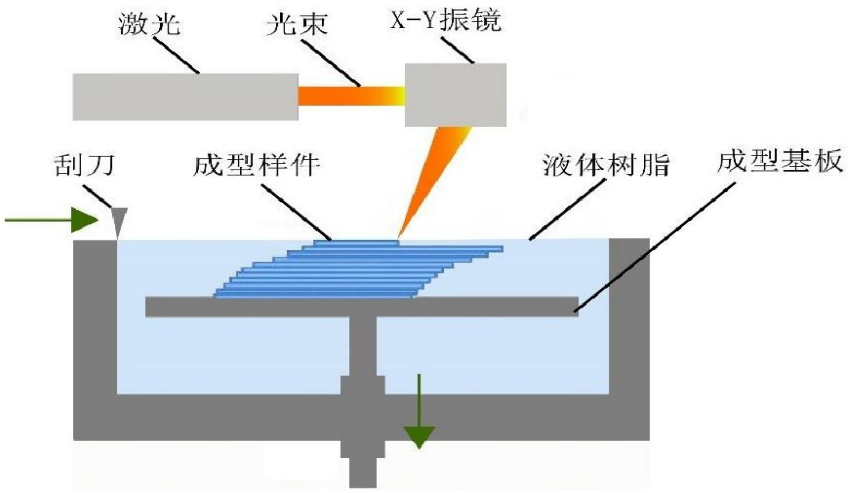


图 1-3 光固化成型原理

1.3.4 分层实体制造增材制造技术

分层实体制造增材制造技术（LOM , Laminated Object Manufacturing）自 199 年被提出以来已经得到了快速的发展。其基本工作原理是将纸板、薄膜等耗材通过热熔胶黏在一起，通过计算机采集的三维模型的切片信息控制激光切割系统将工作台上的耗材进行三维模型轮廓的切割，并将非轮廓区域切成微小的网格以方便后续废料的处理，在一层轮廓切割完成之后继续粘结新的耗材进行三维模型轮廓的切割，重复上述过程直至制件加工完成。LOM 技术相比于其它增材制造技术具有加工制件翘曲变形小、尺寸精度高等优点。图 1-4 为分层实体制造技术加工原理图。

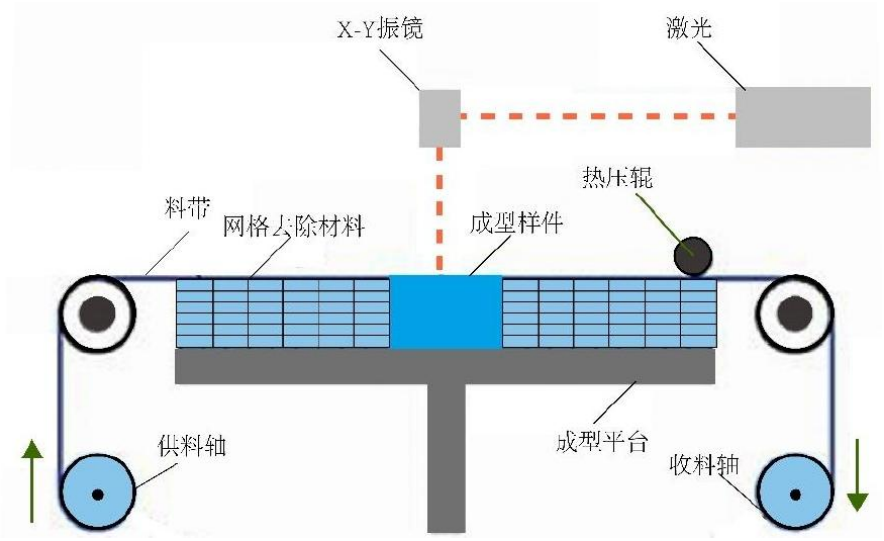


图 1-4 LOM 增材制造技术加工原理图

1.5 3D 打印技术优势

3D 打印技术相比于传统的减材和等材制造具有如下的技术优势：

1. 成型速度快，制造周期短。增材制造技术不需要机床模具，而是借助于计算机辅助设计技术快速对零部件进行建模，该技术尤其是在新产品开发方面比传统的制造工艺方法快十几倍。

2. 可加工复杂度更高的零部件，不受设备的限制。该技术是将复杂的 3D 实体模型转换为 2D 截面，进而通过设备进行打印制造，这对于制造内腔复杂，或者多孔结构的零部件尤其适合。

3. 操作简单、工作环境更为舒适安全。

4. 材料利用率高，可备选材料多，更能满足对不同材料零部件的需求。3D 打印材料一般为热塑性材料如塑料、蜡、金属粉末、陶瓷粉末等。

1.6 3D 打印的应用

由于 3D 打印成本低廉，设计简便，原料利用率高等明显的优点，经问世以来，逐渐应用于多个传统制造领域。常见的塑料，金属，陶瓷等材料均可以实现 3D 打印成型。尤其是对于具有复杂精细结构，采用传统制造技术很难或不可能实现制造的零件，应用 3D 打印可以提升制造效率，降低其制备成本。甚至在高端领域如航空航天，都已经实现用 3D 打印制备一些金属零部件，包括航空镁钛合金和其他一些高温合金等，证明了 3D 打印技术的可靠性。然而这些应用的成本较高，目前难以在民用领域推广。相对于打印难度较大的金属材料，热塑性的聚合物材料更易于加工，因此目前使用最多的 3D 打印材料均为 PLA，ABS 等热塑性高分子。 近 20 年来，3D 打印技术飞速发展，逐渐应用于产品原型设计、模具制造，医疗器械、珠宝制作等传统制造业领域，逐渐替代了传统加工工艺。在各行各业上在不断取得进步，如图 1-5 所示，从市场份额分布百分比来看，在汽车及零配件领域 3D 打印技术的应用占 35%，在消费品电子领域到达 20.2%，在航空航天占 15.7%，在机器商业领域占 9.2%，在医疗牙科领域占 9.8%，在科研技术领域占 7.6%。

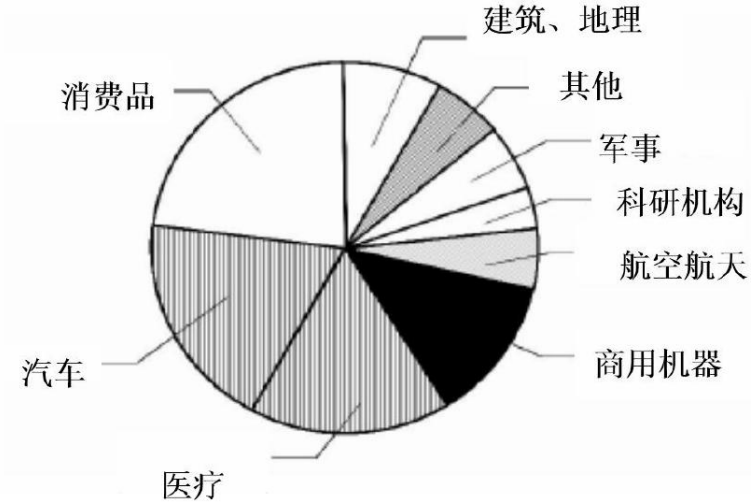


图 1-5 3D 打印在各领域发展状况

在医学领域，3D 打印可以替代传统的技术实现骨骼，牙齿，心脏支架等的快速精确成型。陈鹏等利用三维可视颌骨数字化重建及 3D 打印技术制作各种骨骼模型，制备出的上下颌骨缺损修复体模型机，通过体外重建颌骨缺损的模型来模拟外科操作手术，可以深入对颌骨等病变治疗原则的理解。SH Won 等采用 3D 打印技术实施了置换手术，这种髋关节置换手术更加精准，手术时间大大缩短。S Bose 等采用 3D 打印技术，研究了磷酸三钙对骨缺陷方面的修复应用。此外，3D 打印也可以用于前沿的分子生物学研究，例如蛋白质结构的解析，人体内的蛋白质种类繁多，结构极其复杂，目前科学家可以采用冷冻电镜等方法解析出蛋白质分子三维立体结构，再借助于 3D 打印，可直接制备出蛋白质立体模型，更直观的展现蛋白质结构，为蛋白质的结构认知提供了新的途径。

在航空航天领域，3D 打印技术已经成为一种关键技术，可以极大地提高飞行器设计和制造效率。目前，3D 打印技术已经用于导弹、飞行器、航天器、卫星的零部件制造。例如，欧洲空中客车公司已经采用 3D 打印制备出上千个飞机零件，将其用于大飞机制造上。此外，3D 打印技术甚至可以用来设计生产航空发动机这种极其精密的仪器的零部件。例如英国罗·罗公司就采用 3D 打印技术制造了部分用于生产 Trent XWB-97 发动机的钛合金零件。采用 3D 打印技术在航空航天领域，一方面可以通过简便的结构设计使零件更加轻量化，另一方面极大地提高了生产效率，因此具有良好的发展前景。

在建筑领域，3D 打印已经可以实现混凝土砂浆的打印成型。美国航空航天局联合南加州大学共同开发的新型 3D 打印“轮廓工艺”，采用这种技术，可以在一天之内建造出约为两层的建筑，面积可达 232 m^2。这一革命性的技术极大地提高了建筑效率。目前可用于 3D 打印建筑的基材包括玻纤增强石膏和玻璃纤维增强砂浆。遗憾的是传统的水泥砂浆并不适合这种 3D 打印，未来需要开发和改进更好的混凝土基材，以满足这种打印需求。

总之，3D 打印已经渗透到越来越多的制造领域，正在逐步颠覆传统的制造观念，正在为未来实现真正的“绿色制造”打下坚实的基础。

1.7 国内外 3D 打印技术现状

目前，国外 3D 打印技术已经得到了广泛应用，主要涵盖航空航天、汽车制造、医疗、工业产品设计、生物科技等各个产业领域，且在各类产品的智能制造方面占有较高的比例。

自 1986 年 Hull 发明第一台 3D 打印机以来，国外关于 3D 打印技术的研究与开发取得了较大成果。2000 年美国 Zcorp 公司与日本 Rilcen Institute 联合研制出彩色打印机。2010 年美国 Organoxo 公司联合澳大利亚 Invetech 公司合作，试以活体细胞为原材料打印人体组织器官，是 3D 打印技术在医疗产品领域的重大突破性进展。2015 年，澳大利亚莫纳什大学通过激光选区熔化成形方式打印了世界上第一个全金属航空发动机。为解决疫情防控中应急物资短缺的难题，美国、意大利等国纷纷利用 3D 打印机生产呼吸机配件、个人防护面罩，甚

至还创建了在线论坛，用于政府、医院、非政府组织发布需求，以及业内人士分享经验等。3D 打印在全球疫情防控中发挥的作用，反映出这项技术普及度的提高和应用领域的扩展。根据 2020 年 3 月赛迪顾问发布的《2019 年全球及中国 3D 打印行业数据》，2019 年，全球 3D 打印产业规模达 119.56 亿美元，增长率为 29.9%，同比增长增加 4.5%。

美国仍是全球 3D 打印市场最大市场。2019 年美国产业规模占全球比重 40.4%，德国仅次于美国，中国位居第三。

作为 3D 打印起步较晚的中国，近几年，抓紧自主创新和研发，虽然和国外的技术还有一定差距，但也一步步朝着精细化和专业发展。当然，国内巨大的市场潜能，也吸引了不少国外 3D 打印行业巨头的目光和投资，进一步推动了中国 3D 打印产业的发展。

1.8 3D 打印材料要求及分类

3D 打印（增材制造）是对传统制造模式的颠覆和完善，其产品性能主要取决于粉体材料的性能。从某种意义上说，3D 打印最关键的不是制造，而是材料研发，即材料的发展决定着 3D 打印能否有更广泛的应用。3D 打印对原材料的要求比较苛刻，满足制备工艺的适用性要求所选的材料需要以粉末或丝棒状形态提供。对于粉体材料，除表面质量控制外，一般要求粉末要具有高球形度，以保持良好的流动性。目前全国乃至全球增材制造市场呈现蓬勃发展的趋势。据IDC（International Data Corporation）预测，按照全球增材制造产业在 2016-2020 年之间保持的 22.3%年复合增长率计算，全球增材制造产值可望在2025 年全球增材制造产业可能产生高达2000-5000 亿

美元经济效益，届时增材制造专用粉体材料也将得到更广泛地使用，产业化前景光明。

目前，3D 打印材料主要包括金属材料、陶瓷材料、聚合物材料和各种复合材料等。下面将对各种材料进行概述，具体详情后文会一一详细介绍。

1.8.1 金属材料

作为金属 3D 打印核心技术之一，3D 打印用金属粉应同时具备粒径分布适中、球形度高、流动性好、松装密度高及优异的可塑性和可焊性等要求。目前金属 3D 打印粉体的制备方法主要包括气雾法、水雾法和等离子球化法。其中，气雾法制备成本低、粉体球形度较高、粒径可控等优点，成为市场粉体制备主流工艺。等离子球化法制备的粉体球形度高（95 %以上）、氧含量低，但设备价格昂贵且出粉效率低， 主要适合难熔合金和高活性金属打印粉制备。

目前常用的金属打印材料主要包括铁基合金、钛及钛基合金、镍基合金、钴铬合金、铝合金、铜合金及其它贵金属等。

铁基合金是 3D 打印金属材料中研究较早、较深入的一类合金。对铁基材料而言，因具资源丰富、价格低廉等特点，广泛应用于各类工业制造和居民生活。较常见的 3D 打印用铁基合金有工具钢、不锈钢、高速钢和模具钢等。铁基合金使用成本较低、硬度高、韧性好，同时具有良好的机械加工性，特别适合于模具制造。3D 打印随形水道模具是铁基合金的一大应用，传统工艺异形水道难以加工，而 3D 打印可以控制冷却流道的布置与型腔的几何形状基本一致，能提升温度场的均匀性，有效降低产品缺陷并提高模具寿命。德国 Dresden 大

学采用激光 3D 打印直接制备 FeCrMoVC 刀模具，该模具具有致密度高、无裂纹，与传统工艺相比，其开模时间大大减少。

铝合金因具有良好的高温性能、高的比强度及低的热膨胀系数等优势，在航空航天、石油化工及汽车工业领域等有着广泛的应用前景。铝合金材料的种类很多，目前应用于 SLM 成形的常见体系有 Al-Cu-Mg、Al-Mg-Sc-(Zr)、Al-Zn-Mg、Al-Si 等。英国 Nottingham 大学的 Aboulkhair 等人通过改变扫描间距、扫描速度及扫描策略等加工工艺参数，在激光功率 100 W 的情况下，他们获得了致密度高达 99.8% 的 AlSi10Mg 打印件。Kruth 等人通过打印纳米 TiB_2 修饰 AlSi10Mg 的铝合金复合材料，制备了纳米级 TiB_2/AlSi10Mg 复合材料，其拉伸断裂强度可和高强铝合金材料 7075Al 媲美。

钛合金因具有低密度、高强度、优异的耐腐蚀性能和耐高温性能，同时还能与生物具有良好的相容性，被广泛应用于航空航天、医疗器械、化工和运动器材等行业。第四军医大学西京医院郭征教授团队采用 3D 打印钛合金骨盆肿瘤假体植入术，使患者巨大肿瘤切除后的缺失骨 盆得到精细化完美重建，解决了复杂部位骨肿瘤切除后骨缺损个体化重建的临床难题。西北工业大学黄卫东教授团队成功利用 3D 打印制造 3 米长用于国产 C919 飞机上的钛合金中央翼缘条。北京航天航空大学王华明教授团队采用激光熔融沉积技术制备出 TC4 钛合金结构件，其室温及高温拉伸、高温蠕变等力学性能均远超传统锻件。美国奥斯汀大学采用 INCONEL625 超级合金和 Ti-6Al-4 合金成功制造出 F1 战斗机和 AIM-9 导弹的金属零部件。

钴铬合金具有良好的生物相容性、高温力学性能和抗腐蚀性能，主要分为 CoCrW 和 CoCrMo 两大类合金，其合金零部件，有着强度高、尺寸精确等优点。目前多作为医用材料使用，其在用于牙科植入体和骨科植入体的制造等个性化定制方面具有巨大的应用价值。

以铜、镍等原料的金属 3D 打印将会得到更大的发展。Ren 等人以铜粉为原料，一种包括石蜡、低密度聚乙烯、硬脂酸(PW- LDPE-SA)热塑性有机粘结剂体系，得到烧结体的最高硬度样品与工业纯铜材料的平均硬度非常接近。更加说明了其在 3D 打印中的可行性。而镍合金则主要应用于零部件的修复领域。

镁合金因其阻尼特性和高强度等优良性能，在航空器、汽车等领域得到了广泛的应用。甚至其强度与人骨相当，在外科手术中更有应用前景，在 SLM 成形镁合金中降低热影响区和氧化的影响有着重要意义。

1.8.2 高分子材料

高分子化合物又称高聚物，是一类由数量众多的一种或多种结构单元通过共价键结合而成的化合物。高分子材料是指以高分子化合物为基础的材料。其中，用于 3D 打印的高分子材料主要是热塑性聚合物及其复合材料。根据组织结构，又将其分为结晶聚合物和非结晶聚合物两种。

非结晶聚合物通常用于制备高精度、一般强度的零部件。可用于 3D 打印的非结晶聚合物主要包括聚碳酸酯、聚苯乙烯和聚甲基丙烯酸甲酯等。美国 DTM 全球首次将聚碳酸酯成形熔模铸件，但其力学

性能较差，可作用性能较差。针对此情况，EOS 公司和 3D Systems 公司推出了以聚苯乙烯为基体的复合粉末。该材料与聚碳酸酯相比，成形温度更低、形变更小、成形质量更加优良，更适合熔模铸造工艺。史玉升团队先后通过浸渗环氧树脂的后处理方法和制备聚苯乙烯/尼龙复合材料来提高聚苯乙烯制件的强度，最终制件性能可满足一般功能件的使用要求。

结晶聚合物具有优异的力学性能，常被用于制备高强度零部件，尼龙是其典型代表。其经激光烧结后，可获得高致密度的制件，力学性能突出，可直接用于功能件，受到科研人员和制造厂商的广泛关注。Tontowi 等先后对尼龙体系进行了系统研究，结果表明尼龙是目前 3D 打印技术直接制备塑料功能件的最佳材料。此外，通过制备尼龙复合材料再进行 3D 打印，可获得性能更优的制品，满足不同场合、用途对塑料功能件性能的需求。

另外，可制备任意结构、个性化定制的特点，使 3D 打印技术与生物医学领域需求相匹配。因此，一些具有生物活性或生物相容性的高分子复合材料可直接用于 3D 打印，如羟基磷灰石与具有生物相容性的热塑性高分子材料（聚乙烯醇、聚乙烯和左旋聚乳酸）复合。

1.8.3 陶瓷材料

陶瓷材料是指用天然或合成化合物经过成形和高温烧结制成的一类无机非金属材料。与金属材料和高分子材料相比，它不仅具有优异的力学性能如高熔点、高硬度、高耐磨性等，还在电学、热学、光学、生物相容性等方面性能突出，其既可用作结构材料、刀具材料，

又可作为功能材料。在工业制造、航空航天、生物医疗等领域有着广泛应用。但其高脆性限制了其在 3D 打印中的应用。现阶段，只有少量的陶瓷材料可用于 3D 打印，如三氧化二铝、多孔氮化硅、磷酸三钙等。Liu 等通过 PVA 覆膜 Al_2O_3 陶瓷颗粒增加润滑性，制备出 PVA-陶瓷-环氧树脂复合粉末，通过 SLS 断口形貌发现经过覆膜的陶瓷颗粒仍然呈球形，且同为高分子的环氧树脂与 PVA 粘结牢固。美国 HRL 实验室人员使用 3D 打印方法制造出的超强陶瓷材料不仅可拥有复杂的形状，还能耐受超过 1700℃的高温，未来有望在航空航天和微机电领域大显身手。研究人员认为，这种超强、耐高温的陶瓷有望用于制造喷气发动机和极超音速飞机上的大型零件、微机电系统（如微型传感器）内的复杂部件等诸多领域。美国 Soligen Technology 公司利用粘结材料 3DP 技术，打印陶瓷及金属粉末，并在高温条件下对制件渗入金属，以提高致密化，用于制造铸造用的陶瓷壳体和芯子。

第二章 3D 打印金属材料

3D 打印技术是一种新型的打印技术，其突出优点在于无需机械加工或任何模具，就能直接从计算机图形数据中生成任何形状的零件，从而极大地缩短产品的研制周期，提高生产率和降低生产成本。3D 打印金属粉末作为金属零件 3D 打印重要的原材料，其制备方法备受人们关注 ，3D 打印金属粉末作为金属零件 3D 打印产业链重要的一环，也是其价值所在。

目前，金属 3D 打印技术主要有选择性激光烧结成形（SLS）、电子束熔融成形（EBM）、选择性激光熔化成形（SLM）和激光近净成形（LENS）。其中选择性激光熔化成形作为研究的热点，其使用高能激光源，可以熔融多种金属粉末。国外金属 3D 打印机采用的金属粉末一般包括：工具钢、马氏体钢、不锈钢、纯钛及钛合金、铝合金、铜合金、钴铬合金等。

2.1 粉末床熔融金属 3D 打印工艺

直接金属 3D 打印工艺有两大类，也有些非直接工艺或者正在出现的、可能对行业产生深远影响的工艺。不管工艺的形式，金属 3D 打印材料的状态只根据特定工艺的输运形式做调整。

选择性激光融化（Selective Laser Melting：SLM）和直接金属激光烧结（Direct Metal Laser Sintering：DMLS）是粉末床熔融金属 3D 打印工艺的典型代表，它们使用高能热源直接作用在粉末床上。SLM 工艺中粉末是完全融化的，而 DMLS 工艺的粉末只是烧结成整体。

尽管这两种工艺以高能激光为特征，但 Arcam 公司的电子束融化工艺（Electron Beam Melting：EBM）是 SLM 工艺的特殊情况，它使用电子束来融化金属粉末。

粉末床熔融金属 3D 打印工艺加工的零件可以几何结构非常复杂，尽管加工过程中需要支撑结构。这意味着加工内部中空结构可能非常困难，因为内部的支撑需要在打印完成后去除掉。

2.2 直接能量沉积工艺

另外一种主要的金属 3D 打印工艺是直接能量沉积（DED：Directed Energy Deposition），沉积时将金属丝或者粉末送至能量源融化。对于直接能量沉积工艺，可以一次打印多种材料，且多轴系统使得在已有零件上添加材料成为可能（添加特征或者产品修复）。

有些 DED 工艺需要特制的粉末，也有些可使用市场上用于其他传统工艺的粉末。比如，Sciaky 公司的 EBAM 工艺（Electron Beam Additive Manufacturing）使用来自焊接行业的金属丝，采用电子束来快速熔融金属材料。“我们的工艺使用焊丝作为原材料，”Sciaky 公司的全球销售经理 John O’Hara 说：“我们的线材是典型的焊丝，它的供应链已存在几十年了。”

使用焊丝意味着 EBAM 工艺可应用市场上大量的材料。“我们最常用的材料包括钛合金、镍基合金表现出非常优秀的锻造性能。我们工艺独特优势在于，如钼、钽、钨、铌等任意难熔金属均表现出优秀的性能和几何成型能力。”O’Hara 说道。

尽管粉床工艺零件通过处理后致密度可接近 100%，DED 工艺产品的性能更接近锻造件。正如 O'Hare 所说："Sciaky 公司的金属件近乎是完全致密的，其性能将达到或超越锻造行业的需求。对于任意 3D 打印工艺，结果严重依赖材料和沉积后热处理。这里的完全致密是指，我们能发现的孔（没有什么产品是绝对完美的）是非常微小的，且出现的频率非常低，通常能满足锻件的检测要求。"

DED 工艺的复杂几何造型能力在某种程度上受限，大部分加工是近净成型，需要通过进一步的机加工来得到最终产品。也就是，DED 工艺在几何造型方面有所不足，但胜在加工速度与尺寸。据说，Sciaky 公司制造了当前最大的金属 3D 打印设备。

2.3 其他金属 3D 打印工艺

也有粘结剂喷射加工金属件的方法。像 ExOne 公司的设备将粘结剂材料沉积在金属粉末床上。一旦打印完成，原型件需要在炉内进行烧结，粘结剂会被去掉，零件孔隙可以渗入铜得到最终产品。

Fabrisonic 公司使用一种被称为超声波 3D 打印（UAM：Ultrasonic Additive Manufacturing）的增减材混合技术来熔化金属箔片。这种工艺在 CNC 切割去除多余箔片前，先进行超声波焊接。这种方法使得结合不同类型的金属成为可能，且由于无熔化过程出现，可以把电子器件封装在零件内部而不用担心损坏它们。

Markforged、Desktop Metal、Admatec 等公司正出现的技术也采用了间接成型形式。对于 Markforged 和 Desktop Metal，它们把金属粉末添加在热塑性基质中，采用类似 FDM 工艺的形式进行沉积打印。

打印出的原型件在炉内烧结，会去掉热塑性粘结剂。相反，Admatec 把金属粉末与光敏聚合物混合，然后紫外灯照射来逐层固化，原型件也需要在炉内烧结。

XJet 公司开发了一种喷墨金属 3D 打印技术。它们的技术利用打印头喷射金属纳米颗粒墨水，并在加热的成型仓内沉积累计。Desktop Metal 似乎也在开发一种类似的技术，它将在 2018 年发布。

2.4 金属粉末的制备

对于粉末床熔融工艺，通常使用高品质的、昂贵的金属粉末。这些粉末通常采用气雾化或者等离子雾化工艺制备，分别通过感应加热或者等离子火炬来熔化金属。熔化金属液注入雾化仓，被高速气流破碎成小液滴，在下落过程逐渐凝固。

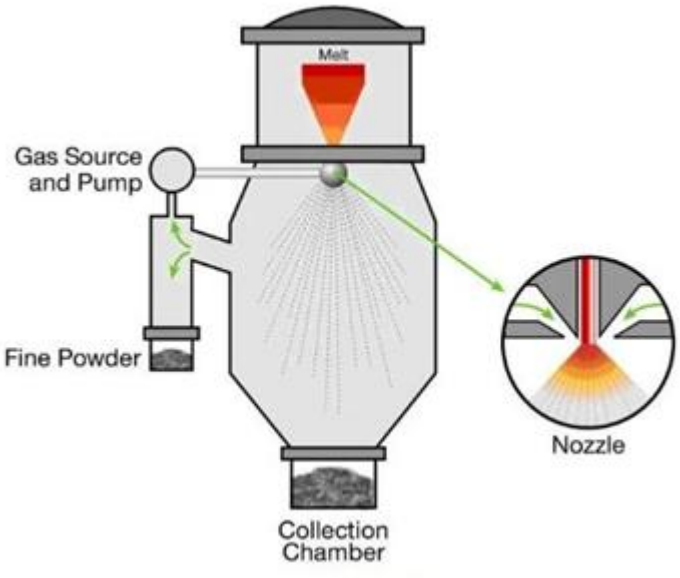


图 2-1 LPW 公司气雾化制粉工艺原理图

LPW Technology 是一家英国企业，它专注于生产与供应金属粉末、3D 打印控制与监测技术。对于不同的 3D 打印工艺，这家公司采用多种工艺生产不同类型的金属粉末。LPW 公司总经理 John

Hunter 认为超过 90%的金属 3D 打印粉末用气雾化工艺制备，等离子方法用来加工更高纯度的粉末，比如钛基合金、镍基合金。

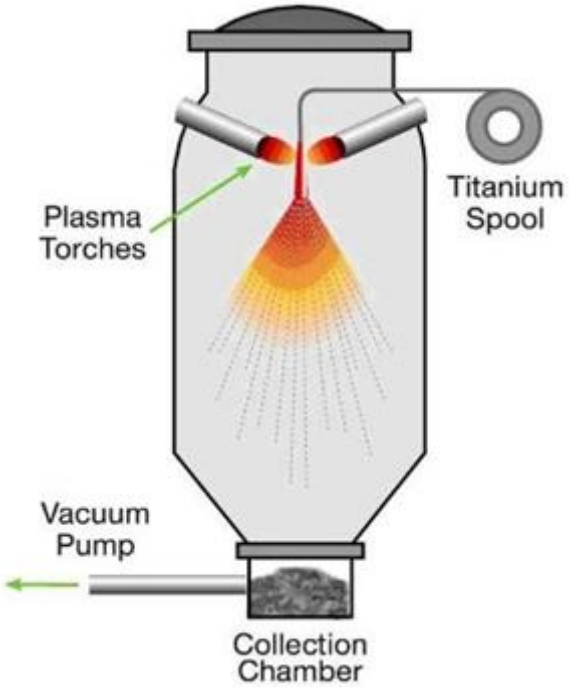


图 2-2 LPW 公司等离子雾化制粉工艺原理图

“等离子雾化工艺制备的粉末球形度更高。气雾化工艺也可以制备球形颗粒，但是不那么理想，”Hunter 说道。这两种工艺都与制备注射成型、热等静压和其它应用粉末的水雾化工艺不同，后者用来生产除 3D 打印以外的大部分金属粉末。然而，水雾化工艺制备的粉末更不规则，使得其难以应用于 3D 打印行业，有一部分原因在于 3D 打印对流动性的要求。

DED 工艺使用更粗的粉末，它的粉末粒径可能会超过 100 微米，EBM 工艺粉末的粒径在 45-100 微米，其他粉末床工艺粉末粒径在 10-45 微米。

由于和粉末床工艺相关的专利数量很多，制造商们通常采用专有的方法在打印过程中铺粉和填充加工平台。一家公司可能采用金属平条来铺粉，依靠重力填充加工区域。另外一家可能用圆柱形滚筒和弹性材料来铺粉，使用活塞送料来填充成型室。

“对于粉末粒度分布（PSD：Particle Size Distribution），LPW 向不同设备制造商销售粉末时也会考虑。我们清楚哪些粉末特征适合不同设备。它们总有些不同，”Hunter 补充道。“有些设备对粉末低流动性不那么敏感。”

基于那个原因，LPW 在向用户（不管是终端用户还是研究室）销售材料时，它会问客户使用什么类型的设备，根据具体机器提供可接受颗粒范围的粉末。

在制粉时我们还需要考虑其他方面因素，包括合金自身的化学组成、密度和孔隙率。最后两个因素对 DED 工艺尤其重要，因为粗粉在制备时会有更大的气体容纳空间，导致粉末内部存在气泡。这会使 3D 打印零件内部孔隙量增加，最终导致裂纹产生，影响产品力学性能。

基于这方面原因，LPW 除了粉末外还提供其他多种服务和产品。这包括记录监测粉末质量的软件和传感器，检测和保存粉末的工具，分析材料和解释粉末相关数据的实验室，咨询服务和粉末生命周期管理。

2.5 一种金属粉末生产的代替方法

除了比较传统的 3D 打印金属粉末生产工艺，还有种电解制备金属粉末的方法，它的典型特征是更节能、粉末产出可控性更高。

电解制粉是一种电化学工艺，它把金属氧化物引入到盐池，通常由熔融氯化钙组成。随着电流通过金属氧化物（作为阴极）和石墨阳极，金属氧化物的氧元素被去掉。最终得到纯净的金属粉末，通过清洁和干燥即可应用。

英国的 Metalysis 公司使用电解法制备金属 3D 打印粉末，它是一家出名的 3D 打印制造商。Metalysis 的 CEO Dion Vaughan 称它的工艺相对于其他粉末制备技术有许多优势。

“对于类似等离子雾化的制粉工艺，你得到的是粒径正态分布的粉末，”Vaughan 说。“如果你在制备 3D 打印粉末，实际上你所需要的粒径范围只是你生产的粉末很窄的一部分。如果你一年能制备 100 吨粉末，但是对特定的 3D 打印工艺（比如 SLM），能用的粉末只有 10 吨。”

电解制粉工艺可以很好地控制这一过程，几乎所有的粉末都可以为特定 3D 打印系统准备。因此，如果一家公司在为 SLM Solutions 公司的 SLM 设备生产粉末，你可以调整工艺参数只制备所需粒径范围的粉末，这对于 EOS 设备或者 DED 系统同样适用。

由于电解法的操作温度在 800-1000℃，所需能量比熔化同等质量的金属少很多。“如果你把我们的工艺与传统钛粉制备工艺相比，比如等离子雾化，我们估计你只需要大约 50%的能耗，”Vaughan 说道。

能耗的降低对环境比较有利，同时可降低顾客的采购成本。此外，电解法可用来制备很大种类范围的金属粉末，不管其熔点有多高。

Metalysis 现已发展到其第五代技术，它由研发开始，正准备进行扩展其完全成熟的制粉能力的可行性研究。Vaughan 称第五代制粉系统将基于第四代进行拓展，Metalysis 计划在今年完成这一工作。第四代系统可年产 20 吨轻金属粉末和 60 吨重金属粉末，而第五代可年产几百到几千吨高价值金属与合金粉末。通过独特的授权模式可以获取这项技术，它可以根据用户的需求灵活调整。

2.5.1 钛

尽管 Metalysis 公司的工艺可制备多种类型的金属粉末，它最关注的仍然是钛粉的制备。“概括地说，钛是一种非常神奇的金属，”Vaughan 称。“它很轻，但是强度高，耐腐蚀性好。”

最常见的 3D 打印钛粉是钛合金 Ti6Al4V（也被称为 5 级或 Ti64）和 Ti6Al4V ELI（也被称为 23 级或 Ti64ELI）。由于其通用性，5 级钛粉是目前用的最广钛基粉末。这种材料可被焊接，可以通过热处理提高强度，可以承受高达 300 多摄氏度的温度，具有很高的比强度和耐腐蚀性。基于这些原因，5 级钛粉经常被应用于高性能行业，比如航空航天、医疗、船舶和化工。

23 级钛粉的纯度和生物相容性更高，它可以做成线圈和线材，仍能保持高比强度、耐腐蚀性、韧性。这种材料常用于生物医学领域，包括手术器械和植入物。



图 2-3 通过 EBM 3D 打印工艺定制的钛合金颅颌面骨植入物

2.5.2 铝

两种最常见的 3D 打印铝合金粉末是 AlSi12 和 AlSi10Mg。尽管两者都是由铝和一些硅组成，AlSI10Mg 中还包含 Mg 元素。两者都是铸造合金，对于制造薄壁和复杂几何零件非常有用。



图 2-4 世界上第一台 3D 打印铝合金吉他

这些金属以高强度和硬度为特征，可应用于大载荷环境下。低密度和耐热性使得它们成为制造类似摩托车或者航天器内部件的理想

材料。它们也很容易进行后期加工，包括机加工、焊接、喷丸和抛光等。

2.5.3 钢

钢的种类很多，可分为不锈钢、工具钢、马氏体时效钢三大类。马氏体时效钢通过扩展热处理工艺获得高强度和硬度，却不丧失延展性。这意味着打印完成后很容易进行机加工，可进一步硬化。因此，马氏体时效钢可应用于批量化零件和模具。



图 2-5 用 MX3D 公司技术 3D 打印的自行车钢骨架

不锈钢以高耐磨性、耐久性和耐腐蚀出名。因此，这种金属经常应用于刀具、手术器械领域，也适合有耐酸、耐腐蚀要求的零件加工。

与马氏体钢不同，工具钢具有高硬度、耐磨性和变形抵抗力，能够保持锐利边缘，工具钢常用来制造工具和生产模具。工具钢的高耐磨性可满足成型其他材料的需求。一旦用 3D 打印来加工，可将独特的冷却流道加入到零件内部，优化注塑成型工艺。

2.5.4 钴

可 3D 打印的钴铬钼合金有多种，它们常表现出高强度、高硬度、耐腐蚀和高温等性能。钴经常与铬、钨等元素组合来制作重型切割工具或冲模，也与磁性不锈钢一起用于喷气机或燃气轮机零部件。



图 2-6 通过 CE 认证的 3D 打印钴铬金属冠桥

2.5.4 镍

Inconel 718、Inconel 625、HX（都是由镍、铬元素组成）是最常用的 3D 打印镍基合金。这些材料耐高温、耐氧化、耐腐蚀，在高达 1200℃环境下仍表现出高强度。捏脊合金零件的焊接性能优秀，可通过后期热处理进一步提高强度。这些材料被应用于航空和赛车行业，尤其是有显著高温和氧化风险的环境下，比如燃烧室和风扇。



图 2-7 空客 A320neo 客机 3D 打印镍基合金孔探仪凸台

在高温环境下，尽管 Inconel 625 比 718 的耐腐蚀性和稳定性更高，但后者的强度和传导性是前者的两倍。三种材料中哈氏合金的焊接性能可能是最好的。

粉末制造商 AMA（Additive Metal Alloys）的一位代表曾说过，尽管 AMA 公司制造多种类型粉末，但是镍基合金是 AMA 的一大重点。位于 GE Aviation 俄亥俄州工厂附近，AMA 将航空作为镍基合金的一大市场。

“钛的耐热性没那么强，但是密度小、强度高，也就是比强度非常高，”该代表解释道。“镍基合金密度比较大，但由于其优秀的耐热性能，镍基合金适合在发动机内部工作。

2.5.5 铜

铜在 3D 打印行业的应用并不常见，但仍有一些公司在为粉末床熔融工艺开发铜合金粉末。此外，DED 工艺可能已将铜用于焊接行业。和银相比，铜的美学价值和硬度更高，这种材料可应用于珠宝和工艺品。铜也应用于航空领域。

位于马歇尔太空飞行中心 NASA 材料与工艺实验室和洛克达因公司已把铜合金应用于粉末床熔融系统，并 3D 打印出有特殊冷却流道的火箭发动机部件。



图 2-8 NASA3D 打印第一个全尺寸铜发动机零件

2.5.6 贵金属

可 3D 打印的贵金属包括银、金和铂。这些材料通常比较柔软、光泽度高、化学活泼性低。很多情况下，它们的传导能力也非常好。除了 Concept Laser，Cooksongold 也是为数不多提供金（黄色、粉红色、白色）、铂 3D 打印的公司。这些材料主要用于珠宝和工艺品。

已有几个公司在使用银纳米颗粒墨水在零件上打印电路，如 Voxel8、Nano Dimension。Nano Dimension 重点开发镍基、铜基墨水，它们的导电性更好。银墨水使得 3D 打印电路成为可能，不管是制作 PCB 原型或直接把电子器件集成在 3D 打印对象里。

2.5.7 难熔金属

难熔金属种类比较少，包括铌、钼、钽、钨、铼，它们以极高的耐热性能而出名。它们的熔点都超过 2000℃，化学反应不活泼，密度大，硬度高。

钽有高耐腐蚀性、传导能力非常好，这在电子行业非常有意义。根据洛斯阿拉莫斯国家实验室研究，这种材料 60%用于真空炉零件和电解电容器。理论上，钽可以提高核微粒的放射性。

纯净钨的熔点比任何元素都高，高达 3422℃。这种金属密度很高，难以加工，但其稳定性适用于耐磨产品，如刀、钻头、磨、锯子等。钨的耐氧化、耐酸碱性能也很好，可用于辐射屏蔽。

Global Tungsten & Powders（GTP）是为数不多生产钨、碳化钨、钼粉末的公司之一，只销售已成功打印的粉末。GTP 公司研发经理 Rick Morgan 解释了其公司制粉工艺：“GTP 公司是垂直一体化的，它有能力开采钨矿砂，并进行化学提存，可制备钨粉和碳化钨粉，可通过钴喷雾干燥它，可对其球化处理以适应 3D 打印工艺。”Morgan 说道。

ExOne 公司为其粘结剂喷射工艺提供可粘结钨粉。该公司推出该材料来代替铅制造医疗器械和航空零件，因为铅的毒性更高。GTP 的碳化钨钴材料已被 ExOne 公司成功应用，该公司已开发出脱脂/烧结方案来保证致密度。

2.6 金属 3D 打印的未来

SmarTech Markets Publishing 预计 3D 打印金属粉末的市场在 2023 年会达到 9.3 亿美元，并指出其增长受航空领域对大尺寸零件的

需求驱动。根据公司近期对金属粉末的研究报告，SmarTech 高级分析师、3D Printing Business Media 创始人 Davide Sher 提出了些见解，包括哪些材料将得到普遍应用。

“在可见的将来，最常见的金属 3D 打印材料是钢、钛合金、镍合金、钴铬钼合金，”Sher 说：“钛合金在航空领域应用最多，因为成本不再是问题，通过轻量化实现的性能提升将弥补其花费。镍基合金也主要用于航空和国防领域。钛合金也会用于医疗领域（植入物），同样通过性能提升弥补成本。”

Metalysis 公司 CEO Dion Vaughan 同样认为钛合金的需求会增加，该公司的工艺将推动 3D 打印技术的大量应用：“历史上，钛合金的生产受传统方式的制约，它们能量利用率低，成本昂贵，甚至是对当前先进的等离子雾化工艺，”Vaughan 说道：“然而电解法效率更高、成本更低，这会推动金属 3D 打印的普及，并进一步降低粉末成本。”

Vaughan 设想了下粉末生产与制造工艺同地协作的可能性，他将提高整体效率。这对正出现的分布式制造趋势非常重要，这种情况下零件制造离终端用户更近。

Davide Sher 表示，由于主要应用于大牙科行业，钴铬钼合金对产品生产更重要。钢这种最先出现的金属 3D 打印粉末，通常会是大家最常见的选择。铝合金在成本上会低些，它适用于汽车行业零件的加工，未来会出现更大尺寸的 3D 打印零件。贵金属（尤其是铂）的应用比较有趣，但 Sher 认为其应用比较有限。

“送粉工艺（DED）近期的快速发展会显著推动粉末需求，”Sher提到：“目前这些技术不再局限于零件修复，也会用来打印大尺寸零件。粉末床熔融工艺的加工尺寸和速度也在快速提升，基本每两年翻一倍。”

Sher 认为金属材料不一定是工业 3D 打印领域的老大，高性能塑料比如 PEEK、PEKK，以及碳纤维增强材料可能会代替金属，因为它们的成本更低。“尤其是航空和医疗领域，这些材料会占领金属 3D 打印的一部分市场，”Sher 总结道。

在收购 Arcam、Concept Laser 后，GE 组建了 GE Additive，这佐证了 SmarTech 对 3D 打印增长的预测。对 Arcam 的收购，使得这家企业巨头同时获得了 3D 打印机制造商和粉末制造商。

LPW 公司的 John Hunter 用这个例子说明行业的垂直整合正在来临。他认为粉末制造商（包括 LPW）必须要加大其粉末产能。他在美国的分公司将搬到一个更大的工厂，来适应粉末生产的需要。LPW 也在增加有关材料回收方面的活动，Hunter 认为这是这个趋势会越来越流行。

他指出粉末用量的增长受 3D 打印终端产品的驱动，它区别于最早的原型加工应用。“随着越来越多的机器被安装，粉末市场增长如此之快，”Hunter 说：“不再是加工原型手板，把打印件用于几个月的测试，现在很多打印件正用于最终产品上。因此，这些设备正整日、整周的打印零件。它们现在使用的粉末量比一年前多很多。”Hunter

表达了他对 3D 打印未来的乐观看法，粉末市场的评论仅仅是他的个人观点和观察结论。

换句话说，随着金属 3D 打印被集成到制造供应链来加工终端零件，会消耗掉更多金属粉末，导致更大的粉末制粉量。随着金属 3D 打印的持续发展，可以预期粉末行业会同步增长和发展。

第三章 3D 打印高分子材料

高分子材料因其种类繁多、性能各异，已被广泛应用于各类生产生活中。以其体量计算，早已远超金属材料和陶瓷材料，位居材料行业首位。随着 3D 打印技术的不断发展，越来越多种类的高分子材料被应用其中。其中，尼龙类、ABS 类、PC 类是应用较多的几种高分子材料。此外，部分环氧树脂类高分子材料还可做复合剂参与到其它类材料打印。

3.1 高分子材料的优势

高分子材料在 3D 打印领域具有其它材料无可比拟的优势。

1) 3D 打印作为一种新兴的产品加工手段，其个性化的生产思路必然导致加工手段的多样化，所制备的产品种类、性质各具特色。因此，其对材料的物理、化学性能的要求也千差万别。3D 打印的发展使得有各种满足打印专一性需求的不同物理、化学性能的材料不断出现。而高分子材料本身具有种类繁多、性质各异、可塑性强的特点。通过对不同的聚合物单元结构、单元种类的选择和数量的调节，不同结构单元的共聚及配比，可以轻松获得不同物理、化学性能的粉末化、液态化、丝状化的新型高分子材料，从而实现 3D 打印材料的多样性和专一性功能。

2) 高分子材料具有熔融温度低的优点，且多数高分子熔体属于非牛顿流体，触变性能好，从而极大地满足了 3D 打印中 FDM 打印工艺要求。而 FDM 工艺由于具备不使用激光、设备成本低、维护简单、成型速度快、后处理简单等优点，一直是 3D 打印技术应用推广的主

力，所以用于 FDM 打印工艺的高分子 3D 打印材料也是目前高分子 3D 打印材料研究的重点。此外，高分子 3D 打印材料由于其较低的烧结温度，在 SLS 打印工艺中也具有加工能耗小，设备要求低的优势。

3) 高分子材料具有轻质高强的优点，尤其是部分工程塑料，其机械强度可以媲美部分金属材料，密度却只略大于 1 g/cm^3，其较小的自重和高支撑力为打印镂空制品提供了便利。此外，轻质高强的特点也使其成为汽车零部件和运动器件的首选材料。

4) 高分子材料价格便宜，在体积价格方面远胜金属材料，而且可加工性能更好，因此在 3D 打印材料中具有很高的性价比。

上述优势使得高分子材料成为使用最广泛、研究最深入、市场化最便利的一类 3D 打印材料。

3.2 高分子材料的特性

高分子材料在 3D 打印中的应用大多是采用 FDM 技术，根据打印工艺的实际要求，一般需要高分子材料具有以下特性：

1) 良好的触变性。高分子熔体在从打印头中高速喷射出时，只有熔体具备良好的流动性方能顺利、准确地喷射到指定位置；而当熔体材料到达打印位置时，则要求熔体有较高的黏度而无法随意流动，才能保证材料固定在打印位置不会变形、移动。这就要求高分子熔体在高剪切速率时具备较小的黏度，而在低剪切速率时具备较大的黏度，即要求高分子材料必须具备良好的触变性。FDM 技术能够广泛应用

于 ABS 等高分子材料正是由于材料良好的触变性。而普通尼龙等材料则更多使用选择性激光烧结技术(SLS)进行打印。

2) 合适的硬化速度。使用 FDM 技术进行 3D 打印时，采用熔体打印，因此高分子材料的硬化速度至关重要。硬化速度太快，材料容易在喷头附近硬化，造成喷头阻塞，损坏设备；硬化速度太慢，由于必须在下一层硬化后再进行上一层打印，因此将严重影响打印效率和制品质量。

3) 较小的热变形性和热收缩率。FDM 工艺和 SLS 工艺均是在高温下加工，在低温下成型，且成型过程不像传统高分子加工工艺有模具等束缚定型。高分子材料的热变形性和热收缩率要高于金属和陶瓷材料。因此，选择热变形性和热收缩率小的材料或在高分子材料中添加玻璃纤维等纤维材料作为 3D 打印材料，减小制品的热变形性和热收缩率就显得尤为重要。

3.3 聚乳酸材料

PLA(Polylactic Acid)中文名聚乳酸，是由 Pelouze 在 1845 年最先发现的，截止至 2013 年世界上生产聚乳酸的生产商有进 20 家。聚乳酸的制备原料主要为植物淀粉，具有良好的生物相容性、可降解性、易加工性，制件强度高、延展性好，该材料已经在生物医用领域、汽车行业、电子行业等得到了广泛的应用，目前全球最大的聚乳酸制造商为美国 NatureWorks 公司。PLA 聚合物是一种新型可生物降解的热塑性树脂，相比于物理性质相近的传统树脂具有更加优良的特性，而且依赖植物为原料而不是石油，PLA 可以在短期之内分解为二氧化

碳和水进入自然界，在通过太阳光合作用变成淀粉，对人体和环境没有危害，是真正的无公害可再生绿色环保材料。

聚乳酸是一种热塑性高分子材料，表观透亮，具有良好的成纤性，可降解性和优异的力学性能，且具有优良的加工性能，可通过传统加工如吹塑、热塑等对其进行加工成型。但其缺点也很明显，比如韧性低，打印出来的制品脆等。

国内外很多学者对 3D 打印聚乳酸做了改性研究，主要分为化学端基改性和物理共混改性。陈卫用 ADR 扩链剂改性聚乳酸，分析了扩链剂含量对聚乳酸热性能、熔体强度、力学性能以及打印性能的影响。得出了扩链剂能提高聚乳酸熔体强度和耐热性能，当扩链剂含量为 0.4%时，改性聚乳酸的力学性能及综合打印性能最佳。现如今 PLA 以成为 FDM 增材制造技术应用最多的耗材之一，应用 3D 打印技术的优势可实现结构形状更为复杂的 PLA 零部件快速制备。PLA 具有优良的热稳定性，一般用于 FDM 3D 打印的 PLA 丝材加工温度为 195-230℃。

牛超用滑石粉填充 3D 打印用聚乳酸，研究了三种不同目数（800 目、2000 目和 3500 目）滑石粉对聚乳酸结晶度和耐热性能的影响，得出滑石粉能提高聚乳酸的结晶速率和耐热温度，且 2000 目的滑石粉改性聚乳酸具有最高耐热温度和结晶度。

Postiglione 等开发了一种基于液相沉积建模（LDM）的 3D 打印系统，并找到最佳工艺条件和打印窗口，打印聚乳酸/多壁碳纳米管纳米复合物分散体得到导电纳米三维结构材料。 Patanwala H S 等

对碳纳米管-聚乳酸复合材料进行 FDM 打印。分析不同质量分数（0.5%、2.5%和 5%）的碳纳米管对复合材料打印件的力学性能影响。结论表明，在碳纳米管含量 5%时 FDM 打印件的杨氏模量提高 30%，但是拉伸强度和总体韧性降低了，并运用数学模型对结论进行了解释。

3.4 ABS 丝材

ABS 树脂是聚丁二烯橡胶与单体丙烯腈和苯乙烯的接枝共聚物，ABS 综合了三者各自的优良性能，在汽车、家用电器、玩具工业等领域有着广泛的应用。作为 3D 打印材料，ABS 具有韧性好、强度较高的特点，但其缺点也很明显，打印制品收缩率较大，易翘曲变形。

Zhong. W. H 等为获得用于 FDM 的高强度和高硬度 ABS 丝材，通过加入几种不同的性能改进剂，包括短玻璃纤维，增塑剂和增容剂来改性 ABS。发现玻璃纤维以降低柔韧性和易打印性为代价显著提高了 ABS 丝材的强度。通过添加少量的增塑剂和增容剂改善了玻璃纤维增强 ABS 丝材的柔韧性和易打印性，打印过程中发现制备的复合丝材与 FDM 设备兼容性良好。

J. Singh 等探讨了 FDM 工艺参数对 ABS 打印制品表面光洁度的影响，并采用化学气相法进行后处理以提高制品的表面光洁度。设计正交实验用于优化打印工艺参数和后处理的工艺参数。研究结果表明打印工艺参数对打印件表面光洁度有着显著影响，但经过后处理，制品表面光洁度几乎不受打印工艺参数的影响。

S Dul，L Fambri 等首次将 4wt%石墨烯纳米片（xGnP）与 ABS 熔融共混加工成 FDM 丝材，然后将复合丝材沿着三种不同构造方向打印试样。研究结果表明，xGnP 提高了打印件的热稳定性、弹性模量和动态储存模量，但降低了拉伸强度，并比较了 3D 打印件和注塑件的差异，突出了由打印方向引起的取向效应对综合性能的影响。

3.5 聚苯砜丝材

聚苯砜是所有热塑性材料中强度最高、耐热性最好、抗腐蚀性最强的材料，应用于航空航天，交通工具及医疗健康行业等领域。聚苯砜因其优良加工性能和热力学性能，一般无需改性即可直接加工为 FDM 丝材，丝材表观效果很好，打印制品效果优良。但价格昂贵，打印温度高达 350℃，对 FDM 设备的加热温度要求很高。

T Martens，L Mears 等开发使用聚苯砜材料来打印旋转对称零件比例模型的铸模，进行设计验证、选择材料和调试工艺参数，打印出满足工作温度和工作压力要求的铸模，并介绍了二次处理表面抛光打印铸模的方法。结果表明使用 FDM 打印聚苯砜丝材作为离心铸造模具是可行的。

Huang B, Masood S H, Nikzad M 等研究了三个主要工艺参数（光栅角度、填充密度和打印方向）对 FDM 打印聚苯砜材料的动态力学性能的影响。在三个不同的固定频率（1Hz，50Hz 和 100Hz）下进行动态力学分析，研究这些工艺参数对聚苯砜打印件阻尼性能的影响，并采用 Taguchi 方法来优化工艺参数以达到更好的阻尼性能。

3.6 聚碳酸酯丝材

聚碳酸酯是一种高刚性，高透明的工程塑料，因具有良好的光学性能和机械性能，广泛应用于玻璃装配业、汽车工业和电子电器工业。聚碳酸酯丝材的亮度高，光泽性好，打印制品具有很强的韧性和力学性能。但同时其加工温度较高，打印制品对缺口敏感，收缩性也较大，易翘曲变形，很多学者在 ABS 与聚碳酸酯的合金方向上有较深入的研究。

Masood 研究了 FDM 工艺参数（如填充密度，光栅宽度和光栅角度）对聚碳酸酯打印试样拉伸性能的影响。结果表明当填充密度为 100%，光栅宽度为 0.6064mm，光栅角为 45°时，可获得最高的拉伸强度，此时聚碳酸酯打印试样的拉伸强度达到注塑零件的 70%~80%。

K. Cantrell 等首次将数字图像相关技术用于测试 3D 打印聚碳酸酯零件的拉伸和剪切测试，研究了光栅角度和构造方向对聚碳酸酯打印试样的剪切模量和剪切屈服强度的影响。

3.9 尼龙丝材

尼龙分子间存在大量作用力极强的氢键，使其具有良好的力学性能、耐磨性、抗腐蚀性能，是一种较好的 3D 打印材料。由于尼龙是一种结晶性聚合物，分子内应力很大，收缩性强，纯尼龙丝材打印翘曲变形严重，所以改善其翘曲变形是当今工作的重点。

Masood. S. H 等开发了一种基于 FDM 工艺制造模具的新型铁/尼龙复合材料，其目的是降低快速模具的制造成本和时间。通过实验研究了铁与尼龙配比对复合材料热性能的影响，并与快速模具中使用的其他金属/聚合物复合材料进行了比较。结果表明当铁/尼龙含量比为

3：7 时，打印件具有最佳热性能。这种复合材料丝材已成功应用于普通的 FDM 打印机中，可直接快速加工注塑用模具，这将有效减少注塑模具的制造成本和时间。

Tuan Noraihan Azila Tuan Rahim 等开发了一种羟基磷灰石和氧化锆增强尼龙 12 的复合丝材，当羟基磷灰石含量为 5wt%、氧化锆含量为 15wt%时，复合丝材具有最佳力学性能。并与市面上的 Taulman 618 尼龙丝材性能做对比得出，复合材料的强度与 Taulman 618 相当，由于填料的加入使其模量高于 Taulman 618。

Boparai. K. S 等通过优化单螺杆挤出机的工艺参数(如螺杆转速、机筒温度、机头温度），使用正交实验方法研究了 PA6/Al/Al2O3 复合丝材的拉伸强度和直径偏差，开发该尼龙丝材作为 ABS 丝材的替代品。基于数学模型和多响应优化技术找出了回归方程，并计算出当丝材具有最大拉伸强度和最小直径偏差时的最佳参数。并通过实验验证了最佳参数，结果表明与预测值仅误差±4%。

Dickson A N 等分别用连续碳纤维、芳纶纤维和玻璃纤维来增强尼龙复合材料，制备成 FDM 丝材。研究了体积分数、纤维类型和纤维取向对尼龙复合材料力学性能的影响。结果表明，使用碳纤维增强的尼龙丝材力学强度最大，其拉伸强度高达非增强尼龙的 6.3 倍。

3.10 填充改性用填料简介

尼龙的性能优越，密度较小，制品的尺寸稳定性很好，能耐酸碱及溶剂腐蚀，可采用多种成型方式如热压、注射和挤出成型等，在医疗、电子电器、机械设备、汽车、军事及航空航天等领域有非常广泛

的应用。但尼龙材料也有一些缺点，作为一种结晶性高分子材料，尼龙制品成型收缩率大，吸水率也较高，纯尼龙丝材打印翘曲变形较为严重，而填充改性是一种有效减少翘曲形变的手段。目前国内外的一些研究都是围绕用填料填充尼龙来改善其打印收缩性，并且提高力学性能以及其他性能来展开的。采用的填料主要分为无机非金属填料、金属粉末填料和有机刚性填料。

熔融共混改性在高分子聚合物改性技术中应用最广，填料填充聚合物一方面可以大幅度降低材料成本，另一方面还能提高材料的综合性能，已成为开发高性能高分子复合材料的重要技术手段。工业应用的无机填料种类很多，应用较广的有玻璃纤维、碳酸钙、云母、炭黑、玻璃微珠、滑石粉、碳纤维、蒙脱土、硅灰石、二氧化钛等。其次是金属粉末填料，如铜粉、铁粉、铝粉等，具有提高聚合物的导热导电性能以及力学性能，应用于某些特殊用途中，如航空航天，电子元器件等。应用较少的是有机刚性填料如高抗冲聚苯烯，因其与聚合物同属有机物，加工以及相容性方面会较前两种简单许多。由于固体填料与聚合物采用相对简单的机械搅拌混合法即可使大多数填料分散均匀，因此填充改性技术非常适合制备高性能 FDM 尼龙丝材。在尼龙中加入适当的填料，不仅可降低收缩率、减少翘曲变形，提高 FDM 打印件的成型率和尺寸精度，同时还可提高打印制品的模量、热变形温度等物理机械性能，并可大幅度降低成本。

各种填料因其自身具有不同的物质组成、形状结构、粒径尺寸和物理化学特性等特点，在改性聚合物中产生直接或者间接的影响从而

起到改性作用。根据加工经验而言，球状或规则粒状的填料可提高聚合物加工性能，棒状、长条状等长径比高的填料能有效提高复合材料的力学强度。填料粒径较大时，容易在聚合物中形成缺陷，引起应力集中导致复合材料冲击强度剧烈下降；但粒径太小，聚合物和填料之间分散困难，容易发生团聚导致复合材料力学性能下降。FDM 打印不同于传统塑料的注塑或模压成型工艺，在选择填料时应综合考虑填料对 FDM 丝材的打印工艺和打印制品性能的影响，从而做出合理的选择。 选择填料首先应考虑到填料尺寸大小，现在市面上 FDM 打印机喷嘴直径大多为 0.4 ㎜，若填料尺寸过大，会造成喷嘴堵塞导致打印失败甚至是设备故障，故选择填料时尽量选择尺寸较小的填料。下面介绍本实验所用的四种填料，分别是玻璃微珠、蒙脱土、碳纤维粉和铝粉。

3.10.1 玻璃微珠

玻璃微珠（Glass bead，GB）是一种直径为微米级的玻璃球体，主要组成成分为无机硅酸盐类，综合性能十分优异，在聚合物加工和其他场合得到了广泛应用。玻璃微珠呈球状，具有很好的流动性，对加工设备的损伤和磨耗也很小；膨胀系数小，在树脂中分散性好，各向同性，可有效减少残余应变及减少制品收缩，从而提高制品尺寸稳定性；热稳定性和化学稳定性好；可耐 1300℃以上高温、传热性能差，可提高聚合物的阻燃性能和耐高温性能；又因电绝缘性很好，可用于填充高绝缘聚合物从而提高其电阻性能。

为改善玻璃微珠与尼龙的界面结合，常用硅烷偶联剂改性玻璃微珠。硅烷偶联剂耦合机理研究很多，普遍接受的解释是偶联剂在无机物和聚合物之间架桥，从而起到耦合作用。图 3-1 所示是硅烷偶联剂作用于无机填料表面的效果图。

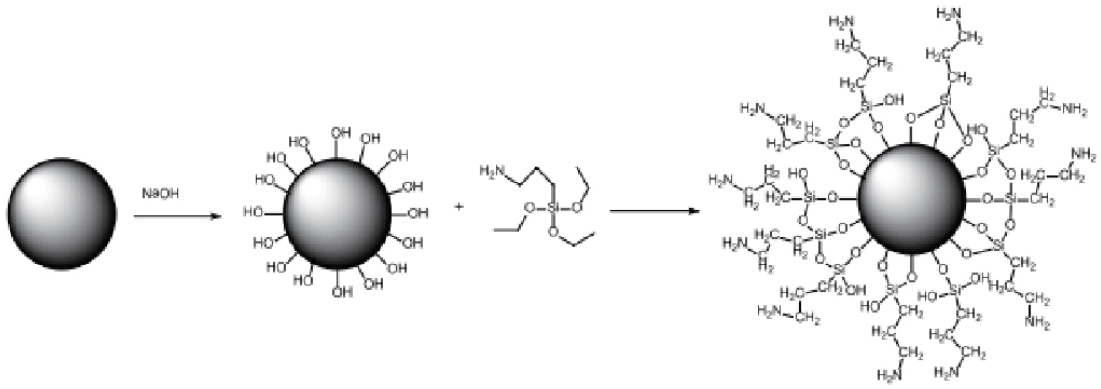


图 3-1 硅烷偶联剂作用无机填料表面示意图

丁雪佳研究了空心玻璃微珠对尼龙 6 的力学性能和熔体粘度等性能的影响，结果表明当空心微珠填加量不超过 20wt%时，尼龙 6 的拉伸强度和冲击强度均随着空心微珠含量的提高而上升，而熔体粘度随着玻璃微珠的加入而下降。孙向东等对空心玻璃微珠填充铸型尼龙进行研究，从玻璃微珠含量、粒径和表面处理等方面对复合材料的影响做了分析。结果表明玻璃微珠含量为 10 wt%时，复合材料热力学性能都有较大提高，玻璃微珠粒径越小复合材料性能提升越好。Long. S 对玻璃微珠增强聚苯硫醚复合材料的摩擦学行为进行了研究，结果表明复合材料的摩擦系数随着玻璃珠直径的下降而减小，特别是具有均匀尺寸和规则形状的玻璃微珠可以显著提高复合材料的摩擦学性能。

3.10.2 蒙脱土

蒙脱土（Montmorillonite，MMT）是一种 2：1 型层状含水铝硅酸盐的土状矿物，主要成分为氧化硅和氧化铝 ，其化学通式为$(Al_{2-y}Mg_y)Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$。图 3-2 是蒙脱土的结构示意图。由于具有分散性、膨胀性、吸水性和便宜易得等特点，蒙脱土被广泛用于填充聚合物，但是在聚合物中直接添加 MMT，两者相容性很差，制备出的复合材料达不到应用要求，因此需要对蒙脱土进行改性处理来增强其与聚合物之间的相容性。

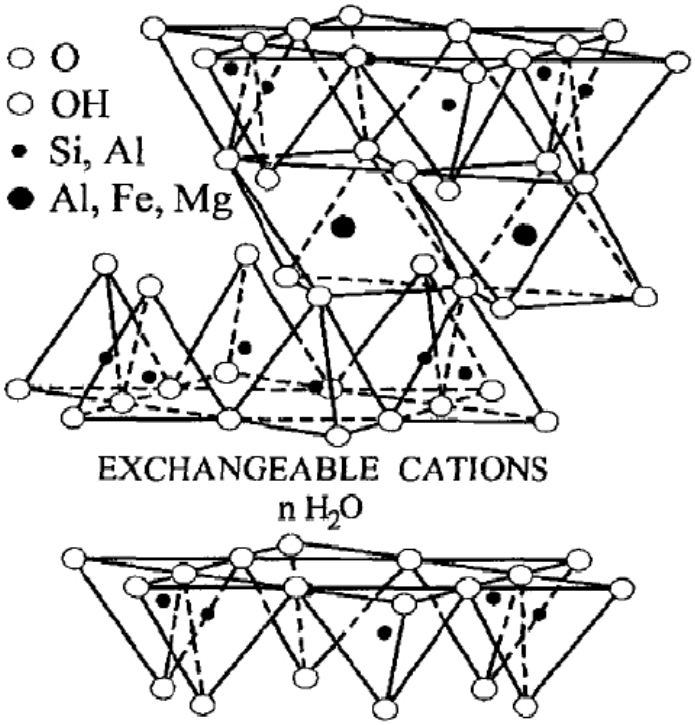


图 3-2 蒙脱土的结构

蒙脱土具有强亲水特性，其在有机相中的分散能力很弱以及对有机基团的附着能力很差，因此应用于聚合物中时必须对蒙脱土进行有机改性。将有机物引入蒙脱土层间，使其具备某些有机基团，不仅使蒙脱土层间膨胀，具有疏水性能，而且可以改变蒙脱土界面极性和物理化学微环境，能与聚合物大分子有效结合形成高性能复合材料。蒙

脱土有机改性方法主要有阳离子表面活性剂改性、阴离子表面活性剂改性、非离子表面活性剂改性、聚合物单体改性以及偶联剂改性等。

李迎春在博士论文中对蒙脱土和 POE-g-MAH/POE 两种改性剂分别和协同增强增韧尼龙 11 复合材料体系的形态结构与性能的关系进行了系统的研究，通过透射电镜等手段对复合材料的结晶性能和增韧机理做了详细的探索和分析。T D Fornes 考察了两种不同产地的钠基蒙脱土对尼龙 6 纳米复合材料形态和性能的影响，对两种蒙脱土分别复合尼龙 6 材料的透射电镜照片的定量分析显示，相比于 Wyoming，Yamagata 纳米复合材料的平均颗粒长度略大，并且蒙脱土片层剥离程度较高，具有更高的颗粒纵横比。结果表明，随着颗粒纵横比的增加，纳米复合材料的刚度和强度更高。

3.10.3 碳纤维

碳纤维（carbon fiber，CF）是碳元素含量在 90%以上的石墨结晶组成的一种多晶无机纤维，是一种适应航空航天等高技术领域发展需要而研究开发出的新型增强材料。碳纤维具有质轻高强、耐酸碱腐蚀性能良好、耐高温、电阻性能优越等一系列优点。传统碳纤维根据长度分为连续碳纤、长碳纤和短碳纤，而 FDM 打印机喷嘴直径一般为 0.4mm，传统碳纤维因长度过长而不适用，因而采用碳纤维粉。碳纤维粉即磨碎碳纤维就是将普通碳纤维经过剪切、磨碎成粉状的微米级圆柱状颗粒，它在性能上除粒径长度较小外与普通碳纤维无异，由于呈粉状其比表面积更大，与聚合物无熔融共混过程中分散更均匀，因而是理想的填充材料。

碳纤维的表面很光滑，无活性基团等特点导致其惰性较大，与聚合物的界面结合力较差，无法与聚合物基体形成有效邡合，降低了界面强度，因此对碳纤维表面改性是提高碳纤维复合材料综合性能的必要手段。碳纤维表面处理方法主要有化学氧化法、电化学氧化法、等离子处理法、涂层法、化学接枝法和辐射法等。

Junxiang Wang 和 Mingyuan Gu 研究了碳纤维增强尼龙 1010 复合材料在湿和干燥条件下的摩擦和磨损性能。与干滑动相比，水中的摩擦系数降低。由于碳纤维的增强，复合材料的耐磨性提高了两个数量级，且材料在湿润条件下的摩擦系数小于干燥条件下的。进一步研究表明尼龙 1010 分子间酰胺基的水解并由此导致氢键减少是导致尼龙在水中的高磨损率的重要因素。

Wang Z, Huang X 等研究了 PAN 基碳纤维的电化学氧化和上浆处理对拉伸性能、表面特性和与环氧树脂结合性能的影响。结果表明，电化学氧化使碳纤维的拉伸强度提高了 16.0%，进一步的上浆处理对拉伸强度没有影响。氧化和上浆处理都通过引入含氧官能团显著改善了碳纤维的润湿性和表面能，氧化处理略微增加了碳纤维和环氧树脂的界面剪切强度，进一步的上浆处理将界面剪切强度从 73.6MPa 提高至 81.0MPa。

3.10.4 铝粉

铝粉（Aluminum powder）按用途可分为工业铝粉、涂料铝粉、发气铝粉、易燃铝粉等，广泛应用于冶金、化工、装饰、防腐、建筑、农药、烟火、化工催化剂、炸药等行业。铝粉应用于聚合物中一般作

为一种金属填料或颜料，根据其形状可分为片状和球状，根据其粒径大小又可分为多个品级。因铝粉性质活泼易氧化、比表面积大在聚合物中易团聚等特性，工业铝粉在应用前大多需要对其进行改性。

铝粉改性常用方法有机械化学改性、表面化学改性、胶囊改性、氧化改性、包覆及沉淀改性等。本次实验采用两种偶联剂处理铝粉表面，分别是硅烷偶联剂和钛酸酯偶联剂。硅烷偶联剂改性铝粉的机理过程如图 3-3 所示，而钛酸酯偶联剂的作用机理被广泛接受的大致分两种，一种是化学键理论，钛酸酯偶联剂中的烷氧基与铝粉表面结合，形成有机单分子层，这与硅烷偶联剂作用机理类似；另一种是南京大学胡柏星提出的配位理论，他们认为钛酸酯偶联剂起到偶联作用是由于配位键引起，即钛酸酯偶联剂中的 Ti 提供的 sp^3d^2 杂化轨道而填料提供孤对电子从而产生配位化学作用。

闫春泽等因机械混合铝粉与尼龙易发生偏聚影响烧结件性能而提出了通过溶液沉淀法制备尼龙 12 覆膜铝粉，研究了铝粉含量及粒径对选择性激光烧结件性能的影响。闵成勇对铝粉改性填充 ABS 树脂复合材料进行了一系列研究，分析了成型工艺、铝粉含量、铝酸酯偶联剂含量、铝粉粒径等因素对复合材料热力学性能的影响。Gabriel Pinto 等通过对铝粉填充尼龙 6 复合粉末材料的制备和表征，研究了复合材料的导电性、密度、硬度和微观形貌。

第四章 3D 打印光敏树脂材料

光敏性高分子又称感光性高分子，是指在光作用下能迅速发生化学和物理变化的高分子，或者通过高分子或小分子上光敏官能团所引起的光化学反应(如聚合、二聚、异构化和光解等)和相应的物理性质(如溶解度、颜色和导电性等)变化而获得的高分子材料。

光敏树脂，俗称紫外线固化无影胶，或 UV 树脂(胶)，主要由聚合物单体与预聚体组成，其中加有光（紫外光）引发剂，或称为光敏剂。在一定波长的紫外光(250 nm~ 300nm) 照射下便会立刻引起聚合反应，完成固态化转换。光敏树脂一般为液态，可用于制作高强度、耐高温、防水材料，用途广泛，收到科研工作者的高度重视。光敏树脂具有节约能源、污染小、固化速度快、生产效率高、适宜流水线生产等优点，近年来得到了快速发展。目前，光敏树脂不仅在木材涂料、金属装饰及印刷工业等方面逐步取代传统涂料，而且在塑料、纸张、地板、电子、油墨、黏合剂等方面有着广泛应用。

4.1 光固化 3D 打印技术简介

光固化 3D 打印即光敏树脂 3D 打印。工作核也原理是通过相关软件做出所需打印制件 3D 数字模型，将数字模型用分层软件处理，输入打印程序中，打印机根据数据逐层固化得到制件。按出现的时间顺序来分，光固化 3D 打印目前主要有三种。

4.1.1 喷射型光固化 3D 打印

喷射型光固化 3D 打印是三种里面研究相对较早的一种，该种光固化 3D 打印的特点是光敏树脂与紫外光发射器在一个控制箱中，树

脂是从上往下喷射，边喷射边固化。具体过程如下：将光敏树脂装在容器中，通过打印喷头将光敏树脂喷射到指定的升降台上面，激光随着喷头喷射的运动轨迹而运动，对喷射的光敏树脂进行固化，当激光扫描固化树脂过后，升降台按照程序设定的距离下降一定高度，然后喷头再按照程序输出轨迹运动喷射、固化，逐层堆积直到获得所需制件，最后对打印件进行表面处理即可。此种方法由于树脂是高速喷出，如果粘度过低容易飞溅，过高铺平又很困难，难控制，再加上光敏树脂本身的收缩翘曲变形，使得制件的精度较低。其原理如图 4-1 所示。

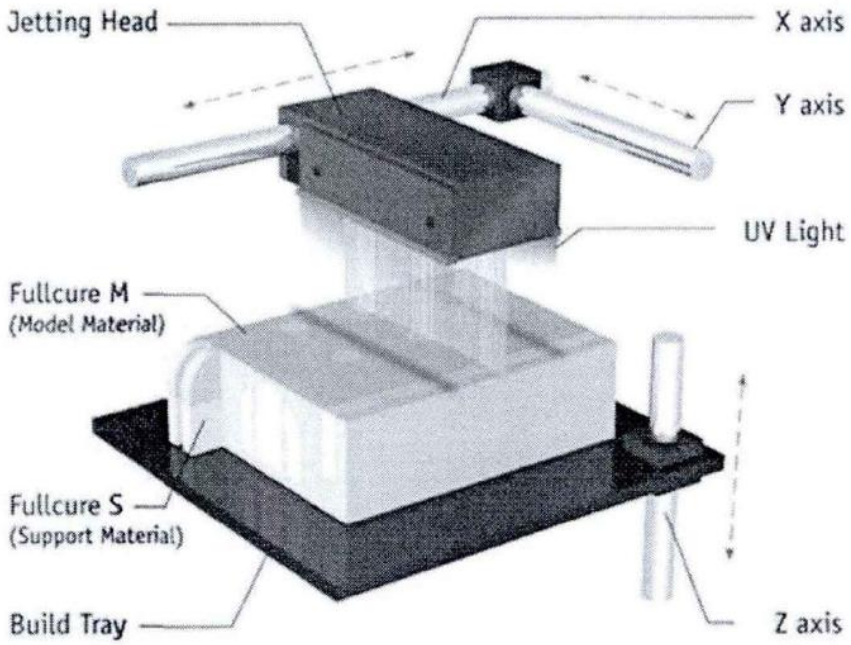


图 4-1 喷射树脂光固化 3D 打印机工作原理

4.1.2 激光固化快速成形 3D 打印

激光固化快速成形 3D 打印（SLA）是近几年比较成熟的一种光固化 3D 打印，技术较为成熟，基本取代了喷射型光固化 3D 打印。该种光固化 3D 打印光敏树脂与激光器在对立方向，激光器在上方扫描，光敏树脂在下方的树脂槽中，扫描一层，树脂槽的平台下降一层，

如此反复。成形过程如下：首先根据零件截面的形状，激光器选择性扫描，在既定截面的相关区域打印光敏树脂材料，在并在紫外光的照射下进行固化，然后树脂槽内部升降台沿 Z 轴下降一定高度，接着激光器打印固化下一层，如此逐层打印固化直至工件的完成，最后除去工件表面上残余的光敏树脂即可获得所需的工件。相对于上一代的喷射型光固化 3D 打印，该种打印方式除去了树脂的喷射，且添加了刮平工序，减少了光固化制件的翘曲与变形，可为传统的模具制造起到重大的作用。其工作原理如图 4-2 所示。

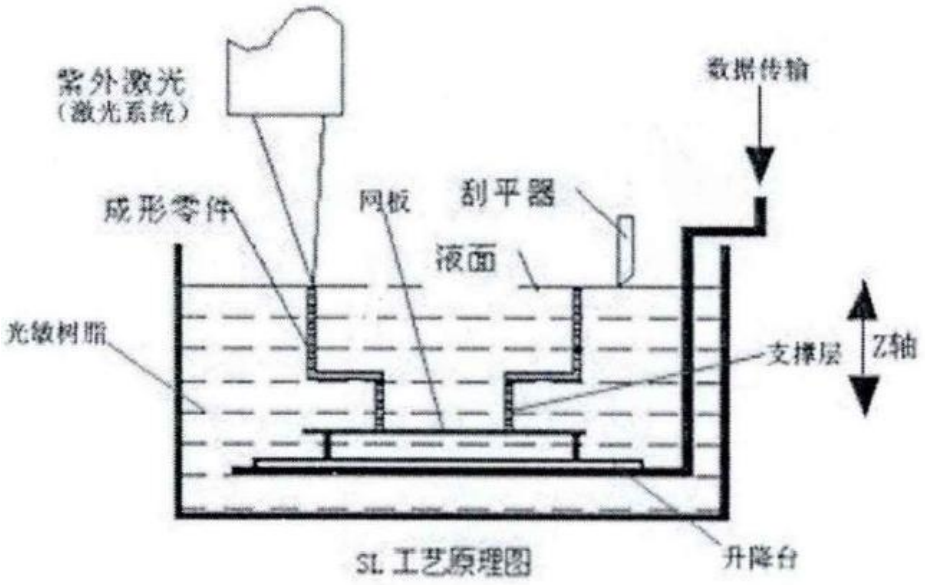


图 4-2 激光固化快速成形 3D 打印工作原理图

4.1.3 连续液体界面制造 3D 打印

第二种是最近由美国北卡罗纳大学的科研人员研发出来的一个新工艺，称之为连续液体界面制造（CLIP），在 2015 年 3 月这种光固化 3D 打印技术还登上了《Science》杂质的封面。这种光固化 3D 打印系统不同上面两种，即：打印、下降、再打印…，它是通过在树脂槽下部有一个投影设备，该投影设备会连续不断的用紫外线从下方

无形的切割物体的剖面，在树脂槽的底部有一个特殊的窗口，该窗口可以透过紫外线与氧气，氧气可以抑制树脂槽底部一层光敏树脂的固化，因而成为固化盲区，这样就可使打印的制品慢慢的往上提升而不会凝固在树脂槽底部，如此反复而成形。这种方法解决了上面两种方法始终不好解决的氧气对于光固化阻聚的问题，省去了刮平工序，速度极大的提升，并且表面更加的光滑，制品性能更加优异。相对于目前的 SLA 技术，连续液体界面制造（CLIP）把打印的速度提升了惊人的 20-100 倍。图 4-3 为连续液体界面制造工作原理。

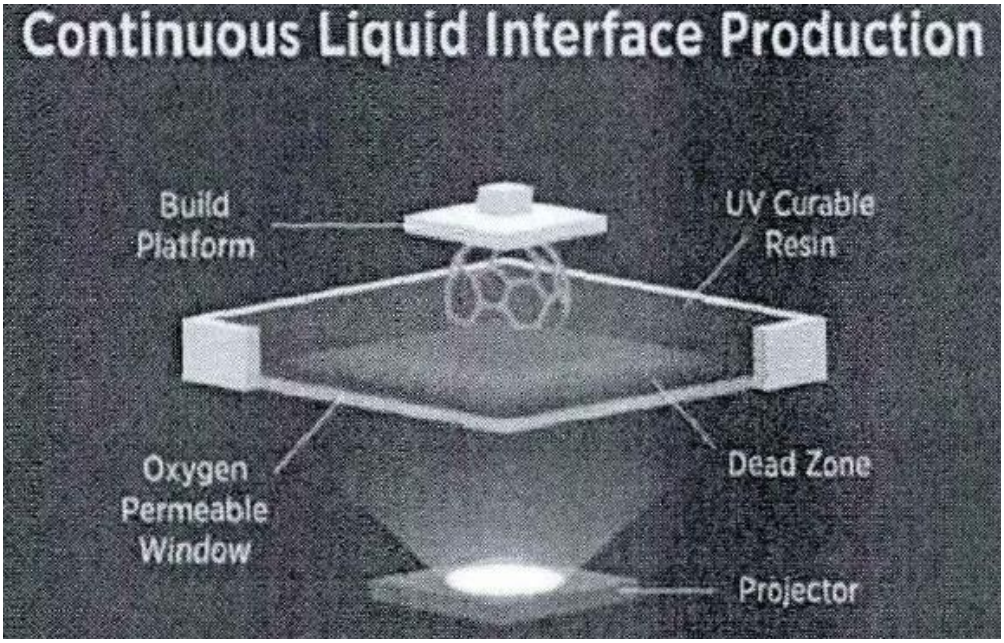


图 4-3 连续液体界面制造工作原理

4.2 光敏树脂的组成

光固化 3D 打印材料即为光敏树脂。光敏树脂，主要是利用激光照射光敏树脂，引起树脂辐射聚合，形成交联聚合物，产生固体材料液态。光敏树脂主要由预聚物、活性稀释剂、光引发剂以及其它添加剂共同组成。

4.2.1 预聚物

预聚物（也称为低聚物）是一种感光性树脂，含有不饱和官能团的低分子聚合物。齐聚物的分子末端都具有可以进行光固化反应的活性基团，主要为不饱和双键和环氧基团等，一经引发聚合，分子量就可从快速上升，迅速固化为固体。在一个光敏树脂配方中，齐聚物一般是用量最大的组分，可占到整个配方比例的 60%-90%，因而在一个光敏树脂配方中，齐聚物是最为基础的组分，决定了光敏树脂物理加工性能以及光固化制品的基本物理化学性能，如树脂粘度、制品硬度、固化制品的收缩变形、断裂伸长率等。因此在光敏树脂配方中，齐聚物的选用是十分重要的。

根据光敏树脂固化机理可以把光固化树脂分为自由基聚合的光敏树脂和阳离子聚合的光敏树脂。光敏树脂中低聚物占主要成分，选择时主要考虑以下方面；粘度（低粘度的低聚物在盛放光敏树脂的容器中，固化一层之后，其树脂可以更好的流向固化产品之上），力学性能，低聚物收缩率，毒性，刺激性，光固化速率，低聚物的玻璃化转变温度。表 4-1 常用 UV 固化预聚物结构和性能。

表 4-1 常用 UV 固化预聚物结构和性能

类型	固化速度	硬度	柔性	耐化学性	抗黄变性	抗张强度
不饱和聚酯	慢	高	不好	不好	不好	高
丙烯酸树脂	快	低	好	不好	极好	低
聚酯丙烯酸酯	可调	中	可调	好	不好	中
聚醚丙烯酸酯	可调	低	好	不好	好	低
环氧丙烯酸酯	快	高	不好	极好	中至不好	高
聚氨酯丙烯酸酯	快	可调	好	好	可调	可调

对于不同的引发反应体系，所选用的齐聚物也都是不相同的。活性基团根据其所处的空间结构的不同，其活性也是各不相同的，常用的树脂基团活性次序为：丙烯酰氧基>甲基丙烯酰氧基>乙烯基>烯丙基。因而，自由基光敏树脂体系常用的低聚物主要为各类丙烯酸树脂，如聚酯丙烯酸树脂、聚氨酯丙烯酸树脂、环氧丙烯酸树脂化及乙烯树脂等。阳离子光引发体系由于光引发剂的不同，所选用的齐聚物也是不相同的，阳离子体系的齐聚物具有环氧基团、或乙烯基醚基团，例如环氧树脂、乙烯基醚树脂。

由于齐聚物在光敏树脂中属于主要的成分，决定了固化产物的许多主要的各方面的性能，因此在选定光敏树脂配方中的齐聚物的时候需要考虑很多因素。主要有下方面：

①粘度 粘度可以用来衡量光敏树脂的流动性、可加工性的一个重要指标，适当的粘度可以提高制作速度和制件的精确程度。选用粘度较低的齐聚物，就可以减少活性稀释剂的使用，这样固化产物的固化收缩率可以降低。

②光固化速度 由于使用紫外激光 3D 打印机打印，激光都是短时间内扫描发生反应，必须选用光固化速度快的齐聚物，化满足 3D 打印机的需要。

③物理力学性能 齐聚物作为光敏树脂主体影响着光敏树脂的粘度，加工性能以及光固化制件的硬度、柔初性、经曲变形、拉伸强度、耐磨性等力学性能，一般光能度高、分子链中含有苯环，硬度强度耐磨性高，含有脂肪族碳链，制件韧性好。

④制品的固化收缩率 对于3D打印，制件的固化收缩率是一个千分重要的性能指标，若固化收缩率较高，则在打印过程中制件容易变形，既影响制件的形状，也会影响制件的性能。一般光能团越多的齐聚物，固化时交联密度越大，固化制品的收缩率也随之增加。

⑤毒性和刺激性 由于光固化3D打印未来是小型化、办公室化，光敏树脂必须具有低毒或无毒化，对于人体无明显刺激性。

4.2.2 活性稀释剂

活性稀释剂又被称为活性单体，是具有可以发生聚合的有机分子，其结构中含有特殊的聚合官能团，活性稀释剂添加到光敏树脂中与光敏树脂经光固化时本身也发生光固化过程，同时，活性稀释剂本身的力学性能也会影响光敏树脂固化产品的性能。活性稀释剂是光敏树脂最主要的一个组成部分，降低预聚物的粘度，使得光敏树脂材料在3D打印机上使用。所以，活性稀释剂的选择和添加比例光敏树脂材料也非常重要。

从结构上看，通过自由基引发的活性单体都具有碳碳双键，例如乙烯基、甲基丙烯酰氧基、丙烯基等，因而自由基的活性单体主要是一些丙烯酸酯类的单体。而阳离子光固化体系所用的活性单体大都是具有环氧基或者乙烯基醚的单体。由于乙烯基醚类的活性单体的特殊性（既可用自由基光引发剂引发也可以用阳离子型光引发剂引发），因此可作为两种光固化体系的活性单体。

根据每个活性单体分子所含的可进行反应的基团的多少进行划分，可分为单官能团丙稀酸酯、双官能团丙稀酸酯、多官能团丙稀

酸酯等。单官能团活性单体中，每个分子有且仅有一个反应性基团可以参与反应，分子量较小，粘度低，稀释能力强。同时由于单官能团使得光固化速度下降，在常湿条件下单官能团活性单体易挥发，气味大。多光能团的活性单体由于每个分子中都含有两个或两个以上的可反应官能团，单体活性增加，光固化速度增强，粘度小且挥发性较小，气味低。随着活性单体官能度的增加，体系粘度上升，加工成形变得困难，其收缩率也会相应增加，从而影响制品性能。活性单体中可以参加光固化反应的活性基团越多，整个光固化反应体系的光固化速度也就越快，随着活性单体官能度的增加，一方面可增加光固化反应的活性，另外还可同时提升整个体系的交联密度。如果仅仅是单官能度的活性单体，则反应体系只能生成线性聚合物，不能够发生交联。只有当活性单体的官能度≥2 时，固化体系才能发生交联反应，得到交联聚合物。固化体系的交联程度的高低对于固化产物的力学性能和化学性能有较大影响。表 4-2 为几种活性稀释剂对光固化树脂性能的影响。

表 4-2 几种常见的活性稀释剂对光固化树脂性能的影响

活性单体	丙烯酸-β－羟乙酯	邻苯二甲酸二丙烯酸酯	二缩三乙二醇二丙烯酸酯	双官能度单体（D）	丙烯酸异冰片酯
粘度（25℃，Pa·s）	20	9	15	25	9
固化时间（s）	20	40	30	20	50
强度	用力即断	用力即断	不易折断	不易折断	易断

在选择活性单体时需要考虑以下因素：

①活性单体粘度要低，稀释能力要强，以增强树脂可加工性能。

②鉴于 3D 打印前景，活性单体应该具有低毒性、低气味、低挥发、低刺激性。

③要有低的体积收缩率，以防止打印制品的翘曲与变形。

④较高的反应性，光扫描速度较快，要求活性单体必须有较高的反应性，否则层与层之间粘结性会很差，影响力学性能。

⑤高溶解性，活性单体作为稀释剂，需要能够较好的溶解粘度较高的低聚物以及光引发剂。

4.2.3 光引发剂

光引发剂（Photoinitator，PI）经紫外光可以产生活性中间体，从而可以使光敏树脂发生辐射交联，使小分子聚合，不同的光引发剂对树脂的固化速率不同，光引发剂在整个光固化产品中的用量小于 3%，而且在光聚合过程中，光引发剂对固化后样品性能并没有影响。吸收波长在紫外光区（250 nm~420 nm）的引发剂称为紫外光引发剂。光引发剂包括自由基型和阳离子型。由于不同的反应机理，自由基型光引发剂可分为裂解型和夺氢型的自由基光引发剂。 目前主要的几类光引发剂有：大分子光引发剂、大分子助引发剂、自由基-阳离子混杂光引发剂以及水性光引发剂等新型光引发剂。

1) 阳离子型光引发剂

阳离子型光引发剂引发机理与过程为；紫外光的照射，阳离子型光引发剂生成路易斯酸或者质子酸，进而形成阳离子活性中心，齐聚物和活性稀释剂在活性中也的作用下发生反应。相对于自由基型光引发剂，阳离子型光引发体系有以下优点：受氧阻聚的影响小，但对于

水汽、碱类等物质比较敏感，容易导致阻聚；阳离子光敏树脂大都含有环氧基团，固化时体积收缩小易得到控制；阳离子光固化速度较慢，对光固化环境的温度依赖性较大，打印时紫外光扫描速度过快易导致制品性能下降；由于带正电荷的基团不会发生偶合作用而消失，所阳离子引发剂产生的活性中间体很稳定，可以长时间存在，即使紫外光扫描过后，仍然能够发生反应交联固化。目前常用的阳离子型光引发剂主要有：二芳基碘鎓盐、重氮盐、烷基硫鎓盐、铁芳烃盐等。图4-4 为几种常用的阳离子引发剂分子式。

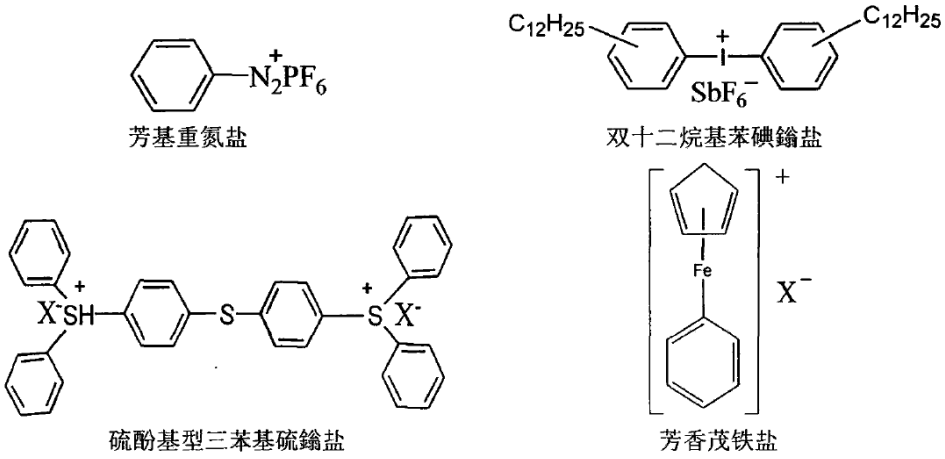
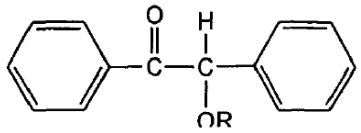


图 4-4 几种典型的阳离子型光引发剂

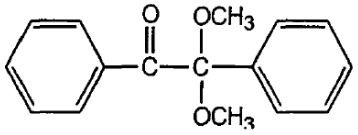
2) 自由基型光引发剂

自由基型光引发剂在紫外光的作用下产生活性自由基，接着活性自由基引发齐聚物和反应性稀释剂发生反应，单体和齐聚物的双键不断以连锁反应机理迅速聚合加成固化。自由基光引发剂体系优点有固化速度快、成本低、体系粘度小等，其缺点也是很明显的，例如受表面氧的干扰，制件精度有所降低：反应后产生的应力变形大；主要引发双键聚合反应，固化时体积收缩率较大，成形制件翘曲变形大等。

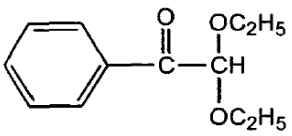
裂解型自由基光引发剂，通常也称为ＰⅠ型光引发剂，这类光引发剂的主要原理是光引发剂分子吸收紫外光光能发生能级跃迁产生激发态，其激发态处于不稳定状态，其中较弱的键发生均裂，生成初级活性自由基，从而引发光敏树脂聚合交联。裂解型自由基光引发剂大多是芳基烷基酮类化合物，图 4-5 为几种裂解型自由基光引发剂。



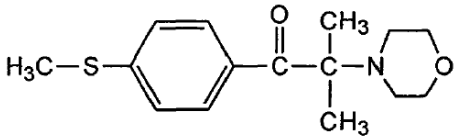
苯偶姻及其衍生物



a,a´-二甲基苯偶酰缩酮



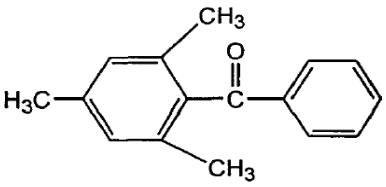
a,a´-二乙氧基苯乙酮



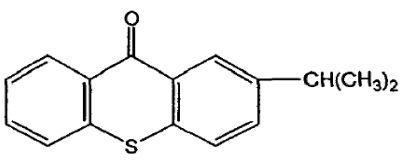
2-甲基-1-（4 甲巯基苯基）-2-吗啉-1-丙酮

图 4-5 几种常见的裂解型自由基光引发剂

夺氢型自由基光引发剂，通常也称为ＰⅡ型光引发剂，这类光引发剂吸收光能后，经系间窜越至三线激发态，进而从活性单体、低聚物分子上夺取氢原子，使其成为活性自由基引发光敏树脂聚合。不同于裂解型光引发剂的是夺氢型光引发剂需要助引发剂进行配合光固化才能达到好的效果，助引发剂一般为脂肪族叔胺、乙醇类叔胺、叔胺型苯甲酸酯等叔胺类化合物。夺氢型自由基光引发剂都是杂环芳酮类或二苯甲酮类化合物。图 4-6 为典型的夺氢型自由基光引发剂。图 4-7 为夺氢型自由基引发剂的助引发剂。

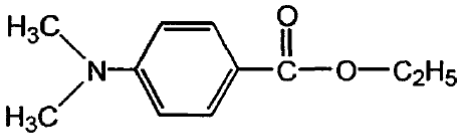


2,4,6-三甲基二苯甲酮



异丙基硫杂蒽酮

图 4-6 两种典型的夺氢型自由基光引发剂

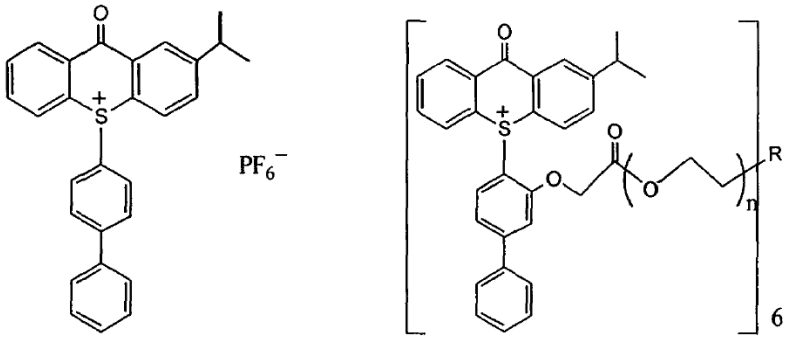


N,N-二甲基苯甲酸乙酯（助引发剂）

图 4-7 夺氢型自由基引发剂的助引发剂

3) 自由基-阳离子混杂型光引发剂

混杂型光引发剂是既含有能引发自由基聚合的反应，又含有能引发阳离子聚合反应的一类引发剂。由于自由基光引发体系收缩大、翘曲形变大、受氧干扰严重、固化速度快等特点，而阳离子光引发剂体系诱导期长、体积收缩小、受氧阻聚小等特点。因而开发了混杂型光引发剂，这类引发剂结合了自由基引发剂与阳离子型光引发剂，使两者相互补充获得更加稳定可靠的引发体系。如果以混杂型光引发剂引发光敏树脂体系发生反应，整个体系还有可能形成互穿网络的结构，从而可改善制件的力学性能。图 4-8 为 IGM 公司与北京英力科技发展公司共同合作研发的含自由基和阳离子双引发基团的混杂光型引发剂 Omnicat 550 和 Omnicat 650。



Omnicat550　　Omnicat650

图 4-8 两种混杂型光引发剂

以上三种光固化引发剂体系各有其优缺点，在进行实际应用的时候，应根据生产所需选择适当的引发剂体系。表 4-3 为三种光引发剂的比较。

表 4-3 三种光引发剂的比较

体系	固化速度（相对）	收缩率	引发剂价格
自由基	快	大	低
阳离子	慢	小	高
混杂型	中等	中等	中等

4) 其它种类的光引发剂

除了上述三种常用的光引发剂外，也有一些其他的类型的光引发剂。例如为了改善小分子引发剂的相容性、迁移性、气味等缺点的大分子光引发剂；用水代替活性稀释剂来调节树脂粘度，应用在此体系的水基光引发剂；可以运用可见光作为能量来源，在可见光的波段内引发聚合的可见光引发剂等。

4.2.4 其它助剂

在一个光敏树脂配方中，除了上述的低聚物、活性单体、光引发剂三种核心物质外，还必须含有一些它的助剂，运些助剂在光固化材料配方中虽然不如上面几种重要，但是对于产品最后的品质也十分重要。根据光固化材料使用场合的不同助剂也有所不同。

①颜料：颜料分为无机颜料与有机颜料，无机颜料多为金属氧化物，价格便宜，有较好的耐光性、耐热性以及较强的机械强度，但种类少，光泽偏暗；有机颜料颜色种类齐全，色彩鲜艳明亮，着色力强，分散性好，但是生产工艺复杂，价格较贵。

②填料：填料一般为天然矿物料，来源广泛，化学稳定性好，便宜，能够均匀的分散在基体树脂中。常用的填料有蒙脱土、碳酸钙、氢氧化铝、高岭土等，由于它们的折射率与低聚物、活性单体接近，因而在光敏树脂中，这些填料是＂透明＂的，不会影响光敏树脂吸收紫外光。加入填料主要是降低配方成本，同时也能影响树脂的流变性，应用改性填料，还可以增加填料与基体材料的连接性，增加固化产物的力学性能、耐磨性与耐久性。

③消泡剂：在光敏树脂中加入消泡剂后，能迅速分散成微小的液滴，最后气泡快速铺展，导致分子膜破裂，达到消泡的目的。光敏树脂在配置搅拌混合中会产生气泡，加入的流平剂、润湿剂等也会出现气泡，在打印过程中的刮平、平台下降时也会出现气泡。气泡的存在会使得打印制品变形、形成应力集中点，影响制品的力学性能，因而必须加入消泡剂进行抑制。常用的消泡剂有有机改性化合物、矿物油、低级醇（乙醇、正丁醇等）、有机硅树脂等。

④流平剂：流平剂主要用来提高光敏树脂流动性能，使树脂能够流平的一种助剂。光固化 3D 打印过程中，每一层打印完成后都需要刮平进行下一次的打印，如果流平性不好，刮平后会出现流挂、粗超、高低不平等现象，最后造成制件发生翘曲变形甚至是难以成形，因此光敏树脂液面的平整、光滑、均匀至关重要。

⑤消光剂：任何物体的表面都能或多或少的对光进行反射，这是物体的一种固有特性。当物体表面受到光线照射时，物体会由于表面的光滑程度不同而将光线不同程度向四周散射。光固化 3D 打印中，

紫外光向下在光敏树脂表面扫描，如果光敏树脂的表面光泽度过高，会使得紫外光发生折射，这样会使得当前固化层固化不完全，累计下来会使制件变形、力学性能大幅度降低。消光剂就是能够使光敏树脂表面产生一定的粗糙程度，明显降低树脂表面光泽度的助剂。其折射率应该尽量接近光敏树脂的折射率，这样可以使光敏树脂的透明程度，颜色不受影响。

⑥阻聚剂；由于光敏树脂具有较高反应活性，低聚物与活性单体都是高反应性的丙烯酸脂类，引发剂又极易产生活性种，这样的混合体系极易受到外界的光、热作用而引发反应，导致光敏树脂变质，难长时间的存储，因而需要加入阻聚剂进行调节。阻聚剂就是能够阻止聚合反应发生的试剂，空气中的氧气就是一种很好的阻聚剂，自身是双基自由基，与光敏树脂体系中的自由基结合，生成过氧化自由基，使得引发活性大大的降低，从而起到阻聚的作用，常用的阻聚剂有：酚类、醌类、芳胺类等。

第五章 3D 打印无机非金属材料

无机非金属材料，是以某些元素的氧化物、碳化物、氮化物、卤素化合物、硼化物以及硅酸盐、铝酸盐、磷酸盐、硼酸盐等物质组成的材料。是除有机高分子材料和金属材料以外的所有材料的统称。无机非金属材料的提法是 20 世纪 40 年代以后，随着现代科学技术的发展从传统的硅酸盐材料演变而来的。无机非金属材料是与有机高分子材料和金属材料并列的三大材料之一。

在晶体结构上,无机非金属的晶体结构远比金属复杂，并且没有自由的电子。具有比金属键和纯共价键更强的离子键和混合键。这种化学键所特有的高键能、高键强赋予这一大类材料以高熔点、高硬度、耐腐蚀、耐磨损、高强度和良好的抗氧化性等基本属性,以及宽广的导电性、隔热性、透光性及良好的铁电性、铁磁性和压电性。

无机非金属材料是 3D 打印材料的重要成员。由于无机非金属材料的熔点远高于金属或者高分子材料，无法直接用激光用激光烧结或热烧结的方法进行加工，因此成形时必须加入粘结剂。3D 打印用无机非金属材料主要包括用于构建骨架的无机粉末和用于塑性的粘结剂两个部分。而两者必须满足一定的条件才可用于 3D 打印。

5.1 陶瓷 3D 打印材料

陶瓷是陶器与瓷器的统称。传统陶瓷又称普通陶瓷，是以粘土等天然硅酸盐为主要原料烧成的制品，现代陶瓷又称新型陶瓷、精细陶瓷或特种陶瓷。常用非硅酸盐类化工原料或人工合成原料，如氧化物（氧化铝、氧化锆、氧化钛等）和非氧化物（氮化硅、碳化硼等）制

造。陶瓷具有优异的绝缘、耐腐蚀、耐高温、硬度高、密度低、耐辐射等诸多优点，已在国民经济各领域得到广泛应用。传统陶瓷制品包括日用陶瓷、建筑卫生陶瓷、工业美术陶瓷、化工陶瓷、电气陶瓷等，种类繁多，性能各异。随着高新技术工业的兴起，各种新型特种陶瓷也获得较大发展，陶瓷已日趋成为卓越的结构材料和功能材料。它们具有比传统陶瓷更高的耐温性能，力学性能，特殊的电性能和优异的耐化学性能。

陶瓷 3D 打印主要运用的材料按照形态可分为浆材、粉材、丝材、片材。浆材一般由有机物液体和陶瓷粉末混合搅拌制得，主要应用于 DIW 技术、SLA 技术，粉材是陶瓷粉末有机物颗粒的混合粉末或陶瓷粉末，主要应用于 SLM 技术、SLS 技术、3DP 技术，丝材主要是应用于 FDM 技术的热熔性丝状材料，片材指陶瓷材料薄膜，主要用于 LOM 技术。

磷酸三钙陶瓷（TCP）

磷酸三钙陶瓷（TCP）又称磷酸三钙，存在多种晶型转变，主要分为 β-TCP 和 α-TCP。磷酸三钙的化学组成与人骨的矿物相似，与骨组织结合好，无排异反应，是一种良好的骨修复材料。磷酸三钙天然的生物学性能使其多用于医学领域。

氧化铝陶瓷

氧化铝陶瓷是氧化物陶瓷中应用最广、用途最宽、产量最大的陶瓷材料。氧化铝陶瓷具有高抗弯强度、高硬度、优良的抗磨损性等特性，被广泛地应用于制造刀具、磨轮、球阀、轴承等，其中以 Al2O3

陶瓷刀具应用最为广泛。传统工艺制备氧化铝陶瓷件工序复杂、生产时间长，3D 打印技术大幅提高了氧化铝陶瓷的生产效率，并降低了生产成本。

陶瓷先驱体

陶瓷先驱体是用化学方法合成的一类聚合物。陶瓷先驱体在惰性气体保护的热处理过程中热解成 SiC，Si3N4，BN，AlN，SiOC，SiNC 等陶瓷基复合材料。陶瓷先驱体普遍具有稳定化学性能及优良的力学性能和独特的电学性能，目前许多研究利用几种陶瓷先驱体进行交联或向陶瓷先驱体混入其他化学物质等方法以期获得更卓越的性能。

SiC 陶瓷

SiC 陶瓷又称金刚砂，具有高的抗弯强度、优良的抗氧化性与耐腐蚀性、高的抗磨损以及低的摩擦因数等高温力学性能。SiC 陶瓷在已知陶瓷材料中具有最佳的高温力学性能（强度、抗蠕变性等），其抗氧化性在所有非氧化物陶瓷中也是最好的。

Si3N4 陶瓷

Si3N4 陶瓷具有高强度、低密度、耐高温等特性，是一种优异的高温工程材料。它的强度可以维持到 1200℃的高温而不下降，受热后不会熔成融体，一直到 1900℃才会分解，并且具有极高的耐腐蚀性，同时也是一种高性能电绝缘材料。

碳硅化钛陶瓷

碳化钛陶瓷的主要成分为碳化钛硅化合物（Ti3SiC2），是一种新型陶瓷材料。Ti3SiC2 不仅具有陶瓷的优良性能（较高的熔点、热

稳定性、屈服强度和高温强度及良好的耐腐蚀性和抗氧化性），还兼具了金属的优异性能（常温时具有良好的导热、导电性能）

1、陶瓷 3D 打印技术的发展趋势

陶瓷 3D 打印有诸多优点，例如：复杂的生产程序变得简单化，极大减少了人力和物力的投入，缩短了产品制造的时间，节约了材料，降低了成本，解决结构复杂零件难以加工的问题。目前，陶瓷 3D 打印的市场需求主要包括以下 3 个方面：

1)与传统陶瓷工艺相结合，实现陶瓷制品的快速生产。一般陶瓷制品如日用陶瓷产业，须应对多样化的市场需求，应加快产品的开发、生产速度，满足客户的定制要求。传统陶瓷制造工艺包括注浆成型、压制成型等。传统陶瓷制造工艺周期长，后期再加工工艺繁琐，且在制作特殊形状制品时需要不同的模具，无法同时满足定制客户对于时间及式样的双重需求。陶瓷 3D 打印满足市场发展需要，在陶瓷工业的升级转型中脱颖而出。

2)生物陶瓷制品的制造。生物陶瓷主要应用于医学方面，生物陶瓷特有的可降解性使其主要应用于医用支架等。生物陶瓷 3D 打印将带动高端医疗领域的突破发展。

3)高性能陶瓷功能零件。陶瓷具有优良的化学性能、物理性能和力学性能，例如高强度、高硬度、耐磨、耐高温、耐腐蚀、防潮、良好的绝缘性、一定的抗急冷急热等。高性能陶瓷零件在航空航天、高端武器、船舶、汽车、电子等领域具有良好的应用前景，如可在航天

飞机上应用的耐高温陶瓷片等，陶瓷 3D 打印技术的应用将使陶瓷零件在高精尖领域具有极大的发展前景。

陶瓷 3D 打印的产业化应用还未全面成型，其难点在于实现其高效率、高品质的生产，同时高致密度的大型复杂零件的制造也是其亟待解决的问题；因此对陶瓷 3D 打印设备及材料的研究引起了国内外学者的广泛关注。近年来我国对增材制造的发展愈加重视，实现陶瓷 3D 打印开展大规模产业化应用将是我国乃至世界的发展目标。

国外对于陶瓷 3D 打印的研究较国内成熟许多，尤其是在生物陶瓷制品即医学方面的应用。我国 3D 打印研究起步较晚，经国家政策大力支持，目前我国许多高校成立了实验室并出现了一批生产 3D 打印机的企业，但是针对陶瓷 3D 打印开展大规模产业化应用仍十分困难。

陶瓷 3D 打印的出现对陶瓷产业的影响作用是巨大的，并且对陶瓷应用于航空航天、高端武器、电子等高精尖产业的推动和带来的效益无法估量。根据我国科技部组织制定的《“十三五”先进制造技术领域科技创新专项规划》，可预见陶瓷 3D 打印光明的发展前景。

5.2 石膏材料

5.2.1 石膏材料简介

石膏为长块状或不规则形纤维状的结晶集合体，大小不一，全体白色至灰白色，大块的石膏上下两面平坦，无光泽及纹理，体重质松，易分成小块。石膏的化学本质是硫酸钙，通常所说的石膏是指生石膏，化学本质是二水硫酸钙（$CaSO4\cdot 2H2O$）。当其再干燥条件下 128℃

是会失去部分结晶水变为β-半水石膏，其化学本质是β-半水硫酸钙（β-CaSO4·1/2H2O），如果其在饱和蒸汽压在时会失去部分结晶水变为α-半水石膏，其化学本质是α-半水硫酸钙（α-CaSO4·1/2H2O），这两个半水石膏化学式相同，结构不同。它们继续脱去结晶水形成无水石膏，化学本质是无水硫酸钙（CaSO4）。

二水硫酸钙和无水硫酸钙用途比较广泛，在食品、农业、化工、涂料等多方面都用应用。半水硫酸钙具有较好凝胶性质遇水可固结形成一定强度的材料，其中β-半水硫酸钙多用于建筑行业，α-半水硫酸钙多用于模具制造等。

5.2.2 硫酸钙（石膏）材料的特点

石膏是以硫酸钙为主要成分的气硬性胶凝材料，由于石膏胶凝材料及其制品有许多优良性质，原料来源丰富，生产能耗低，因而被广泛地应用于土木建筑工程领域。

石膏的微膨胀性使得石膏制品表面光滑饱满，颜色洁白，质地细腻，具有良好的装饰性和加工性，是用来制作雕塑的绝佳材料。石膏材料相对其他诸多材料而言有着诸多优势。

1）精细的颗粒粉末，颗粒直径易于调整。

2）价格相对低，性价比高。

3）安全环保，无毒无害。

4）模型表面：沙粒感、颗粒状。

5）颜色：材料本身为白色，打印模型可实现彩色。

6）典型应用：唯一支持全彩色打印的材料，建筑模型展示。

5.2.3 石膏在 3D 打印中的应用

1、骨折部位支撑保护架

骨折事件本身并不是最悲惨的，最糟糕的是骨折后将要采取的治疗。骨折后一般会在骨折部位打石膏，人们的行动会十分不便。这种保护架可针对每个病人进行个性化设计，并可依据受伤的严重程度设计。此外，这种框架仅仅会保护受伤部位，其他部位则不需要被固定。毕业于新西兰维多利亚大学的学生利用三维打印机创建出一种新型石膏，这种石膏重量较轻，且可进行弯曲。这种保护架可针对每个病人进行个性化设计，并可依据受伤的严重程度设计。此外，这种框架仅仅会保护受伤部位，其他部位则不需要被固定。这种新型石膏的优点在于其轻便耐用的设计，且可以清洗，有助于皮肤“呼吸”。

2、快速成型石膏人偶

克隆就是复制、拷贝和翻倍一个物品。武汉光谷商家引进 3D 色彩人像摄影新技术系统已经开始投入运行，该技术采用专业扫描仪，对人体进行快速立体扫描，在电脑上存储数据，运用高强度复合石膏粉，经过 3D 打印机很快就可以“打”出 15 至 30 厘米不等的“人偶”。

3、骨骼打印

高纯度半水硫酸钙，具有良好的生物相容性、生物可吸收性、骨传导性、快速吸收特性、易加工性和高机械性能等优点，凭借这些优势，最早应用在整形外科或齿科材料中。众多研究结果均表明，硫酸钙基材料可以用作骨修复材料，也是最早应用于组织修复的材料。

3D 打印衣服、鞋子、汉堡等已不是新鲜事了，据国外媒体报道，美国的一名患者成功接受一例具有开创性的手术，用 3D 打印头骨替代 75%的自身头骨。不仅如此，我们还希望利用 3D 打印为更多的患者修复其他部位的缺失或者受损的骨骼。当然，在选择打印材料的同时，我们推荐选用纯天然、安全环保、无毒无害的硫酸钙（石膏）。

3D 打印机为了适合不同行业的需求，提供“轻盈小巧”和“大尺寸”的多样化选择。已有多款小巧的 3D 打印机，并在不断挑战“轻盈小巧”极限，为未来进入家庭奠定基础。而打印材料的发展也尤为重要，3D 打印全靠有“米”下锅，石膏作为性价比高的打印材料，取材广泛，价廉宜得，毒副作用极小，随着人们研究的深入，石膏在 3D 打印方面的应用将有更广阔的发展前景。

第六章 3D 打印生物材料

生物材料(Biomaterials)是用于与生命系统接触和发生相互作用的，并能对其细胞、组织和器官进行诊断治疗、替换修复或诱导再生的一类天然或人工合成的特殊功能材料，又称生物医用材料。生物材料是材料科学领域中正在发展的多种学科相互交叉渗透的领域，其研究内容涉及材料科学、生命科学、化学、生物学、解剖学、病理学、临床医学、药物学等学科，同时还涉及工程技术和管理科学的范畴。生物材料有人工合成材料和天然材料；有单一材料、复合材料以及活体细胞或天然组织与无生命的材料结合而成的杂化材料。生物材料本身不是药物，其治疗途径是以与生物机体直接结合和相互作用为基本特征。

自 90 年代后期以来，世界生物材料科学和技术迅速发展，即使在当今全球经济低迷的大环境下，生物材料依然保持着每年 13%高速增长，充分体现了其强大的生命力和广阔的发展前景。现代医学正向再生和重建被损坏的人体组织和器官、恢复和增进人体生理功能、个性化和微创治疗等方向发展。传统的无生命的医用金属、高分子、生物陶瓷等常规材料已不能满足医学发展的要求，生物医学材料科学与工程面临着新的机遇与挑战。未来，生物医用材料的市场占有率大有可能将赶上药物。因此，加强生物医用材料的临床应用研究和推广应用，重点发展我国生物医用材料的研究、开发、生产、营销紧密结合的一体化体系是当务之急。 实际上，国家当前在生物材料科学基础研究方面已经取得了重大突破进展，走在了世界先进行列，但产业化

水平尚待提高，产业规模小、发展相对滞后，还不能满足全民医疗保健的实际需要。在国家政策、经济的大力支持下，我国生物材料的产业化发展将提速。企业应增强自主创新的能力，进一步解决依靠进口的局面，同时加大出口力度，实现跨越发展，扩大中国生物材料产品在国际上的影响力。

生物材料应用广泛，品种很多，其分类方法也很多。生物材料包括金属材料（如碱金属及其合金等）、无机材料（生物活性陶瓷，羟基磷灰石等）和有机材料三大类。有机材料中主要是高分子集合物材料，高分子材料通常按材料属性分为合成高分子材料（聚氨酯、聚酯、聚乳酸、聚乙醇酸、乳酸乙醇酸共聚物及其他医用合成塑料和橡胶等）、天然高分子材料（如胶原、丝蛋白、纤维素、壳聚糖等）；根据材料的用途，这些材料又可以分为生物惰性（Bioinert）、生物活性（Bioactive）或生物降解（Biodegradable） 材料，高分子聚合物中，根据降解产物能否被机体代谢和吸收，降解型高分子又可分为生物可吸收性和生物不可吸收性。根据材料与血液接触后对血液成分、性能的影响状态则分为血液相容性聚合物和血液不相容性。根据材料对机体细胞的亲和性和反映情况，可分为生物相容性和生物不相容性聚合物等。

生物材料主要用在人身上，对其要求十分严格，必须具有四个特性：

⑴生物功能性。因各种生物材料的用途而异，如：作为缓释药物时，药物的缓释性能就是其生物功能性。

⑵生物相容性。可概括为材料和活体之间的相互关系，主要包括血液相容性和组织相容性（无毒性、无致癌性、无热原反应、无免疫排斥反应等）。

⑶化学稳定性。耐生物老化性（特别稳定）或可生物降解性（可控降解）。

⑷可加工性。能够成型、消毒（紫外灭菌、高压煮沸、环氧乙烷气体消毒、酒精消毒等）。

生物材料的性能要求主要包括：生物相容性、力学性能、耐生物老化性能和成形加工性能。其中，生物相容性主要包括血液相容性、组织相容性。材料在人体内要求无不良反应，不引起凝血、溶血现象，活体组织不发生炎症、排拒、致癌等。此外，材料要有合适的强度、硬度、韧性、塑性等力学性能以满足耐磨、耐压、抗冲击、抗疲劳、弯曲等医用要求，在活体内要有较好的化学稳定性，能够长期使用，即在发挥其医疗功能的同时要耐生物腐蚀、耐生物老化。

目前3D打印技术被广泛应用到生物医学领域，不仅包括骨骼、牙齿、人造肝脏、人造血管、药品制造等的实体制造，而且在国际上也开始将此技术用于器官模型的制造与手术分析策划，个性化组织工程支架材料和假体植入物的制造，以及细胞或组织打印等方面的应用中。据报道，2013年12月剑桥大学再生医疗研究所开创性地通过3D打印技术，用大鼠视网膜的神经节细胞和神经胶质细胞制备得到具有三维结构的人工视网膜。该人工视网膜细胞打印出来后存活率高，并且仍具有分裂生长能力，这一突破性的进展为人类治愈失明带来了希

望。目前已经可以利用 3D 打印技术和仿生材料制备一些无细胞的修复材料，并且已经在临床上有所应用。未来，可以利用 3D 打印技术打印出具有生物活性的人体器官，实现人造器官的临床应用。此外，3D 打印技术可以用于个性化治疗，降低治疗成本，将来开发更多的生物相容性和生物降解材料，与 3D 打印技术相结合可以减轻因材料的不足而对人体产生的伤害。这样一来 3D 打印技术必将引领医疗领域的革命潮流。

6.1 医用金属材料

3D 打印的生物医用材料多为塑料，而金属材料具有比塑料更好的力学强度、导电性以及延展性，使其在硬组织修复研究领域具有天然的优越性。金属的熔融温度比较高，打印的难度较大，所以金属 3D 打印一般采用光固化 3D 打印（SLA）和选择性激光烧结（SLS）方式加工，由金属粉末在紫外光或者高能激光的照射下产生的高温实现金属粉末的熔合，逐层叠加得到所需的部件。目前用于生物医学打印的 SAHOD 料主要有钛合金、钴铬合金、不锈钢和铝合金等。西安第四军医大学西京骨科医院骨肿瘤科郭征教授带领的团队，采用金属 3D 打印技术打印出与患者锁骨和肩胛骨完全一致的钛合金植入假体，并通过手术成功将钛合金假体植入骨肿瘤患者体内，成为世界范围内肩胛带不定形骨重建的首次应用，标志着３Ｄ打印个体化金属骨骼修复技术的进一步成熟。

与传统个体化植入假体制备技术相比，锁骨、肩胛骨等不定形骨的 3D 打印个体化钛合金植入假体具有更高的匹配性，功能及外形也

更加得到患者和医生的认可；多孔设计石骨及软组织附着长入率高；弹性模量降低，减少应力遮挡并发症；产品质量稳定，精确度可达到1 mm；制备周期短等优势。目前该技术的缺点就是打印材料昂贵，需要患者承受较大的经济负担，难以实现平民化。中国科学院理化技术研究所利用低熔点金属 3D 打印技术，如液态金属 $Ga_{67}In_{20.5}Sn_{12.5}$ 合金（熔点约为 11℃），结合微创手术的方式直接在生物体内目标组织处注射成型医疗电子器件进行了创新性的研究。他们先将生物相容的封装材料（如明胶）注射到生物组织内固化形成特定结构，再用工具(如注射针头)在固化的封装区域内刺入并拔出以形成电极区域，最后将导电金属墨水，绝缘型墨水乃至配套的微/纳尺度器件等顺次注射后形成目标电子装置。通过控制微注射器的进针方向、注射部位、注射量、针头移位及速度这样的 3D 打印步骤，可以在目标组织处按预定形状及功能构建出终端器件。他们利用该技术在生物体组织内制备出 3D 液态金属 REID 天线，采用这种生物体内 3D 打印成型技术制作的柔性器件以其较高的顺应性、适形化，以及微创性与低成本特点显示出良好的应用前景，在植入式生物医用电子技术领域具有重要意义。

随着纳米 3D 打印技术的出现和发展，纳米粉末打印材料成为了研究者们热议的话题，金属粉末占据了 3D 打印粉末市场的主要位置。先进的纳米结构粉末对超细的晶体结构要求高，纳米结构粉末可以显著改善打印成品的物理化学力学性能，这些性能的提升将进一步拓宽

其在生物医学领域的应用。然而，因为加工困难、低生产效率和高成本，这些纳米粉末的产业化和商业化还是非常困难的。

6.2 医用无机非金属材料

无机非金属生物材料主要包括生物陶瓷、生物玻璃、氧化物及磷酸钙陶瓷和医用碳素材料。其中，生物陶瓷具有高硬度、高强度、低密度、耐高温、耐腐蚀等优异性能，在医学骨替代品、植入物，齿科和矫形假体领域有着广泛的应用。但生物陶瓷韧性不高，硬而脆的特点使其加工成形困难，尤其是形状或内部结构复杂陶瓷部件需通过模具来成形，而模具加工价格昂贵且开发周期长，难以满足产品的需求。近年来，针对生物陶瓷制作工艺复杂、成型加工困难的问题，研究者们采用 3D 打印技术来制备生物陶瓷，并取得了长足的进展。

Saijo 等采用磷酸三钙粉末等生物材料制备个性化假体，经处理后术中无需雕刻，可直接植入人体；将 3D 打印引进到美容整形领域，并取得很好的效果。利用 3D 打印技术制造美容整形材料既可以实现客户的各种个性化要求，又能够做到一次性精确成型，减去了传统工艺繁琐的术前雕刻的过程，大大节省了手术时间，因此得到广泛关注。目前主要有磷酸钙、磷酸二正硅酸钙、双相磷酸钙、硅酸钙/β-磷酸三钙等材质的生物陶瓷。3D 打印陶瓷支架具有促进细胞成骨性分化和血管新生的生物活性功能，羟基磷灰石支架可促进神经鞘干细胞向成骨细胞分化，双相磷酸钙支架中随着 β-磷酸三钙含量的增加，支架的促进细胞成骨性分化的能力增强，硅酸钙 / β-磷酸三钙支架中的硅元素的释放能够促进骨样细胞合成成骨因子，促进细胞成骨性分化。磷

酸二正硅酸钙能够促进血管的增殖和再生。生物陶瓷具有与松质骨相近的抗压强度和良好的骨诱导能力，但是生物陶瓷需要在高温环境下打印成型，打印时不能对支架同步涂层促进骨形成的生物活性分子或抗感染药物，同时其脆性高、韧性差、剪切应力弱。目前对生物陶瓷的 3D 打印研究仅仅局限于硬组织的打印。生物玻璃是内部分子呈无规排列状态的硅酸盐的聚集体，主要含有钠、钙、磷等几种金属离子，在一定配比和化学反应条件下，会生成含有羟基磷酸钙的复合物，具有很高的仿生性，是生物骨组织的主要无机成分。

由于生物玻璃材料具有降解性和生物活性，能够诱导骨组织的再生，因此在骨组织工程的研究领域被作为组织工程支架材料广泛应用，在无机非金属材料领域具有非常广阔的应用前景。研究者曾用生物玻璃材料制备出猴子大腿骨，植入其体内，经一定时间后取出研究，发现再生的猴子骨细胞已长入生物玻璃的网状结构内，且结合非常紧密；并且，经力学实验测试发现这种人造骨比原骨力学性能更优。2011 年，美国华盛顿州立大学的研究人员采用 3D 打印技术将磷酸钙打印出一种像骨骼的结构，可在分解前作为新骨骼细胞生长所需的支架，已在动物身上成功进行了试验，取得了令人满意的结果。生物玻璃良好的生物相容性结合 3D 打印精确成型、快速制造、个性化等诸多优点，必定在组织工程支架材料以及个性化医疗领域取得新的突破。

由于上述的医用陶瓷材料都需要在高温条件下加工成型，所以医用陶瓷材料的 3D 打印加工通常分为两个阶段：

1)陶瓷粉末与熔点较低的粘结剂混合均匀后在激光照射下烧结出所设计的模型，但是此时的模型只是在粘结剂的作用下将陶瓷粉末粘结成型，力学性能较差，无法满足应用要求；

2)在激光烧结后，需要将陶瓷制品放到马弗炉中进行二次烧结。陶瓷粉末的粗细与粘结剂的用量都会影响到陶瓷制品的性能，陶瓷粉末越细越有利于二次烧结时晶粒生长，陶瓷层的质量越好；粘结剂的用量越大，激光烧结过程越容易，但是会造成二次烧结时零件收缩变大，使制品达不到尺寸精度要求。二次烧结过程的温度控制也会对3D 打印陶瓷制品的性能产生影响。

6.3 医用高分子材料

近年，生物医用高分子材料可谓异军突起，成为发展最快的生物医学材料。生物医用高分子材料的发展从最开始仅仅利用现成的高聚物到利用合成反应在分子水平上设计合成具有特殊功能的高聚物。目前研究又进入了一个新的阶段，寻找具有主动诱导、刺激人体损伤组织再生修复的一类生物活性材料成为热点。3D 打印高分子耗材需要经过特殊处理，还需要加入粘合剂或者光固化剂，且对材料的固化速度、固化收缩率等有很高的要求。不同的打印技术对材料的要求都不相同，但是都需要材料的成型过程快速精确，材料能否快速精确的成型直接关系到打印的成败。由于生物医用材料直接与生物系统作用，除了各种理化性质要求外，生物医学材料必须具有良好的生物相容性，生物医学材料的开发比其他功能材料的开发具有更严格的审核程

序，所以对用于生物医学领域的 3D 打印高分子材料的研究才刚刚起步。

韩国浦项科技大学 Cho 等以 PPF 为原料，通过利用光固化立体印刷技术（SLA）制备的多孔支架具有与人松质骨相似的力学性质，且支架能促进成纤维细胞的黏附与分化。此外，通过将 PPF 支架移植到兔皮下或颅骨缺损部位的实验结果表明，PPF 支架会在动物体内引起温和的软组织和硬组织响应，如移植 2 周后会出现炎性细胞、血管生成和结缔组织形成，第 8 周后炎性细胞密度降低并形成更规则的结缔组织。与传统组织工程支架相比，3D 打印组织工程支架可以随意设计形状、尺寸、孔的结构和孔隙率等，研究者可以根据不同组织的修复要求来选择需要打印出的支架结构。PauliusDanilevicius 等采用激光三维打印技术成功制备了三维多孔的聚乳酸（PLA）组织工程支架，并对支架的孔隙率对细胞粘附、生长、繁殖等生理特性的影响进行了一系列的研究。

研究结果表明，在制备支架模型的过程中，三维打印技术可以随意制造任意空洞和孔隙率的 PLA 组织工程支架，研究者可以轻易得到所需的模型。之后对各种模型进行一系列细胞生物学特性的表征发现，支架的空洞以及孔隙率对细胞的黏附生长有很大的影响，分析对比各项结果后得出了最适合作为组织工程支架的模型。同时也证明了通过 3D 打印制备的 PLA 支架有望在骨组织工程中得到广泛应用。医用高分子打印材料具有非常优异的加工性能，可适用于多种打印模式，其中应用最多的是熔融沉积打印和紫外光固化打印两种模式。熔

融沉积打印所使用的是热塑性的高分子材料，目前最受研究者青睐的是可降解的脂肪族聚酯类材料，如 PLA、PCL。原材料只需要拉成丝状即可打印，打印材料的制备过程简单，一般不需要添加打印助剂。紫外光固化打印所用的是液体光敏树脂，液态树脂中包含有聚合物单体、预聚体、光（敏化）固化剂、稀释剂等，液态树脂的成分以及光固化度都会影响打印产品的性能，尤其是医疗产品的生物相容性和生物活性。

6.4 复合生物材料

复合材料是指两种以上不同物理结构或者不同化学性质的物质，以微观或宏观形式组合而成的材料；或者是连续相的基体与分散相的增强材料组合的多相材料，这类材料用于人工器官、修复、理疗康复、诊断、检查、治疗疾病等医疗保健领域，并具有良好生物相容性，则称为复合生物材料。FalguniPati 等采用多喷头 3DP 技术成功打印出 PCL/PLA/β-TCP 复合生物材料支架，并将 HTMSCs 细胞种植于支架，共培养 2 周，使 HTMSCs 细胞生长过程中分泌的细胞外基质附着在支架上，然后进行脱细胞实验去除支架上 HTMSCs 细胞，保留细胞外基质，从而得到 PCL/PLA/β-TCP/ECM 多组分具有生物活性的复合生物材料支架。该支架中的材料能够很好地取人之长，补己之短，各组分相辅相成，既能达到骨组织工程材料的力学要求，又能够促进生物矿化过程。ECM 中还包含了多种调节骨细胞生长分化的因子，有望成为骨组织工程支架材料研究的新方向。

同时 FalguniPati 等还进行了 3D 脂肪组织工程的研究，第一组以 PCL 为框架，用脱细胞的脂肪组织为墨水在 PCL 框架内打印出具有一定形状和孔洞的三维脱细胞脂肪支架并将其植入小鼠体内；第二组直接用脱细胞的脂肪组织负载目标细胞制成凝胶，通过 3D 打印技术将凝胶打印在事先准备好的 PCL 框架内，在体外培养一段时间后植入小鼠体内。研究表明，利用这两种方法制备的组织工程支架均具有良好的生物相容性且能在小鼠体内培养长出所需的脂肪组织，总的来说，第二组的各项测试数据均优于第一组。由此可见，3D 打印技术可以将多种材料复合打印，各组分之间取长补短，相辅相成，在组织工程领域具有得天独厚的优势。与单一组分的或结构的生物材料相比，复合生物材料的性能具有可调性。由于单一生物材料用 3D 打印制成产品会存在一定的不足，将两种或者两种以上的生物材料有机复合在一起，复合材料的各组分既保持性能的相对独立性，又互相取长补短，优化配置，大大改善了单一材料应用中存在的不足；但是对于理化性质差异较大的两种材料，如何利用打印的方法将它们很好地融合在一起，发挥它们组合的最大优势也是目前研究的热点之一。

6.5 细胞参与的生物 3D 打印材料

作为前期研究，科学家们已经尝试用很多 3D 打印支架与细胞共培养，证明了细胞能够在多种 3D 打印支架上存活，并且比普通二维培养的效果要好。3D 打印的 PCL 支架已经被证明能与多种细胞共培养，这为将细胞与材料混合成“生物墨水”，共同打印出生物组织奠定了良好的基础。但是这仅仅是细胞与材料的二维作用，并没有直接将

细胞置于打印系统中，只能称作是非直接细胞参与的生物 3D 打印。细胞直接参与的生物 3D 打印是一门多学科交叉综合的超级学科，需要利用生物学、医学、材料学、计算机科学、分子生物学、生物化学等多个学科的原理与技术，其中，打印材料的选择是亟需突破的难点之一。水凝胶是由高聚物的三维交联网络结构和介质共同组成的多元体系，作为新型的生物医用材料引起了研究者们的广泛关注。医用水凝胶具有良好的生物相容性，其性质组成与细胞外基质相类似，表面粘附蛋白质和细胞的能力弱，基本不影响细胞的正常代谢过程。水凝胶的存在可以进行细胞的保护、细胞间的黏合扩展及器官的构型。

因此，水凝胶成为包裹细胞的首选。医用水凝胶、生物交联剂（法）、活细胞共同组成生物 3D 打印所需的“生物墨水”。美国康奈尔大学的研究人员采用 3D 生物打印技术，利用Ⅰ型胶原蛋白水凝胶与牛耳活细胞组成的“生物墨水”，成功打印出了人体耳廓。无论是功能还是外表，这个耳廓均与正常人的耳廓十分相似。在后续培养过程中，胶原蛋白水凝胶与细胞相互作用良好，且在培养过程中慢慢降解并被细胞自身合成的细胞外基质所替代。接下来，他们将利用患者自身的耳朵细胞，打印人造耳廓并进行移植。这一消息令人对医疗整形行业的未来产生无限的遐想。

医学界目前使用的人造耳廓主要分为两类：

一是由类软骨的人造材料制成，其缺点是质感与人耳差异较大；

二是通过取出患者部分肋部软骨“雕刻”新的耳廓，这种方法不仅会给患者造成不小的肉体伤害，而且其美观及实用程度也严重受制于医生的“雕刻技术”。

3D 生物打印技术制成的人造耳廓，则没有上述之虞。器官３Ｄ打印是科学家们一直追求的梦想之一，目前器官打印已经被当作概念股炒作上市，吸引了很多眼球，但 3D 打印还处于刚刚起步阶段，还有很多问题需要解决，尤其是复杂器官的 3D 打印存在更为巨大的挑战，材料与调节细胞有序地组合、器官内部血管构建、神经系统构建的生长因子的相容是器官打印最难解决的困难。通过 3D 打印设备将生物相容性细胞、支架材料、生长因子、信号分子等在计算机指令下层层打印，形成有生理功能的活体器官，达到修复或替代的目的，在生物医学领域有着极其广泛的用途和前景。近年来 3D 打印技术发展迅速，已在骨骼、血管、肝脏、乳房构建等方面取得了一些成绩，但离复杂器官的功能实现还有很长一段距离。

3D 打印技术的发展已成为一种新兴技术，其在医学上的应用效果也日益明显。首先，3D 打印技术将有力克服组织损坏与器官衰竭的困难。每个人专属的组织器官都能随时打出，这就相当于为每个人建立了自己的组织器官储备系统。其次，表皮修复、美容应用水平也将进一步提高。随着打印精准度和材质适应性的提高，身体各部分组织将被更加精细地修整与融合，有助于打造出更符合审美的人体特征。最后，当 3D 打印设备逐步普及后，在一些紧急情况下，还可利

用 3D 打印机制作医疗用品，如导管、手术工具等，使之更加个性化，同时减少获取环节和时间，临时解决医疗用品不足的问题。

所以，3D 打印技术未来发展趋势将会在 3D 打印速度的提升，开发更为多样的 3D 打印材料，使 3D 打印机的体积小型化、成本降低，不断拓展其更多行业的应用上体现出来。就目前来看，3D 打印在生物医学方面的研究如雨后春笋般，3D 打印技术在制备生物医用材料特别是组织工程支架材料方面已经取得了诸多成就。然而，3D 打印生物医用材料还是一个非常新鲜的领域，各种研究仍处于初始阶段，要想真正实现 3D 打印生物医用材料在临床上的应用还有很长的一段距离，还存在很大的挑战。材料的研究与发展制约着 3D 打印技术的发展，适用于 3D 打印的生物医用材料的研究与开发将成为未来研究热点。3D 打印生物医用材料的研发之所以困难，其主要原因在于临床上对材料的各种性能有极高的要求，材料的选择受到多种因素的制约，既要考虑材料在打印前后的安全性、生物相容性、降解性能、生物响应性等，又要考虑材料能否达到产业化的要求。所以，3D 打印生物医用材料的研发面临巨大的挑战，同样随着 3D 打印技术在程序以及机械方面的快速发展，也出现了很多的机遇。未来研究 3D 打印生物医用材料的重点应该放在：开发更多可打印的生物材料。

理论上来讲，所有的材料都可以打印，但实际上现在用于生物医学领域的打印材料还屈指可数。有些具有优异性能的材料由于打印前后收缩率大，材料中所含的添加剂对生物体有害，打印后强度下降等原因，无法满足生物材料的使用要求，而被排除在 3D 打印生物材料

行列之外。所以，应该通过各种物理化学改性的方法来克服这些被弃用的材料存在的打印问题，开发出更多性能优异的 3D 打印生物材料。这样既可以增加临床应用上的选择，又可以在一定程度上降低打印费用。组织工程支架材料的研究与开发。3D 打印技术可以任意设计打印产品的空间结构，将 3D 打印的这个优势与组织工程理念相结合，就可以针对特定组织设计最优的组织工程支架。在材料的选择方面，性能越接近细胞外基质的材料越受青睐，因此，需要开发更多可仿生、可降解、具有生物活性的 3D 打印组织工程支架材料。

3D 技术与组织工程的结合将为生物组织与器官的重建开辟崭新的研究领域。“生物墨水”中 3D 打印生物材料的研究与开发。实现组织与器官的原位 3D 打印是科学家们梦寐以求的结果。目前的技术水平仅仅达到了在体外打印有外形无功能的组织与器官，打印材料是其中的难点之一。开发出具有适当力学性能，良好生物相容性，具有生物活性的生物打印材料，将它与活细胞、生物交联剂（法）、信号分子组成“生物墨水”，力争将目前 3D 打印器官存在的诸多问题一一攻破，为实现 3D 打印真正造福人类奠定基础。另外，打印材料与细胞、组织以及血液之间的相容性研究也是重点之一。随着材料学的日益发展，对生物打印材料的要求日渐严苛，打印材料不仅仅要安全无毒，还要起到支架的作用，更要求其具有一定的生物功能，能够保证物质能量自由交换、细胞活性和组织的三维构建。因此，对打印材料的生物相容性的研究是必不可少的。

第七章 新型 3D 打印材料

随着 3D 打印技术和商业应用的发展，大批量、个性化定制将成为重要的生产模式。3D 打印与现代服务业的精密结合，将衍生出新的细分产业和新的商业模式，创造出新的经济增长点。3D 打印技术发展带来的产品技术、制造技术与管理技术的进步使企业具备快速响应市场需求的能力，特别是形成了能适应全球市场上丰富多样的客户群的需求，实现远程定制、异地设计、就地生产和销售的协调化新型生产模式，使生产模式、商业模式等多个方面发生根本性的变化。基于此，列举几类常见的 3D 打印典型应用案例。

7.1 金属 3D 打印典型应用

金属 3D 打印机的问世对传统 CNC 制造加工来说是一大重要补充。随着金属 3D 打印机技术在生产车间的应用中变得越来越普遍，对于金属加工制造相关企业来说，更加注重以实际生产应用为核心价值的导向。正如技术工程师了解哪些零部件最好使用水刀而不是三轴铣刀进行加工一样，现在同样也需要知晓哪些零部件非常适合利用金属 3D 打印机来生产加工。

想了解如何正确使用金属 3D 打印机的第一步是了解金属 3D 打印的基本优势。 以下三大优点是每个成功的金属 3D 打印应用的根源：

设计自由度：具有复杂几何构造的零部件在传统 CNC 加工制造过程中，经常由于其复杂性而带来了很多额外的制造成本。因此，在遇到复杂结构的零件时会因为加工工艺问题被迫修改技术图纸来妥

协，传统制造就只能成为一些简单规则形状的规模化生产方式。然而，在使用金属 3D 打印机后，生产复杂几何构造的零件变为了可能。

无需额外固定工具：3D 打印零部件无需额外固定夹具。这使得生产制造商能够以最小的开销和精力创建零件，从而大大降低了单个零件的成本，从而实现小批量生产。此外，当辅助工具成本不再是限制因素时，生产制造商可以对外承接更多的工作。

自动化：大多数传统制造过程中需要有专业工人全程跟踪监控，以确保零件生产过程中不会出现技术故障。例如，传统加工零件时，必须现在 CAM 软件中进行设计修改，然后再发布到车间进行生产。相反的，金属 3D 打印机会自动从三维设计文件中提取数据直接传输到 3D 打印机中制作零件。

7.1.1 航空航天应用

法国航天中心依靠 3D Systems 企业生产制造的第 6 款立即金属 3D 打印机 ProX DMP 320，应用粒子束，在氩气氛围维护下，根据 3D CAD 统计数据，对镍铬合金基超耐热合金 LaserFormNi718 粉末状自上而下熔化，为中小型通讯卫星液体火箭发动机打印出多次重复使用的雾化喷嘴。从而，将 30 好几个零碎构件融合为 1 个一体式构件，另外立即减脂 10%，柴油发动机混和点燃高效率明显提升。

除此之外，在美国宇航局以液体甲烷气体为然料的火箭发动机检测中，对比减材生产制造加工工艺需要零配件数降低 45%的 3D 打印版增压泵可造成 600 大马力（1 大马力＝0.735kW）的驱动力，1min

内向型柴油发动机的燃烧室出示 600gal 半超低温高压液体甲烷气体，用于保证柴油发动机造成超出 10250.83kg 的推力。

在空客 777 装用的 GE90-94B 喷气发动机中，T25 制冷压缩机通道温度感应器的机壳选用 3D 打印增材制造加工工艺，对钴铬合金的超微粒粉末状开展自上而下熔化而成，既轻巧又牢固。在国内主干线民用型大型飞机 C919 上，不但装用了独立产权年限的 3D 打印版钛金属中央政府翼缘条（见图 7-1），还要登机门、服务项目门及前后左右客舱门等处装车了 23 项 3D 打印版钛金属零配件（见图 7-1），使机舱门件的生产制造由传统式锻造工艺升級为立即金属增材制造，并处理了钛金属大中型厚壁件的普遍地应力裂开和型面形变等难题。



图 7-1 金属 3D 打印飞机关键零部件

7.1.2 汽车行业应用

在机械制造业内，金属 3D 打印不但被用以轮胎模具的生产制造，还用于生产加工独特传动齿轮旋纽、钥匙链及尾门印字等零配件。米其林集团公司选用法孚集团公司产品研发的 Fives 5 轴激光器管理中心（图 7-2），开展 MICHELIN CrossClimate+轮胎模具的 3D 打印，用于得到全深层 3D 管沟、自锁住管沟和 V 形胎面纹路，进而使子午线橡胶轮胎具备冬天雨雪天气地面不断挪动、夏天干躁地面合理制动

系统及损坏胎面新管沟不断牵引带等优点。这也为山东省豪壮、广东省巨轮等轮胎模具生产制造公司出示了 3D 打印具体实例和最前沿工作经验。Fives 5 轴激光器管理中心及轮胎模具如图所示 7-2 图示。

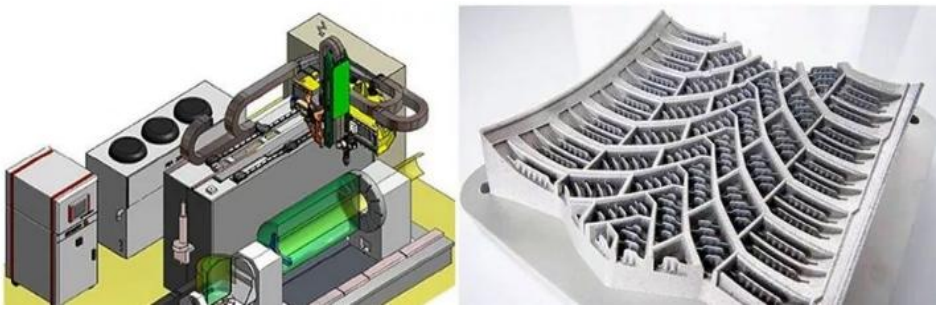


图 7-2　Fives 5 轴激光器管理中心及轮胎模具

吉凯恩等企业选用 hp 惠普出示的金属 3D 打印机加工工艺 HP Metal Jet——三维立体粘合剂喷涌成型，为大众汽车配套设施生产制造了换挡杆、个性定制版钥匙链、柴油发动机指形从动滚轴、方格支撑点式轻量传动齿轮等金属型零配件（见 7-3）。

HP Metal Jet 是在粉末状床边双重铺装薄薄一层层超微粒金属后，热喷墨打印机打印喷嘴穿透该层并喷涌粘合剂——水性高聚物液體剂，粘合剂经毛细相互作用力渗入金属粉（0.5-20μm）空隙呈联合分布，并在高溫辐照下将粉末状颗粒物熔拼在一起变成固态块，另外有机溶剂一部分蒸发，自上而下打印，直到完毕，取下零部件相结合炉煅烧。HP Metal Jet 出示了 4 倍沉余喷头和 2 倍打印杆，使打印零部件的致相对密度超过 93%，生产率大幅度提高，粘合剂使用量显著降低。



图 7-3 HP 惠普 3D 打印的小车用金属制造

7.2 光敏树脂 3D 打印典型应用

SLA 工艺(光固化）原理为光谱中能量最高的紫外光产生的活化能，能够使不饱和聚酯树脂的 C-C 键断裂，产生自由基从而使树脂固化。当不饱和聚酯树脂中加入光敏剂后，用紫外线或可见光作能源引发，能使树脂很快发生交联反应。故 SLA 工艺的材料就是光敏树脂，需要装满整个材料槽，主要工作设备是激光器和振镜，振镜通过计算机控制的偏振把激光器发出的紫外光照射到规定的材料槽液体表面上使其固化，事先模型被计算机均分成 N 个切片，每个切片可看作一个二维平面，固化完一个切片平面网板会带着模型下降到下一个切片平面，一次类推直至打印完成。

SLA 3D 打印相对于其他 3D 打印工艺有打印形状广泛、成型速度快、精度高、表面光洁度最好的特点， 应用的领域几乎包括了制造领域的各个行业，在医疗、人体工程、文物保护等行业也得到了越来越广泛的应用。 目前主要是应用于新产品开发的设计验证和模拟样品的试制上，即完成从产品的概念设计→造型设计→结构设计→基本功能评估→模拟样件试制这段开发过程。对某些以塑料结构为主的

产品还可以进行小批量试制，或进行一些物理方面的功能测试、装配验证、实际外观效果审视，甚至将产品小批量组装先行投放市场，达到投石问路的目的。

主要行业的应用状况如下 :汽车、摩托车 ：外形及内饰件的设计、改型、装配试验，发动机、汽缸头试制。家电 ：各种家电产品的外形与结构设计，装配试验与功能验证，市场宣传，模具制造。通讯产品 ：产品外形与结构设计，装配试验，功能验证，模具制造。航空、航天 ：特殊零件的直接制造，叶轮、涡轮、叶片的试制，发动机的试制、装配试验。轻工业 ：各种产品的设计、验证、装配，市场宣传，玩具、鞋类模具的快速制造。医疗 ：医疗器械的设计、试产、试用，CT 扫描信息的实物化，手术模拟，人体骨关节的配制。国防 ：各种武器零部件的设计、装配、试制，特殊零件的直接制作，遥感信息的模型制作。精密铸造：在由于光固化快速成形设备使用的液态树脂是由碳、氢、氧等元素组成的高分子材料，在 700℃以上的温度下，可以完全烧蚀，没有任何残留物质，对于失蜡法制造精密铸造模型来说，这是一个非常重要的性能。目前在珠宝行业可代替人工雕蜡过程，可大大提高成型精度和效率。

7.2.1 工业应用

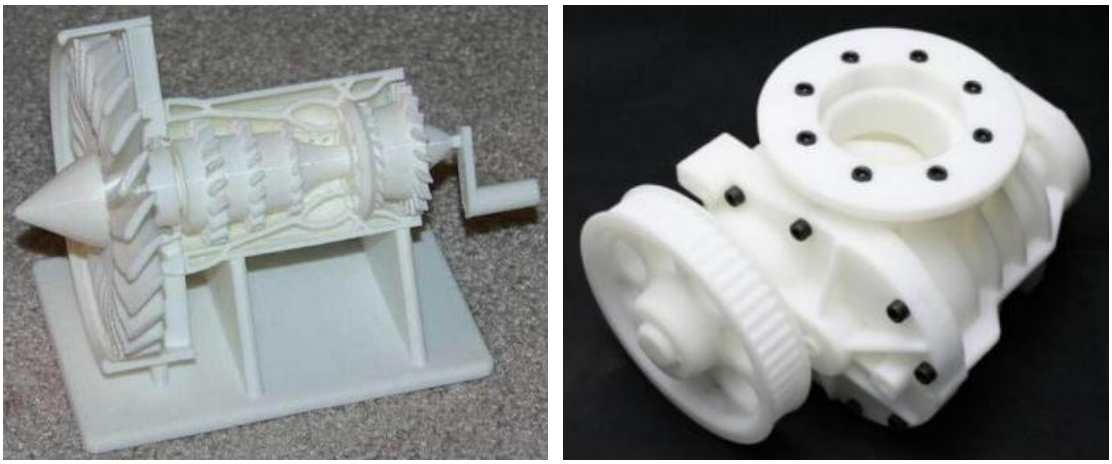


图 7-4 工业零部件 SLA 成形

利用 SLA3D 打印机与传统的精密铸造紧密衔接，可以给工业零部件的产品试制阶段或小批量生产提供无模具生产工艺。因此可设计、制作出更复杂的结构，特别适用于定制化产品和全新型产品。

7.2.2 建筑行业应用

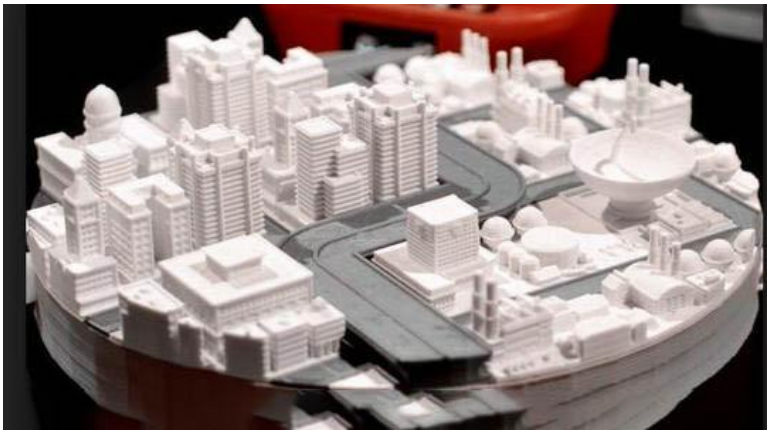


图 7-5 SLA 成形建筑模型

传统的建筑模型的做法一般采用手工制作而成，使用卡纸、KT 板、木板、塑料棒、透明胶片、PVC 板喷漆、雕刻楼房部等材料工艺。缺点是工艺复杂，耗时较长，人工成本过高，而且周期长，细节精度低等……

利用 SLA3D 打印能一步成型，完美呈现设计师的建筑创意，方便省时，还能节省费用，避免了雕刻楼房部件，整体组合等多道程序。花

费的成本只有过去的 30%，节省了超过 60%的时间，而且能避免因为人为加工造成的失误，并且能突破传统的加工对形状的要求和限制，很多建筑设计师都利用 3D 打印建筑模型来直观的观察模型。便于展示，通过对 1:1 的实物模型的检查也能及时修改设计。

7.2.3 教育行业应用

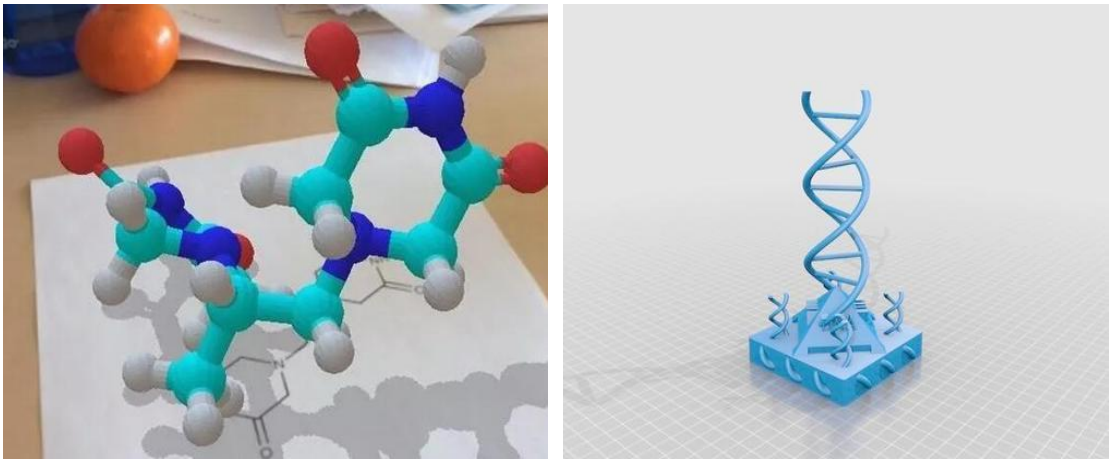


图 7-5 SLA 成形教学用具

教育行业的应用分为 3D 打印技术教学应用、3D 打印教学辅具应用和 3D 打印科技创新项目比赛用品应用。

纯粹的理论学习使学生的大脑僵化，教育需要更多的让孩子们接触，感知和体验未来的新兴技术，培养学生的创新思维能力，使他们更好地适应时代的发展，3D 打印机技术的普及为学校的创新教育提供了新的视角和技术支持，3D 打印高端人才的培养也成为了至关重要的一环。



照明技术与照明设计

主　编　刘登飞
副主编　陈文涛　盛传新

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

内容简介

本书以照明技术领域实际应用最广泛的典型产品为载体，主要设计了照明技术、照明中常用光学器件、照明光学设计、照明散热系统设计、光源灯具设计、照明光环境设计、照明产品案例等七个教学项目，将照明技术与照明设计必要的基本理论知识（光度学、色度学及照明设计方法）以及应用实例分别融入各教学项目。每个项目遵循“学以致用、理实一体”的原则，按照“产品—技术—设计方法—应用”为主线展开介绍。

本书针对高等职业教育的教学要求，注重知识的实用性和学生的认知规律，对复杂的计算及推导进行了简化，增加了相关照明产品的具体资料和参数等具有实用价值的内容，对实践教学具有指导性和可操作性。

本书可以作为高等职业教育院校光电技术类专业、照明类专业教材，也可供工程技术人员参考。

目　录

绪论
项目一、照明技术中的基本概念
【任务导入与项目分析】
任务一　辐射度学与光度学
任务二　色度学
任务三　电学特性
任务四　热学特性
【项目小结】
思考与练习
项目二、照明中常用光学器件
【任务导入与项目分析】
任务一　照明中常用透镜
任务二　照明中常用反射器
任务三　反射器透镜组合形式
【项目小结】
思考与练习
项目三、照明光学设计
【任务导入与项目分析】
任务一　全反射透镜设计
任务二　菲涅尔透镜设计
任务三　鳞甲反射器设计
任务四　自由曲面透镜设计
【项目小结】
思考与练习
项目四、照明散热系统设计
【任务导入与项目分析】
任务一　散热基础
任务二　散热途径与材料选择
任务三　散热系统设计
【项目小结】
思考与练习
项目五、光源灯具设计
【任务导入与项目分析】
任务一、Tracepro 简介
任务二、Tracepro 设计实例
【项目小结】
思考与练习
项目六、照明光环境设计
【任务导入与项目分析】
任务一、DIALux 简介及灯光精灵
任务二、室内空间建模
任务三、灯具选择与放置

任务四、灯光场景
【项目小结】
思考与练习
项目七、照明产品设计案例
【任务导入与项目分析】
任务一、国内外著名品牌照明产品
任务二、LED 工作台灯专题案例
【项目小结】
思考与练习
参考文献

绪　论

一、什么是照明

近年来，我国的照明事业不断发展，照明的需求也不断提高。传统的成像光学设计在很多照明应用领域已不适用，非成像光学设计则应运而生。

一直以来，光学设计都被认为仅仅是镜头设计或成像设计。但从近一二十年的发展来看，光学设计已包括了照明设计这个子领域。照明设计主要关注的是光源到目标之间的可见光或辐射的传输问题。

可见光的有效传输在成像系统中是必需的，但是这些系统均受到成像要求的限制。为高效传输光线，照明系统可以忽略“成像约束”。因此，“非成像光学”一词经常出现在照明系统中。按以上所述，光学系统设计大致可分成以下四类。

1、成像系统设计。这类设计通常有一定的成像要求，如焦平面相机设计。

2、可见光成像系统设计。主要考虑某些集成观察系统的整体成像要求，如望远镜、照相机取景器和显微镜等，这些均是需要人眼来直接面对成像对象的光学系统。

3、可见光照明系统设计。可见光照明系统即有一定成像要求并充当光源的光学系统，如显示器、照明设备以及复印机的照明光源等。

4、不可见光照明系统设计。该类系统无成像要求，如太阳能集束器、激光泵浦腔以及其他光学传感器应用领域。

上述后面两个系统即属于照明工程领域。成像系统虽也可实现照明要求，但在某些特殊应用情形下，如制版行业中需用到的临界照明和柯勒照明，需要许多基于非成像光学原理的替代方法。本教材重点阐述使光线在光源与目标之间进行有效传输的照明技术，即非成像技术，偶尔也会采用成像原理来改善传输效果。此外，我们对观察者未设置任何要求，但大多数照明光学实际上是默认了观察者是人眼或一个光电成像系统（如相机）。如果忽视必要的可视化和视觉特点将会影响照明系统的性能。从这一点来看，照明设计也有一些主观的因素。

本教材多次交替使用“照明”和“非成像”这两个术语，但严格讲，照明的广义概念包含了非成像和成像两种方法。

本教材主要介绍照明技术光学领域的一些常见的物理量和基本概念，以及照明技术与照明设计相关的光色度分析、光学设计、灯具散热系统设计和照明产品设计案例等等。

二、照明技术的发展

在人类发展史上，从采集天然火源到砖木取火，光源经历了无数的变化。照明的发展见证了人类历史的进步。火在人类历史上扮演着重要的角色，因为它为人类提供食物、温暖和光亮。火的使用伴随着人类文明的巨大进步。在 18 世纪之前，火一直是人类的照明工具，从火炬、动物油灯、植物油灯发展到蜡烛，再到广泛使用的煤油灯。人类从未停止探索新的照明方法。在油灯的使用过程中，灯芯由草芯发展到棉芯，再发展到多股棉芯。大约在公元前三世纪，人们用蜂蜡制作蜡烛。在 18 世纪，人们用石蜡制作蜡烛，机器的使用使得大量生产蜡烛成为可能。在 19 世纪，英国人发明了最初用作路灯的煤气灯。由于它的火焰闪烁，熄灭时会产生有害气体，这盏煤气灯不太安全，室内使用非常危险。然而，经过改进，煤油灯在成千上万的家庭中取代了煤油灯。这些光源都是依靠燃烧材料的火焰来提供光。18 世纪，电的发明极大地促进了社会的发展，为照明带来了新的机会。1809 年，

英国的戴维·汉弗莱(David Humphrey)发明了弧光灯，利用一种电光源，这种光源是在空气中的电极通电后，将两个接触的碳棒电极分离而产生的。在白炽灯发明之前，它被用于公共场合，是第一个用于实际照明的电光源。但是，由于燃烧时会发出嘶嘶声，而且光线太亮，不适合室内照明。1877 年，一位俄国人通过修改弧光的结构发明了电蜡烛，但其性能并没有得到改善。那时，许多科学家开始探索一种新的、安全的、温暖的光源。

经过长时间的试验，美国发明家托马斯·爱迪生于 1879 年 10 月 21 日点燃了世界上第一盏有实用价值的灯。在这一过程中，爱迪生认真总结了以往电灯制造试验的失败，并制定了详细的实验计划。爱迪生试验了多种植物，并决定在竹丝碳化后使用竹丝。电灯泡生产后的可用照明时间增加到 1200 小时。这种竹线灯的使用时间超过了 20 年。1906 年，爱迪生使用钨丝提高了电灯泡的质量，这就是延用至近期 LED 照明普及之前一直使用的白炽灯。如图 1（a）所示。



（a）白炽灯



（b）卤钨灯

图 1　常见白炽灯和卤钨灯外形

1959 年，卤钨循环理论被发现，帮助发明了卤钨灯。发光效率优于普通白炽灯。如图 1（b）所示。

白炽灯的发明照亮了全世界，但从能源利用的角度来看，却存在着严重的缺陷。只有 10-20%的能量转化为光，其余的能量以热的形式散失。为了更好地利用能源，科学家们开始了探索新的照明灯具的新旅程。1902 年,彼得库珀休伊特发明了水银灯，它的光伏效率大大提高，但有明显的缺点。它辐射了大量的紫外线，对人体有害，而且光线太强了。因此，它没有被广泛使用。

1910 年，霓虹灯投入使用。这种光源的光是在玻璃管内低压惰性气体的高压场中由冷阴极辉光放电发出的。惰性气体的光谱特性决定了氖的颜色。

汞灯进一步引起了许多科学家的兴趣。他们发现，只要在汞灯管的内壁涂上荧光材料，那么当水银的紫外线投射在上面时，大量有害的紫外线就会被激发成可见光。然而，由于水银的启动装置较差，科学家们在实际操作中遇到了一系列的故障。1936 年，乔治·E·英曼(George E. Inman)和其他研究人员利用一种新的启动装置生产了不同于汞灯的荧光灯。这种日光灯的制作方法是：在玻璃管中注入一定量的汞蒸汽，在管壁内涂上荧光粉，并在管的两端各安装一根灯丝作为电极。这光比白炽灯还亮。它有更高的能量转换效率，更大的照明面积，并可以调整成不同的光色，因此它一出来就进入了普通人的家中。由于日光灯的成分与白天类似，所以被称为“日光灯”。

荧光灯中的汞会造成环境污染，因此，照明科学家和制造商开始寻找新的照明光源。在 20 世纪 60 年代后期，出现了高压气体放电灯，如高压钠灯和金属卤化物灯。如图 2 所示。



图 2 高压钠灯外形结构

早在 1907 年，亨利·约瑟夫·朗德在研究碳化硅接触点上的非对称电流路径时，发现 SiC 晶体发出黄光。第一个二极管应该叫做肖特基二极管，而不是 p-n 结二极管。半导体发光原理真正应用于发光二极管(LED)是在 20 世纪 60 年代初开始的。通用电气的 Nick Holonyak Jr.利用气相外延技术并使用 GaAs 开发了第一个商用发红光的 GaAsP LED。当时，产量很低，价格却很高。1968 年，美国孟山都公司成为第一个生产 LED 的商业实体。它开始建立一个工厂来生产低成本的 GaAsP LED，这开启了固态照明的新时代。从 1968 年到 1970 年，销售 LED 灯每隔几个月就会翻一番。在此期间，这家公司与 Hewlett-Packard（惠普，即 HP）公司合作降低了 LED 生产成本，提高了性能。其商业化生产的 GaAsP/GaAs LED 器件成为市场的主导产品。然而，在那个时期，这些发红光 LED 的光效为 0.l lm/W，远低于平均光效为 15lm /W 的白炽灯。孟山都公司的技术骨干 M. George Craford 为 LED 的发展做出了巨大贡献。他和他的同事在 1972 年成功开发出了黄光 LED。他们采用的方法是在 GaAs 衬底上生长氮掺杂 GaAsP 激发层。几乎在此期间同时出现了 ZnO 掺杂红光 GaP LED 和 n 掺杂绿光 GaP LED 两种器件，它们都是通过液相外延(LPE)生长的器件。因此，孟山都公司的研究团队采用气相外延法，将氮掺杂到 GaAsP 中，可以生产出发红光、橙光、黄光和绿光的 LED 器件。

1972 年，哈密尔顿公司生产了第一款带有 LED 显示屏的数字手表。20 世纪 70 年代中期，德州仪器公司生产了便携式数字计算器， 惠普公司有一个由红光 GaAsP LED 组成的七段数字显示器。然而，当时 LED 显示屏的功耗非常大。因此，对液晶显示屏(LCDs)功耗的需求出现在 20 世纪 70 年代晚期时非常强劲。在 20 世纪 80 年代早期，液晶显示器很快取代了 LED 在计算器和手表上的显示。

生产第一台彩色电视机的公司是美国无线电公司(RCA)，它在 1972 年 7 月采用金属卤化物气相外延生长(MHVPE)和掺镁的 GaN 薄膜获得发射波长为 430 nm 的蓝光、紫外光。20 世纪 80 年代早期的一项重大技术突破是开发出一种发光效率可达 10lm/W 的 AlGaAs LED。这一技术进步使 LED 应用于户外运动信息显示，以及安装在汽车尾部中央高挂停止灯(CHSML)等照明设备。

从 20 世纪 80 年代末到 2000 年，由于 AlGaInP 材料技术、多量子阱激发区、GaP 透明衬底技术等 LED 新技术的发展，裸芯片(即未封装其他材料的芯片)的尺寸和形状得到了进一步的发展。在 20 世纪 90 年代早期，惠普和东芝成功地开发出了采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术制备 GaAlP LED 器件。特别是在 Craford 等人成功开发出透明衬底技术之后，由于其发光效率高、色域广而得到了广泛的关注和迅速的发展。其发光效率提高到 20lm /W，超过了白炽灯的发光效率。近年来，倒装结构等技术的应用进一步提高了发光效率。1993 年，中村修二等人在日本日立公司采用双流 MOCVD 技术解决了 p 型 InGaN 材料的退火工艺。随后，他们成功开发出了以蓝宝石为基材的超高亮度蓝光 LED 器件。很快，绿光和蓝绿光 LED 的研究也相继开启。当时，高亮度 GaInN 绿光 LED 在交通信号灯中得到了广泛的应用，但早期 n 掺杂的 GaP 绿光灯由于其发光效率低而受到限制。1996 年，Nichia（日亚化学）公司推出了白光发光二极管，采用了蓝光 LED 芯片，芯片上覆盖了主要由钇铝石榴石(YAG)组成的荧光粉。不久之后，美国的 Cree 公司还采用了以 SiC 为衬底的

InGaN/SiC 结构蓝绿光 LED 器件。经过不断改进，该器件性能与蓝宝石衬底器件相同。近年来，紫外(UV)LED 技术的研究也取得了显著进展，从而为新型白光器件奠定了基础。

随着目前 LED 技术的进步，越来越多的白光 LED 应用已逐渐替代过去的一些传统光源，包括指示器、便携式手电筒、LCD 屏幕背光板、汽车仪表、医疗设备、路灯、室内灯等。据业内人士估测，白光 LED 已经在近 10 年来广泛应用于普通照明领域。如图 3 所示。



图 3　LED 道路照明

二、照明的种类

（一）按照明功能分类，照明的种类有：正常照明、应急照明、值班照明、警卫照明和障碍照明。其中应急照明包括备用照明、安全照明和疏散照明，其适用原则应符合下列规定：

1、当正常照明因故障熄灭后，对需要确保正常工作或活动继续进行的场所，应装设备用照明；

2、当正常照明因故障熄灭后，对需要确保处于危险之中的人员安全的场所，应装设安全照明；

3、当正常照明因故障熄灭后，对需要确保人员安全疏散的出口和通道，应装设疏散照明；

4、值班照明宜利用正常照明中能单独控制的一部分或利用应急照明的一部分或全部；

5、警卫照明应根据需要，在警卫范围内装设；

6、障碍照明的装设，应严格执行所在地区航空或交通部门的有关规定。

（二）按国际照明委员会（CIE）推荐的照明灯具分类，可分为五类：直接型、半直接型、全漫射型（包括水平方向光线很少的直接—间接型）、半间接型和间接型。

1、直接型灯具：此类灯具绝大部分光通量（ 90-100% ）直接投照下方，所以灯具的光通量的利用率最高。

2、半直接型灯具：这类灯具大部分光通量（ 60-90% ）射向下半球空间，少部分射向上方，射向上方的分量将减少照明环境所产生的阴影的硬度并改善其各表面的亮度比。

3、漫射型或直接—间接型灯具：灯具向上向下的光通量几乎相同（各占 40%-

60% ）。最常见的是乳白玻璃球形灯罩，其他各种形状漫射透光的封闭灯罩也有类似的配光。这种灯具将光线均匀地投向四面八方，因此光通利用率较低。

4、半间接灯具：灯具向下光通占 10%-40% ，它的向下分量往往只用来产生与天棚相称的亮度，此分量过多或分配不适当也会产生直接或间接眩光等一些缺陷。上面敞口的半透明罩属于这一类。它们主要作为建筑装饰照明，由于大部分光线投向顶棚和上部墙面，增加了室内的间接光，光线更为柔和宜人。

5、间接灯具：灯具的小部分光通（10%以下）向下。设计得好时，全部天棚成为一个照明光源，达到柔和无阴影的照明效果，由于灯具向下光通很少，只要布置合理，直接眩光与反射眩光都很小。此类灯具的光通利用率比前面四种都低。

（三）按防触电保护分类：为了电器安全，灯具所有带电部分必须采用绝缘材料等加以隔离。灯具的这种保护人身安全的措施称为防触电保护。

根据防触电保护方式，照明灯具可分为 0，Ⅰ，Ⅱ和Ⅲ 4 类，每一类灯具的主要性能及其应用情况在表 1 中有详细的说明。

表 1　照明灯具的防触电保护分类

灯具等级	灯具主要性能	应用说明
0 类	保护依赖基本绝缘，在易触及的部分及外壳和带电体间的绝缘	适用安全程度高的场合，且灯具安装、维护方便。如空气干燥、尘埃少、木地板等条件下的吊灯、吸顶灯
Ⅰ类	除基本绝缘外， 易触及的部分及外壳有接地装置， 一旦基本绝缘失效时，不致有危险	用于金属外壳灯具，如投光灯、路灯、庭院灯等，提高安全程度
Ⅱ类	除基本绝缘，还有补充绝缘，做成双重绝缘或加强绝缘， 提高安全性	绝缘性好， 安全程度高， 适用与环境差、人经常触摸的灯具，如台灯、手提灯等
Ⅲ类	采用特低安全高压（交流有效值 <50V ），且灯内不会产生高于辞职的电压	灯具安全程度最高， 用于恶劣环境， 如机床工作灯、儿童用灯等

从电气安全角度看，0 类灯具的安全程度最低，Ⅰ、Ⅱ类较高，Ⅲ类最高。有些国家已不允许生产 0 类灯具，我国目前尚无此规定。在照明设计时，应综合考虑使用场所的环境操作对象、安装和使用位置等因素，选用合适类别的灯具。在使用条件或使用方法恶劣场所应使用Ⅲ类灯具，一般情况下可采用Ⅰ类或Ⅱ类灯具。

（四）按防护 IP（Ingree protection ）分类：按国际电工委员会标准 IEC 529－598 和国标 GB 700－86 规定，根据水和异物的侵入的防护程度进行分类。如 IP65 ，其中第一位数字即与下表 2 中等级 6 对应，表示完全防尘。而第二位数字与下表 3 中等级 5 对应，表示防止喷水进入，其余依此类推。

表 2　照明灯具 IP 分类防异物等级

特征等级	防护等级	
	简述	防护细节
0	无防护	无特殊防护要求
1	防止大于 50mm 异物进入	防止大面积的物体进入，例如手掌等
2	防止大于 12mm 异物进入	防止手指等物体进入
3	防止大于 2.5mm 异物进入	防止工具、导线等进入
4	防止大于 1.0mm 异物进入	防止导线、条带等进入

5	防止小于 1.0mm 异物进入	不严格防尘，但不允许过量的尘埃进入以致使设备不能满意的工作
6	完全防尘	不准尘埃进入

表 3　照明灯具 IP 分类防水等级和程度

特征等级	防护等级	
	简述	防护细节
0	无防护	无特殊防护要求
1	防止水滴进入	垂直下滴水滴应无害
2	防止倾斜 15°的水滴	灯具外在正常位置和直到倾斜 150 角时垂直下滴水滴应无害
3	防止洒水进入	与垂直 65°角处洒下的水应无害
4	防止泼水进入	任意方向对灯具封闭体泼水应无害
5	防止喷水进入	任意方向对灯具封闭体喷水应无害
6	防海浪进入	防止强力喷射的灌水或进入量不损害灯具
7	防浸水	以一定压力和时间将灯具浸在水中时，进入水量不有害于灯具
8	防淹水	在规定的条件下灯具能持续淹没在水中而不受影响

（五）按照明光源发光原理可分为：热辐射光源、气体放电光源和固体发光光源三大类。

1、热辐射光源

热辐射光源是利用电流通过电阻丝发热形成的热辐射发光。主要有：白炽灯和卤钨灯。白炽灯的优点是显色性好，缺点是光效低。而卤钨灯相比较白炽灯光效更高。如图 1 所示。

2、气体电光源

气体电光源分为：低压气体电光源、高压气体电光源和辉光放电光源。

（1）低压气体电光源

低压气体电光源主要有：荧光灯、紧凑型荧光灯和低压钠灯等。如图 4 所示。



（a）荧光灯



（b）紧凑型荧光灯



（c）低压钠灯

图 4　低压气体电光源

荧光灯：利用荧光粉受电子、紫外线或 X 射线照射后发出可见光，其光效比白炽灯高很多。发射谱线较多为紫外光谱，感觉较冷。

紧凑型荧光灯，也称为节能灯，利用三种（440nm 蓝色、545nm 绿色、610nm 红色）不同颜色的稀土荧光粉以适当的比例组合成的灯管，再配镇流器。紧凑型荧光灯优点有：光效高（光效是白炽灯的 5、6 倍）；显色性好（显示指数在 80 以上）；光衰小；发光

稳定，无频闪。缺点是易破碎有汞污染。

低压钠灯：利用低压钠蒸气放电发光的电光源，它玻璃外壳内壁涂有红外线反射膜。优点：光衰小、发光效率高。缺点：发单色黄光，显色性较差。

（2）高压气体电光源

高压气体电光源（简称 HID）有：高压汞灯、高压钠灯和金属卤化物灯等。如图 5 所示。



图 5　高压气体电光源

高压汞灯：适用于室内外植物照明，发蓝绿光谱最强，所以绿色植物在此光源下色彩更接近白天看到的绿色。

高压钠灯：光效高，多用于道路照明。显指低、启动时间长、燃点温度很高，眩光明显。

金属卤化物灯：综合比较，比高压钠灯更实用，光效和显指都略高于高压钠灯，但二者都是高压气体放电灯，所以启动时间长。

（3）辉光放电光源

辉光放电是指低压气体中显示辉光的气体放电现象，即是稀薄气体中的自持放电(自激导电)现象。由法拉第第一个发现。它包括亚正常辉光和反常辉光两个过渡阶段。辉光放电主要应用于氖稳压管、氦氖激光器等器件的制造。

3、固体发光光源

固体发光是指电磁波、电能、机械能及化学能等作用到固体上而被转化为光能的现象。由此可见，固体发光的激发方式有很多种，如：光致发光、阴极射线发光、X 射线及 γ 射线发光、场致发光、高能粒子激发发光、化学发光、生物发光和摩擦发光等，其中，真空阴极射线发光、X 射线及 γ 射线激发发光、高能粒子激发发光中，粒子的能量很高，激发不均匀，它们将产生光电效应、康普顿效应、电子－正电子对、二次电子等和发光无关的效应，但经过能量调整，达到发光过程都和光致发光类似。

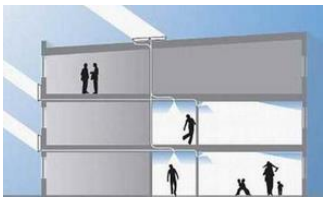
场致发光又称电致发光，典型代表就是发光二极管（LED），其基本结构是一块电致发光的半导体材料。LED 光源有诸多优点，如：低压供电；节能；面积小；稳定性好； 响应时间极短；无污染；色彩丰富。如图 6 所示。早期 LED 有一个最大缺点就是价格昂贵，但是现在技术的不断成熟以及光效和光品质的不断提高，普通照明用 LED 价格昂贵这一问题得到了解决，通用照明 LED 光源得到了广泛应用。因而本教材的照明设计主要是针对 LED 的二次光学设计展开的。



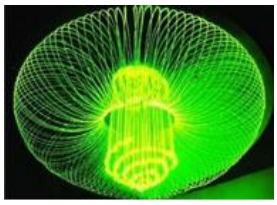
（a）LED 灯珠　　（b）LED 显示屏

图 6　LED 光源及应用

除了以上几大类光源外，还有一种照明光源也是很有特色的，那就是光纤照明系统。光纤照明系统是由光源、反光镜、滤色片及光纤组成，光源通过反射镜后，形成一束近似平行光的光束，滤色片将该光束变成彩色光，彩色光随光纤到达目的地。若光源采集的是太阳光，类似于导光管式阳光导入系统。如图 7（a）所示。若光源经过滤色片得到某些特殊颜色的光还可用于装饰性目的照明用。如图 7（b）所示。



（a）阳光导入系统



（b）光纤照明灯饰系统

图 7　光纤照明系统

光纤照明系统一般采用的光源是高亮度的点光源，反光镜是非球面反光镜，滤色片根据需要采用不同的颜色，光纤传输光由于光纤的弯曲或传输介质对光的吸收导致光能量有不同程度的损耗，所以，光纤照明系统对光的传输距离是有一定限度的，一般最远距离是 30 米左右。

项目一　照明技术中的基本概念

【知识目标】

1、了解照明技术中基本概念；

2、掌握照明技术中的光度学、色度学、电学、热学的参数特性及单位；

3、会利用照明技术中的基本概念进行产品测试。

【技能目标】

1、能识别照明产品中光色电参数；

2、会计算照明设计中涉及的平均照度等。

【任务导入与项目分析】

如今，人们对照明效果的要求越来越高，照明技术与光学设计的需求越来越大。由于照明技术与照明设计既是理论科学，又是工程技巧。理论和技巧运用不当，将带来很多问题。所以很有必要先介绍有关照明技术中常见的辐射度学、光度学、色度学等一些基本概念、基本量的定义和度量单位，以及有关的基本公式，作为研究照明技术与照明设计中辐射能计算的基础。

辐射度学时一门研究电磁辐射能测量的科学。辐射度学的基本概念和定律适用整个电磁波段的辐射测量，照明技术仅限于电磁辐射光学谱段内辐射能的计算与测量。光学谱段一般是指包括从波长为 0.1nm 左右的 X 射线到约 0.1cm 的极远红外的范围，如图 1 所示。

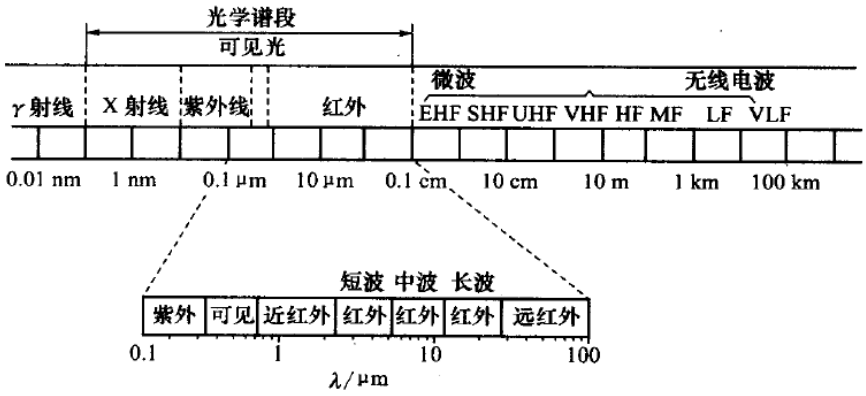


图 1　电磁频谱

使人眼产生总的目视刺激的度量是光度学的研究范畴。光度学除了包括光辐射能的客观度量外，还应考虑人眼视觉的生理和感觉印象等心理因素。

使人眼产生色感刺激的度量是色度学的研究范畴，研究人眼辨认物体的明亮程度、颜色类别和颜色的纯洁度（明度、色调、饱和度），是一门以光学、光化学、视觉生理和视觉心理等学科为基础的综合性科学，也是一门以大量实验为基础的实验性科学，解决对颜色的定量描述和测量问题。

20 世纪初，辐射度学和光度学在许多科学研究和应用领域，如分子物理、光谱化学分析、视觉、照明等，得到了广泛的应用。色度学最早开创与牛顿的颜色环概念。从 1931 年国际照明委员会 CIE 色度学系统建立以来，色度学在工业、农业、科学技术和文化事业等部门获得广泛的应用，指导者彩色电视、彩色摄影、彩色印刷、染料、纺织、造纸、交通

信号和照明技术的发展和应用。

任务一 辐射度学与光度学

发光体实际上是一个电磁波辐射源，光学系统可以看作是辐射能的传输系统，波长在380-760nm 范围内的电磁波称为“可见光”。研究可见光的测试、计量和计算的学科称为“光度学”，研究电磁波辐射的测试、计量和计算的学科称为“辐射度学”。

可见光是能对人的视觉形成刺激并能被人感受的电磁辐射，因为人们很自然的用视觉受到的刺激程度，即视觉感受来度量可见光。按这种视觉原则建立的表征可见光的量便属于光度学范畴。

光学特性包括描述其发光强弱以及其光强空间分布情况的光度学特性如光通量、发光强度、亮度、光束发散角等，以及描述其颜色（色光 LED）或颜色倾向性（白光 LED）的色度学特性参数如波长或颜色（光谱特性）、色温、显色指数等。

光源的光度学特性主要包括它发出的光的总量多少、它发出的光在某一个特定方向上的强弱、以及它发出的光强随空间的分布情况等。

1 立体角

在开始学习光度学之前，有必要介绍一个光度学中常用的几何量：立体角。在平面几何中，把整个平面以某一点为中心分成 360 度或 2π弧度，但是，发光体都是在它周围一定空间内辐射能量的，因此有关辐射能量的讨论和计算问题，将是一个立体空间问题。与平面角相似，我们把整个空间以某一点为中心，划分成若干立体角。立体角的定义是一个任意形状的封闭锥面所包含的空间称为立体角。用Ω表示，如图 1 所示。

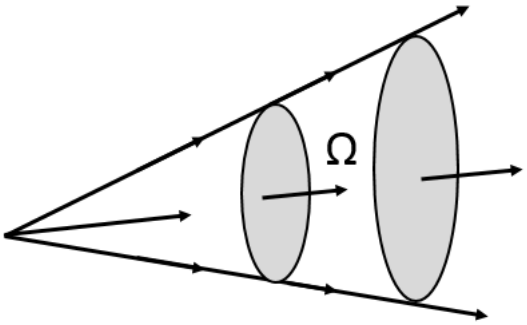


图 1　立体角示意图

立体角的单位：假定以锥顶为球心，已 r 为半径作一圆球，如果锥面在圆球上所截出得到面积等于 r^2，则该立体角为一个“球面度”（sr）。

整个球面的面积为 4πr^2，因此对于整个空间有

$$\Omega=\frac{4\pi r^2}{r^2}=4\pi$$

即整个空间等于 4π球面度。

2 辐射度学与光度学的基本概念

①辐射量与光学量

（1）辐射量

尽管位于可见光波长范围之外的电磁辐射不能为人眼所感知，但作为一种能量的发射，它依然是客观存在的，不同波长的辐射能够被相应的探测仪器所探测到，而且对人体也是有影响的，有些辐射、特别是高频辐射，对人体有极大的危害、甚至可以致命。因此，对电磁辐射，抛开其波长的差异，应当有一些通用的参数来衡量其辐射的强弱，这些用来衡量电磁辐射强弱的参数就是辐射量。

辐射量包括辐射能、辐射通量、辐射出射度、辐射强度、辐射亮度、辐射照度等六个。其中主要掌握辐射能和辐射通量。

1）辐射能Q_e

辐射能（通常用Q_e表示）是以辐射形式发射或传输的电磁波能量。当辐射能被其它物质吸收时，可以转变为其它形式的能量，如热能、电能等。显然，辐射能的量纲就是能量的量纲、其单位是焦耳（J）。

2）辐射通量Φ_e

辐射通量Φ_e又称为辐射功率，是指以辐射形式发射、传播或接收的功率。其定义为单位时间内流过的辐射能量。即：

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \qquad (0\text{-}1)$$

辐射通量的量纲就是功率的量纲，单位就是瓦特（W）。

除了以上两个主要的辐射量之外，还有以下四个辐射量：

辐射出射度：辐射出射度是用来反映物体辐射能力的物理量。其概念为辐射体单位面积向半球面空间发射的辐射通量。

辐射强度：其概念为点辐射源在给定方向上发射的在单位立体角内的辐射通量。

辐射亮度：其概念为面辐射源在某一给定方向上的辐射通量。

辐射照度：其概念为照射在某面元 dA 上的辐射通量与该面元的面积之比。与以上几个概念不同的是辐射照度是在辐射接收面上定义的概念，而以上几个则是在辐射发射面（或点）上定义的概念。

3）人眼视见系数

当人眼从一方向上观察一辐射体时，人眼视觉的强弱，不仅取决于辐射体在该方向上的辐射强度，同时还和辐射的波长有关。前面提到，人眼只能对波长在 380-760nm 范围内的电磁波辐射产生视觉，在此波长范围内的电磁波称为可见光。即使在可见光范围内，人眼对不同波长光的视觉敏感度也是不一样的。对黄绿光最敏感，对红光和紫光较差，对可见光以外的红外线和紫外线则全无视觉反应。光度学中，为了表示人眼对不同波长辐射的敏感差别，定义了一个函数 V(λ)，称为“视见函数”（光谱光视效率）。

把对人眼最灵敏的波长 λ=555nm 的视见函数规定为 1，即 V（555）=1，假定人眼同时观察两个位于相同距离上的辐射体 A 和 B，这两个辐射体在观察方向上的辐射强度相等，A 辐射的电磁波波长为 λ，B 辐射的波长为 555nm，人眼对 A 的视觉强度与人眼对 B 的视觉强度之比，作为 λ 波长的视见函数 V（λ），显然 V（λ）≤1。

不同人在不同的条件下，视见函数略有差异，为统一起见，1971 年国际照明委员会（CIE）在大量测定基础上，规定了视见函数的国际标准。表 1 为明视觉视见函数的国际标准。图 2 为相应的视见函数曲线。

表 1　明视觉视见函数国际标准

光线颜色	波长（nm）	V_λ	光线颜色	波长（nm）	V_λ
紫	400	0.0004	黄	580	0.8700
紫	410	0.0012	黄	590	0.7570
靛	420	0.0040	橙	600	0.6310
靛	430	0.0116	橙	610	0.5030
靛	440	0.0230	橙	620	0.3810
蓝	450	0.0380	橙	630	0.2650
蓝	460	0.0600	橙	640	0.1750
蓝	470	0.0910	橙	650	0.1070
蓝	480	0.1390	红	660	0.0610
蓝	490	0.2080	红	670	0.0320
绿	500	0.3230	红	680	0.0170
绿	510	0.5030	红	690	0.0082
绿	520	0.7100	红	700	0.0041
绿	530	0.8620	红	710	0.0021
黄	540	0.9540	红	720	0.00105
黄	550	0.9950	红	730	0.00052
黄	555	1.0000	红	740	0.00025
黄	560	0.9950	红	750	0.00012
黄	570	0.9520	红	760	0.00006

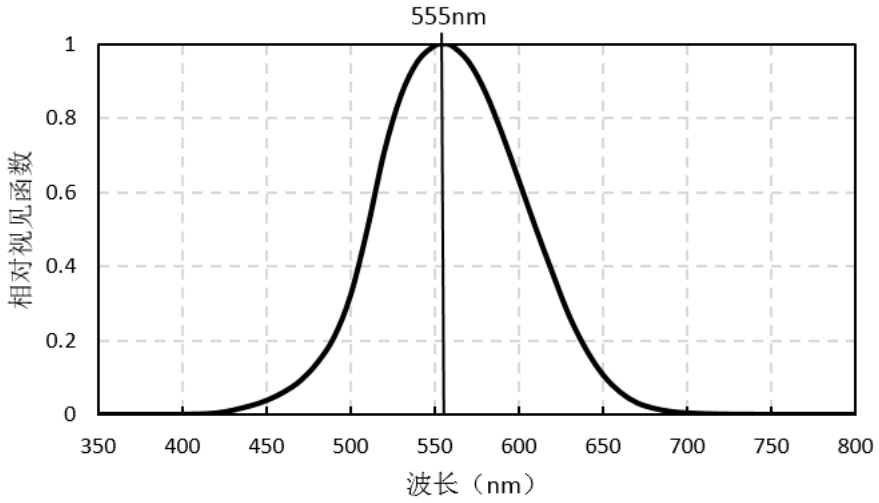


图 2　相对视见系数

有了视见函数，就可以比较两个不同波长的辐射体对人眼产生视觉的强弱。例如人眼同时观察距离相同的两个辐射体 A 和 B，假定 A 和 B 在观察方向的辐射强度相等，辐射体 A 辐射波长 600nm，辐射体 B 辐射波长 500nm，由表可得，V（600）=0.631，V（500）=0.323，这样辐射体 A 对人眼产生的视觉强度是辐射体 B 对人眼产生的视觉强度的 0.631/0.323 倍，

即近似等于两倍。反之，欲使辐射体 A 和辐射体 B 对人眼产生相同的视觉强度，则辐射强度应该是辐射体 B 辐射强度的一半。

（2）光学量

由于可见光的波长只占整个电磁波谱中一段很狭窄的范围，如果某一辐射的波段落在这一范围之外，那无论辐射功率如何的大，人眼也是无法感知的。换言之，对于非可见光波段的电磁辐射而言，无论其辐射量的大小如何，其对应的光学量都为零。

因此，为了描述人眼所能够感受到的光辐射的强弱，必须在辐射量的基础上再建立一套参数来描述可见光辐射的强弱，这就是光学量。光学量包括光通量、光出射度、光照度、发光强度、光亮度等。

1）光通量 Φ_v（单位：流明、即 lm）

光通量 Φ_v 是衡量可见光对人眼的视觉刺激程度的量，光通量的大小就是总的辐射通量中能被人眼感受到的那部分的大小。光通量的量纲与辐射通量一样仍是功率的量纲。但因为人的视觉对光辐射的感受还与光的波长（颜色）有关，所以光通量并不采用通用的功率单位瓦特作为单位，而是采用根据标准光源及正常视力而特殊定制的 “流明”作为单位、用符号表示则是 lm。波长为 555 纳米的单色光（黄绿色）每瓦特的辐射通量对应的光通量等于 683 流明，如图 3 所示。

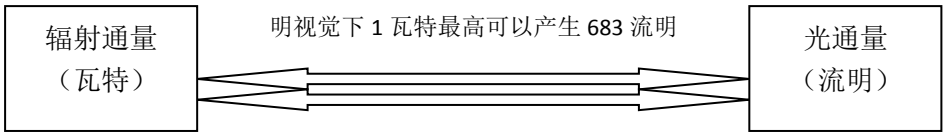


图 3 辐射通量与光通量的关系

由于人眼对不同波长光的相对视见率不同，所以不同波长光的辐射通量相等时，其光通量并不相等。例如，当波长为 555nm 米的绿光与波长为 650nm 米的红光辐射通量相等时，前者的光通量为后者的 10 倍。

光通量是光学量的主要单位之一。由光通量这一主要光学量可以引出以下两个光学量：光出射度、光照度。

2）光出射度 M_v

光源单位面积发出的光通量称为光源的光出射度，通常用符号表示为为 M_v。即：

$$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \qquad (0\text{-}2)$$

光出射度的单位为流明每平方米（lm/m^2）。

3）光照度 E_v

被照表面单位面积接受的光通量称为光照度，通常用符号 E_v 表示。即：

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \qquad (0\text{-}3)$$

光照度和光出射度的区别在于一个是（光源）单位面积发出光通量，另一个是（被照表面）单位面积接受的光通量，显然，光照度和光出射度的应当具有相同的量纲。当用来描述被照表面的光照度时，流明每平方米又被称为**勒克斯（*lx*）**。

4）发光强度 I_v

点光源在单位立体角内发出的光通量称为**发光强度**。即：

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \qquad (0\text{-}4)$$

发光强度是用来描述**点光源**发光特性的光学量，引入发光强度的意义是为了描述点光源在某一指定方向上发出光通量能力的大小：在指定方向上的一个很小的立体角元内所包含的光通量值，除以这个立体角元，所得的商即为光源在此方向上的发光强度。

值得注意的是发光强度是国际单位制中的七个基本量之一，也是基本的光学量。发光强度的单位是**坎德拉**（**cd**）又可称“烛光”。根据国际单位制的规定：一个波长为 555nm 的单色光源（黄绿色），在某方向上的辐射强度为$\frac{1}{683}W/sr$（式中sr为立体角的单位：球面弧度，或简称球面度），则该点光源在该方向上的发光强度为 1 坎德拉。由于发光强度是国际单位制的基本单位，光通量的单位流明也可以视为从坎德拉中导出：发光强度为 1cd 的匀强点光源，在单位立体角内发出的光通量即为 1lm。

显然，点光源的发光强度是和发光方向有关的，对于发光强度各向异性的点光源，其总的光通量可用下式求得：

$$\Phi_v = \int_\Omega I_v d\Omega \qquad (0\text{-}5)$$

而对于各向同性的点光源，其总的光通量就简单了：如果发光强度为I_v则光通量为：$\Phi_v = 4\pi I_v$。

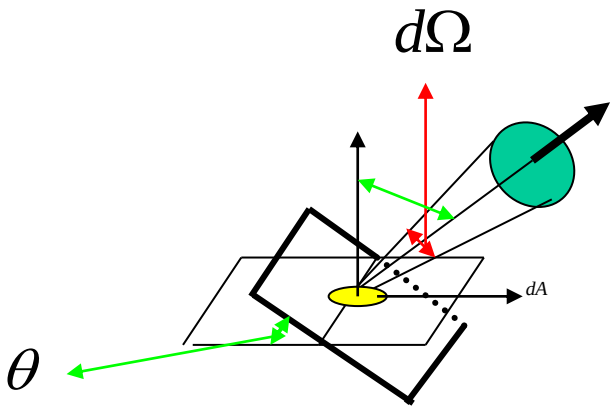


图 4 面元dA在θ方向上的光亮度示意图

5）光亮度L_v

光亮度又简称亮度，是指某发光面元dA在某方向θ上单位面积的发光强度。根据发光强度和光通量之间的关系，也可以指光源单位面积在某一方向上单位立体角内的光通量。即：

$$L_v = \frac{I_v}{\cos\theta dA} = \frac{d\Phi_v}{\cos\theta dA d\Omega} \qquad (0\text{-}6)$$

上式中θ是面元dA的法线方向与考察方向的夹角。以上公式的说明如图 4 所示：

光亮度的单位是坎德拉每平方米（cd/m^2），坎德拉每平方米又称为尼特（nit），nit 是旧的光亮度单位名称，现已废除不用。

光亮度虽不是基本的光学量，但却是体现包括光源和被照表面在内的任意发光表面在人眼看上去的表观明暗程度的重要光学量。以下的表 2 列出了常见发光表面的发光亮度：

表 2 常见发光表面的发光亮度

表面名称	光亮度(cd/㎡)	表面名称	光亮度(cd/㎡)
在地面上看到太阳表面	(1.5~2.0)×10^9	100 瓦白炽钨丝灯	6×10^6

日光下的白纸	2.5×10^4	6 伏汽车头灯	1×10^7
白天晴朗的天空	3×10^3	放映灯	2×10^7
在地面上看到的月亮的表面	$(3\sim5)\times10^3$	卤钨灯	3×10^7
月光下的白纸	3×10^2	超高压球形汞灯	1×10^8 ~ 2×10^9
蜡烛的火焰	$(5\sim6)\times10^3$	超高压毛细管汞灯	2×10^7 ~1×10^9

以上各光学量的单位除了本节介绍的标准单位之外，还有非标准的一些单位，如发光强度的单位可用“国际烛光”等，相见相关参考资料。

②光学量和辐射量之间的关系

（1）光谱光效率函数

具有相同辐射通量而波长不同的可见光分别作用于人眼，人眼感受到的明亮程度即光学量是不同的，这表明人的视觉对不同波长的光具有不同的灵敏度。人眼对不同波长的光的灵敏度是波长的函数，这一函数称为光谱光效率函数（或称光谱光视效率）。实验还表明，在观察视场明暗程度不同的情况下，光谱光效率函数也会稍有不同。这是由于人眼的明视觉和暗视觉是由不同类型的视觉细胞来实现的：

1）明视觉

在光亮(几个 cd/m² 以上)条件下，人眼的锥体细胞起作用。

明视觉条件下，锥体细胞能分辨物体的细节，很好地区分不同颜色。

2）暗视觉

在暗条件下，亮度约在百分之几 cd/m² 以下时，人眼的杆体细胞起作用。

在暗视觉条件下，杆体细胞能感受微光的刺激，但不能分辨颜色和细节。

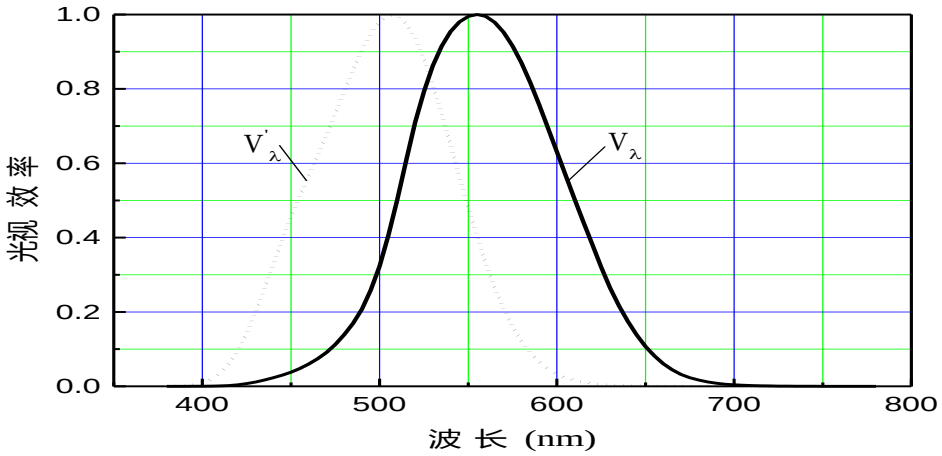


图 4 明视觉和暗视觉情形下的光谱光效率函数

3 朗伯辐射体及其辐射特性

对于磨得很光或镀得很亮的反射镜，当一束光入射到它上面时，反射光具有很好的方向性，即当恰好逆着反射光线的方向观察时，感到十分耀眼，而在偏离不大的角度观察时，就看不到反射光。对于一个表面粗糙的反射体或漫射体，就观察不到上述现象。除了漫反射体以外，对于某些自身发射辐射的辐射源，其辐亮度与方向无关，即辐射源各方向的辐亮度不变，这类辐射源称为朗伯辐射体。

绝对黑体和理想漫反射体时两种典型的朗伯体。在实际问题的分析中，常采用朗伯体作为理想的模型。

朗伯辐射体辐射特性——朗伯余弦定律

朗伯体反射或发射辐射的空间分布可表示为

$$d^2P=L\cos\theta dAd\Omega \qquad (0\text{-}7)$$

按照朗伯辐射体亮度不随角度变化的定义，得

$$L=\frac{I_0}{dA}=\frac{I_\theta}{dA\cos\theta}$$

即

$$I_\theta=I_0\cos\theta \qquad (0\text{-}8)$$

即在理想情况下，朗伯体单位表面积向空间规定方向单位立体角内发射（或发射）的辐射通量和该方向与表面法线方向的夹角θ的余弦成正比——朗伯余弦定律。朗伯体的辐射强度按余弦规律变化，因此，朗伯辐射体又称为余弦辐射体。

任务二　色度学

色度学特性是其光学特性的另一个重要方面，由于 LED 灯具对颜色要求的多样性，有些灯具对颜色的要求比较严格，于是，其色度学特性需要用包含波长（包括峰值波长、主波长、质心波长等次级概念）、色温、显色指数等来综合描述。

一、颜色视觉

颜色科学的一个重要发展是把主观的颜色感知和客观的物理刺激联系起来，建立起高度准确的定量学科——色度学。色度学是对颜色刺激进行测量、计算和评价的科学。

1 颜色辨认与 RGB 颜色空间

人眼可见的光是波长在 380 ~ 760 nm 范围内的电磁波，电磁波的波长超出这一范围人眼将无法感受到的，在这一波长范围内，不同波长的光会引起人眼不同的“颜色”感觉，这就是颜色形成的机理。颜色视觉正常的人在光亮条件下能看到的各种颜色从长波一端向短波一端的顺序是红色、橙色、黄色和紫色。表 3 是各种可见光颜色的波长和光谱的范围。

表 3　可见光颜色波长及光谱范围

颜色	波长（nm）	光谱范围（nm）
红	700	640-750
橙	620	600-640
黄	580	550-600
绿	510	480-550
蓝	470	450-480
紫	420	400-450

事实上，除了这些颜色之外，人眼还可以感受到在可见光波长范围内由波长连续变化而引起的连续变化彩色感受。除此之外，人眼还可以感受到黑色、白色、灰色等无色彩的颜色感受，以及粉红、暗红、土黄等颜色感受。

颜色和波长的关系并不是完全固定的，光谱上除了三点，即 572nm（黄）、503nm（绿）和 478nm（蓝）是不变的颜色外，其他颜色在光强增加时都略向红色或蓝色变化。

①混色与三基色原理

综上所述，不同波长的单色光会引起不同的彩色感觉，但相同的彩色感觉却可以来源于不同的光谱组合，人眼只能体会彩色感觉而不能分辨光谱成分。不同光谱成分的光经过混合能给人有相同彩色感觉，单色光可以由几种颜色的混合光来等效，几种颜色的混合光也可以由另外几种颜色的混合光来等效，这一现象称为混色。例如，彩色电视机中的彩色就是通过混色而实现的一种颜色复现过程，而并没有恢复原景物的辐射光谱成分。

在进行混色实验时，人们发现只要选取三种不同颜色的单色光按一定比例混合就可以得到自然界中绝大多数彩色，具有这种特性的三个单色光叫基色光，对应的三种颜色称为**三基色**，由此我们得到重要的三基色原理。

三基色的选取并不是任意的，而是要遵循以下原则。

（1）三基色的选取原则

1）三种颜色必须相互独立，也就是说，其中任意一种基色不能由其他两种颜色混合配出，这样可以配出较多的彩色；

2）自然界中绝大多数彩色都必须能按照三种基色分解；

3）混合色的亮度等于各种基色的亮度之和。

根据以上原则，在实际情况中，通常选取红、绿、蓝三种颜色作为三基色，由此而形成了所谓的 RGB 颜色空间。

（2）相加混色法和相减混色法

把三基色按照不同的比例混合获得彩色的方法称为混色法。混色法有相加混色和相减混色之分。彩色电视系统以及各种类型的计算机监视器等显示屏幕中，使用的是相加混色法。而印刷、美术等行业以及计算机的彩色打印机等输出设备使用的是相减混色法。

1）相加混色法

相加混色一般采用色光混色，色光混色是将三束圆形截面的红、绿、蓝单色光同时投影到屏幕上，呈现一幅品字形三基色圆图。如下图 5 所示：

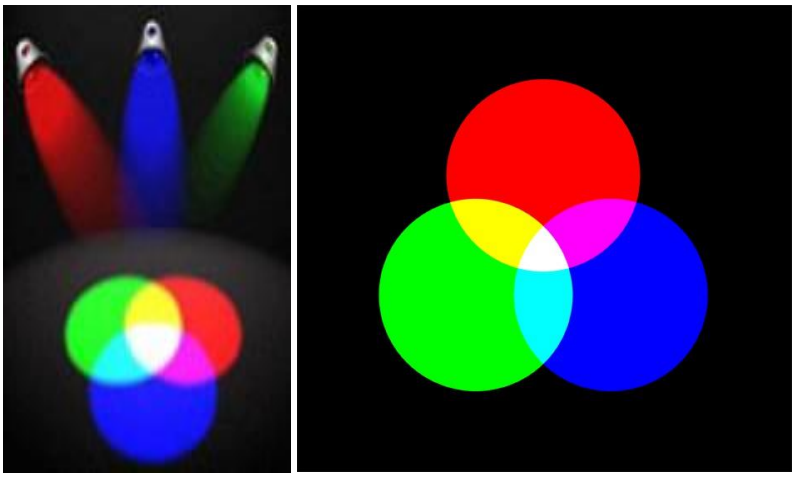


图 5 .相加混色法

由图 5 可见：

红光+绿光=黄光

红光+蓝光=紫光（品红光）

绿光+蓝光=青光

红光+绿光+蓝光=白光

以上各光均是按照基色光等量相加的结果。若改变三基色之间的混合比例，经相加可获得各种颜色的彩色光。

在三基色的相加混色实验中，1853 年，格拉斯曼（H.Gransman）教授总结出如下的相加混色定律，可以作为混色的重要指导思想。

• 补色律：自然界任一颜色都有其补色，它与它的补色按一定比例混合，可以得到白色或灰色。

• 中间律：两个非补色相混合，便产生中间色。其色调决定于两个颜色的相对数量，其饱和度取决于两者在颜色顺序上的远近。

• 代替律：相似色混合仍相似，不管它们的光谱成分是否相同。

• 亮度相加律：混合色光的亮度等于各分色光的亮度之和。

实现相加混色的方法还有空间混色法、时间混色法等。

2）相减混色法

相减混色法主要用于描述颜料的混色：指不能发光，却能将照来的光吸掉一部分，将剩下的光反射出去的色料的混合。色料不同，吸收色光的波长与亮度的能力也不同。色料混合之后形成的新色料，一般都能增强吸光的能力，削弱反光的亮度。在投照光不变的条件下，新色料的反光能力低于混合前的色料的反光能力的平均数，因此，新色料的明度降低了，纯度也降低了，所以又称为减光混合。

相减混色法中的三原色为黄、青和品红（即某种紫色）。这三种原色分别对相加混色中的三基色蓝、红和绿具有极高的吸收率。因此三原色按不同的比例混合也能得到各种不同的颜色。

②RGB 颜色空间

根据以上相加混色法的思想，把 R（红）、G（绿）、B（蓝）三种基色的光亮度作一定的归一化之后，作为直角坐标系三维空间的三个坐标轴，可以构成一个颜色空间，颜色空间中不同的坐标点就表示了不同的颜色。这样表示颜色的方法即为 RGB 颜色空间，由于 RGB 颜色空间是计算机等数字图像处理仪器设备所采用的表示图像颜色的基本方法，故 RGB 颜色

空间通常也称基础颜色空间。

从理论上，RGB 颜色空间可以表示出任意的颜色。

2 颜色的分类和特性

颜色可分为彩色和非彩色两大类。

非彩色指的是白色、黑色和各种深浅不同的灰色组成的系列，称为白黑系列。

当物体表面对可见光光谱所有波长反射比都在 80%-90%以上时，该物体为白色；其反射比均在 4%以下时，该物体为黑色；介于两者之间的是不同程度的灰色。纯白色的反射比应为 100%，纯黑色的反射比应为 0。在现实生活中没有纯白、纯黑的物体。对发光物体来说，白黑的变化相当于白光的亮度变化，亮度高时人眼感到是白色，亮度很低时感到时灰色，无光时时黑色。非彩色只有明亮度的差异。

彩色是指黑白系列以外的各种颜色。

彩色一般可用明度、色调和饱和度三个特性来描述。也可用其他类似的三种特性表示。

明度：人眼对物体的明暗感觉。发光物体的亮度越高，则明度越高，非发光体反射比越高，明度越高。

色调：彩色彼此相互区分的特性。即红、黄、绿、蓝、紫。不同波长的单色光具有不同的色调。发光物体的色调决定于它的光辐射的光谱组成，非发光物体的色调决定于照明光源的光谱组成和物体本身的光谱反射（透射）的特性。

饱和度：是指彩色的纯洁性。可见光谱中的各种单色光是最饱和的彩色。物体色的饱和度决定于物体反射（透射）特性。如果物体反射光的光谱带很窄，它的饱和度就高。

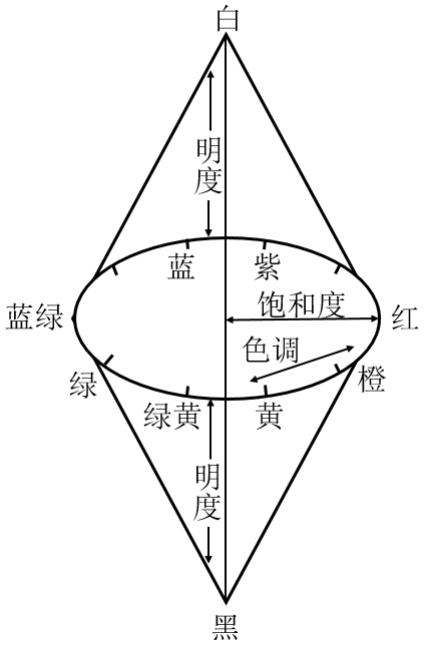


图 6　颜色的三维空间纺体示意图

用一个三维空间纺锤体可以将颜色的三个基本特性——明度、色调和饱和度表示出来，如图 6 所示，立体的垂直轴代表白黑系列明度的变化；圆周上的各点代表光谱上各种不同的色调（红、橙、黄、绿、蓝、紫等）；从圆周向圆心过渡表示饱和度逐渐降低。

二、 CIE 标准色度学系统

国际照明委员会(CIE)规定了一套标准色度系统，称为 CIE 标准色度系统，这一系统是近代色度学的基本组成部分，是色度计算的基础，也是彩色复制的理论基础之一。

CIE 标准色度学系统是一种混色系统，是以颜色匹配实验为出发点建立起来的。用组成每种颜色的三原色数量来定量表达颜色。

①颜色匹配

建立 CIE 的标准色度学系统的一个重要原因是为了解决当时在颜色混合和颜色匹配中出现的一些问题。

把两种颜色调节到视觉上相同或相等的过程称为**颜色匹配。**以下的图 6 是颜色匹配的一种实验装置图：

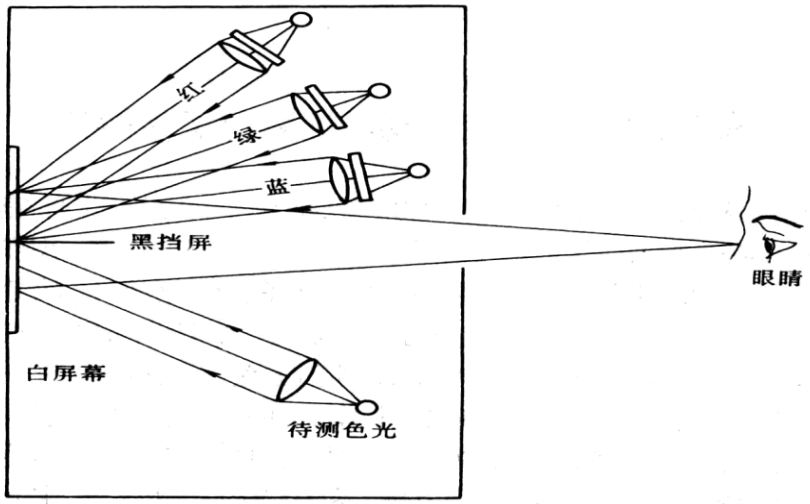


图 6 颜色匹配实验示意图

在以上的颜色匹配实验中，黑挡板下方是被匹配的颜色，即目标颜色，而黑挡板上方则是 RGB 颜色空间中的三基色红、绿和蓝。在实验中，CIE 首先规定了这三种基色光的波长，分别为：700nm（R）、546.1nm（G）、435.8nm（B）然后就用这三种基色光进行不同配比的颜色匹配实验，试图配出在观察者看来和黑挡板下方的目标颜色一致的颜色。

②CIE1931-RGB 系统

CIE 标准色度系统的第一个版本叫做 CIE1931-RGB 系统，是 CIE 在 1931 年发布的。这一色度系统是在类似于以上图 2.9 的实验装置上，以标准色度观察者在 1°-4° 的视场下的基本颜色视觉实验数据为基础而产生的。

在 CIE1931-RGB 系统的实验中，为了确切地描述颜色匹配中三种基色的相对比例，首先必须定出基色单位这样一个概念，即定出多大亮度的基色光为该基色光的“一个单位”。为此，需要提出“等能白光”这样一个概念，即假想的在整个可见光谱范围内光谱辐射能相等的光源的光色，称为等能白色，等能白光的辐射通量谱函数为整个可见光范围内的一条平行于横轴（波长轴）的直线。显然，如果波长分别为 700nm（R）、546.1nm（G）、435.8nm（B）的红、绿蓝光可以作为三基色而混合匹配出任意颜色的话，则此三基色配出等能白色时它们的辐射通量是相等的。由于人眼视觉效率函数依波长变化，三基色的光通量之间的关系如下表 2（这里，取 1 流明红光的光通量作为一个单位）：

表 2 三基色单位亮度的光通量关系表

颜色	红	绿	蓝	混合（等能白）
波长（nm）	700	546.1	435.8	—
单位量流明数	1.0000	4.5907	0.0691	5.6508

采用以上的三基色单位量作为标准，就可通过实验测定出混合配比出任意颜色所需要的三基色的量了。

颜色匹配实验中，当与待测色达到色匹配时所需要的三基色的量，称为**三刺激值**，记作R、G、B。一种颜色与一组R、G、B值相对应，R、G、B值相同的颜色，颜色感觉必定相同。三基色各自在R+G+B总量中的相对比例叫做色度坐标，用小写的符号r，g，b来表示。即：

$$\begin{cases} r = \dfrac{R}{R+G+B} \\ g = \dfrac{G}{R+G+B} \\ b = \dfrac{B}{R+G+B} = 1-r-g \end{cases} \qquad (0.9)$$

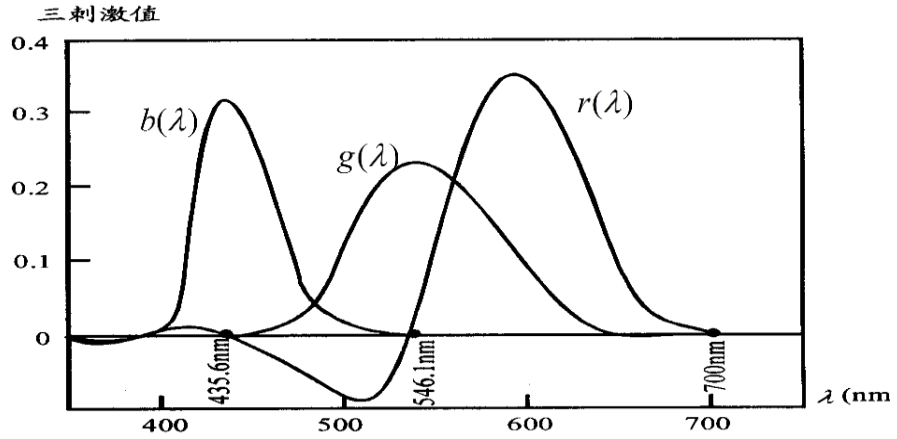


图 7 CIE1931-RGB 色度系统颜色匹配光谱三刺激值曲线

基于CIE1931-RGB系统的实验证明：几乎所有的颜色都可以用三原色按某个特定的比例混合而成。如果用上述规定单位量的三原色，在可见光380nm~780nm范围内每隔波长间隔（如10nm)对等能白色的各个波长进行一系列的颜色匹配实验，可得每一光谱色的三刺激值。实验得出的颜色匹配曲线如图7所示，图 2.10 中的 CIE1931-RGB 配光曲线也称为CIE1931-RGB标准色度观察者。

从图7中可以得到：任一波长的光，都可以由三基色的光按图中的比例匹配而成，但图中曲线表明，如要配出500nm附近某一段波长的光，需要的红色基色的光量为负值，即在实验中，要把这一数量的红光照射于被匹配光的一侧（即图0.5的黑挡板下方）才行。这对配光的物理意义以及数学计算而言，都是个不太完善的结果。

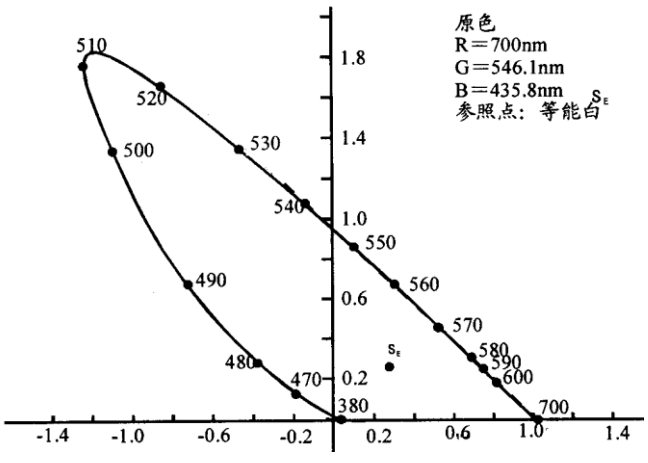


图 8 CIE1931 -RGB 系统色度图

根据配光的三刺激值色度坐标的公式，r、g、b三个色度坐标中只有两个是独立的，通常可选取r、g分别作为横坐标和纵坐标，可绘制出如上图0.7所示的1931 CIE-RGB 系统色度图。从图8中也明显可见，配出许多颜色所需要的红色基色分量的刺激值是负的。

③CIE1931-XYZ 标准色度学系统以及其它 CIE 色度学系统

如上所述、CIE1931-RGB 系统存在着一些缺点：在某些场合下，例如被匹配颜色的饱和度很高时，三色系数就不能同时取正；而且由于三原色都对混合色的亮度有贡献，当用颜色反方程计算时就很不方便。

因此，希望有一种系统能满足以下的要求：

三刺激值均为正；

某一原原色的刺激值，正好代表混合色的亮度，而另外两种原色对混合色的亮度没有贡献；

当三刺激值相等时，混合光仍代表标准（等能）白光。

这样的系统在以实际的光谱色为三原色时是无法从物理上实现的，CIE 通过研究提出了以以下假想色作为逻辑上的三基色的 XYZ 表色系统，即 CIE1931-XYZ 标准色度学系统。

CIE1931-XYZ 标准色度学系统中的三基色 X、Y、Z 实质上是 CIE1931-RGB 色度学系统中三基色 R、G、B 的线性组合。两者之间的转换关系如下式所述：

$$X = 2.7689R + 1.7517G + 1.1302B \qquad (0.10)$$

$$Y = 1.0000R + 4.9507G + 0.0691B \qquad (0.11)$$

$$Z = 0.0000R + 0.0565G + 5.5943B \qquad (0.12)$$

根据上式，可得到以下用于描述色品图的三刺激值：

$$\begin{cases} x = \dfrac{X}{X+Y+Z} \\ y = \dfrac{Y}{X+Y+Z} \\ z = \dfrac{Z}{X+Y+Z} = 1-x-y \end{cases} \qquad (0.13)$$

由此可得到如下图 9 的 CIE1931-XYZ 标准色度系统颜色匹配光谱三刺激值曲线。又称 CIE1931XYZ 标准色度观察者。

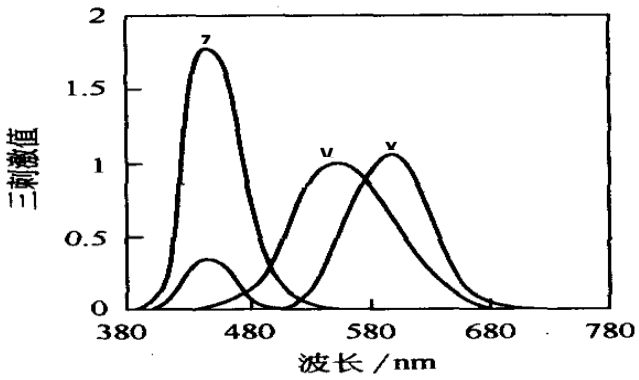


图 9 CIE1931-XYZ 标准色度系统颜色匹配光谱三

从图 9 中可见配光所用的三基色色品坐标 x、y、z 值没有出现负值。由图 0.12 色品坐标的实验数据可以画出以下图 10 所示的 CIE1931XYZ 系统色品图。

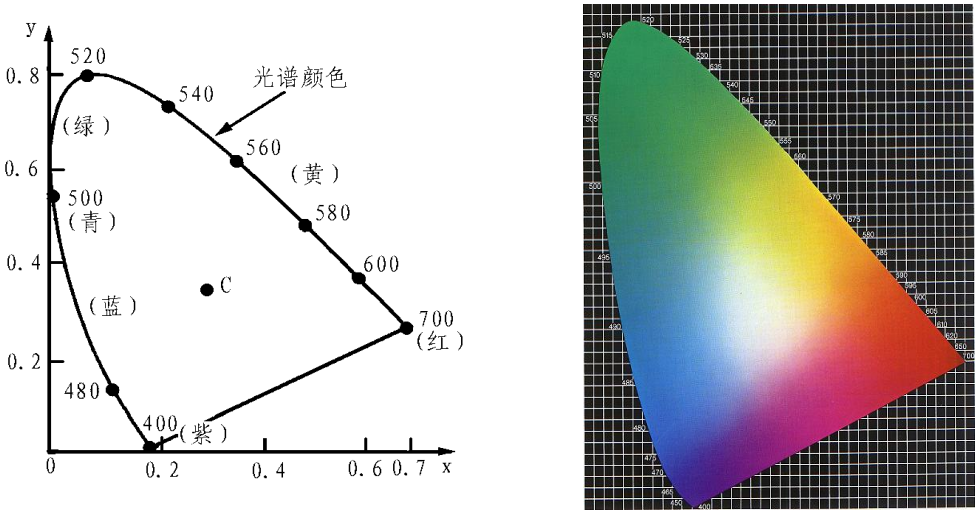


图 10 CIE1931-XYZ 标准色度系统色品图

从以上色品图中可见颜色刺激的值全为正值了。

CIE1931XYZ 标准色度系统是国际上色度计算、颜色测量、和颜色表征的统一标准，是所有测色仪器的设计与制造依据。

三、描述 LED 色度学特性的几个重要概念及其关系

在了解了颜色描述的基本概念之后，以下对描述 LED 色度学特性的几个重要概念及其关系进行介绍和分析。

①光源的波长与颜色

发光的颜色是色光 LED 的一个重要参数，对单色光而言，颜色的差异是由波长的不同而引起的：可见光的波长不同，引起人眼的颜色感觉就不同。

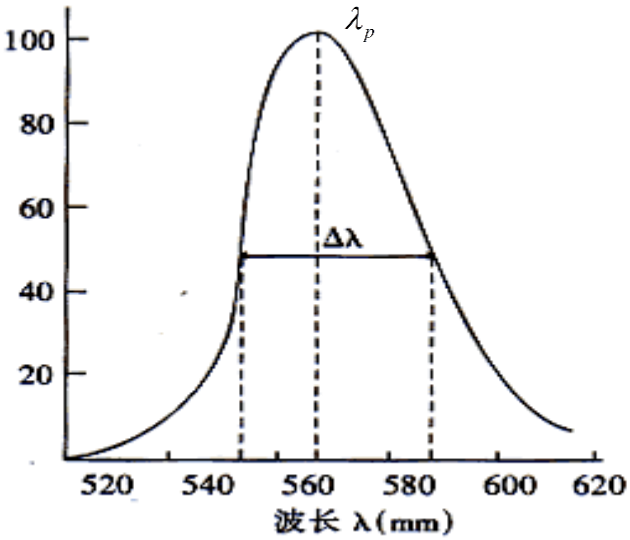


图 11 光源光谱特性曲线（黄绿色光）

但实际上，任何光源包括 LED，发出的光都不可能是绝对严格的单一波长的单色光，而是发出以某一波长为中心的一定波长范围的光，某一光源发光的相对强弱和波长的函数关系称为该光源的光谱特性，色光光源的光谱特性曲线通常是类似高斯分布（即正态分布）的曲线。光谱特性曲线如图 11 所示：

图 0.14 是黄绿色光的光谱特性曲线，在图中，可以引出几个常用的光学特性参数：

（1）峰值波长

图中曲线的最高点对应的波长称为峰值波长：无论什么材料制成的LED，都有一个相对光强度最强处（光输出最大），与之相对应有一个波长，通常叫做峰值波长，用 λp 表示。通常峰值波长主要用来描述单色光的颜色特性。

（2）谱线半宽度

图中的 $\Delta\lambda$ 通常称为谱线的半宽度，指相对光强为峰值波长一半时对应的曲线上两个点的波长间隔。半宽度反映谱线宽窄，是衡量光源单色性好坏的参数，各种单色光LED发光

的谱线半宽度小于40nm，单色性较好。

（3）主波长

主波长：有的光源发出的光不仅有一个峰值波长；甚至有多个高低不同峰值，并非单色光。为此描述此光源的色度特性，需要引入主波长的概念。主波长描述的是人眼所能观察到的由此光源发出的光的颜色倾向所对应的单色光的波长。

主波长的概念通常不是用来描述单色光，而是描述多个峰值的色光混合起来所呈现的颜色。例如GaP 材料可发出多个峰值波长，而主波长只有一个，它会随着LED 长期工作，结温升高而主波长偏向长波。

主波长的数值可用如下方法来确定：

用某一光谱色，按一定比例与一个确定的标准照明体（如CIE标准照明体A,B,C或D65)相混合而匹配出样品色，该光谱色的波长就是样品色的主波长。任何一个颜色都可以看作为用某一个光谱色按一定比例与一个参照光源（如CIE标准光源A、B、C等，等能光源E，标准照明体D65等）相混合而匹配出来的颜色，这个光谱色就是颜色的主波长。颜色的主波长相当于人眼观测到的颜色的色调（心理量）。

如果光源的单色性很好，则峰值波长 λp 的数值上也就基本上等于主波长。对于蓝光LED 芯片，峰值波长是要比主波长小一点（5nm 左右）。

（4）色品坐标

如前分析 CIE1931－XYZ 系统是所述，某种颜色在 CIE1931－XYZ 色度图中的色品坐标（或称色度坐标）是描述该颜色的色度特性的重要参量，颜色色品坐标的不同对应着颜色的差异。在实际 LED 封装中的分光等应用场合需要用到色品坐标的概念，此时通常用色度图中 X 和 Y 坐标的至来表示。对于白光 LED 的分光，色品坐标的 X、Y 值均为接近 0.33 的一个数值，表明白光中 X、Y、Z 三个颜色分量的比例接近，根据 X、Y 具体数值的不同，体现出一定的颜色偏向性。

色品坐标还可以用于说明主波长的概念：CIE1931－XYZ 色度图边沿的舌型曲线代表饱和度为 1 的纯光谱色，假若已知某光的色品坐标电为 A，则从色品坐标图中等能白（0.33，0.33）处引一线段指向 A，再将该线段延长，则延长线和色度图边沿的交点对应的波长则为该色光的主波长。

②光源的色温

色光光源的色度特性用波长来表示，但在LED或其它光源的制造和应用中，白光光源也是非常重要的一种类型。理想的白光是各种波长色光的“均匀”或“等能”的组合，因而无法用波长表示白光的颜色。

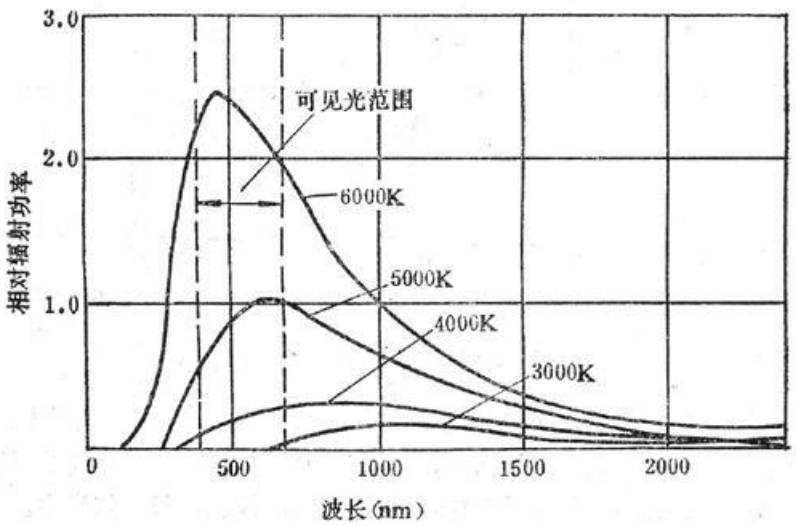


图 12 黑体辐射的温度特性

实际的白光总带有一点微弱的颜色偏向性，如偏红或偏蓝。由于白光的这种颜色偏向性和单色光的颜色明确性而言，是比较微弱的，所以实际的白光其颜色偏向性也不用感觉上偏向的那种颜色的波长来表示，而是借助于黑体辐射峰值波长随温度变化的特性，用“色温”这个参数来表示的。黑体辐射随温度变化的特性可用图12表示：

光源的色温定义如下：如果光源发出的光的颜色与黑体在某一温度下辐射的光颜色相同时,则此时黑体的温度称为该光源的色温。

色温是用来描述白光的颜色偏向性的，单色光的颜色不用色温来描述。

色温计算采用绝对温标，以 K（开尔文）为单位，黑体幅射的 0K＝-273 ° C 做为计算的起点。将黑体加热，随着能量的提高，便会进入可见光的领域。例如，在 2800 K 时，发出的色光和灯泡相同，我们便说灯泡的色温是2800K。

光源色温不同，光色也不同。

色温<3300K：光色为 温暖（带红的白色），稳重的气氛效果；

色温在3300-5000K：光色为 中间（白），爽快的气氛效果；

色温>5000k：光色为清凉型（带蓝的白色），冷的气氛效果。

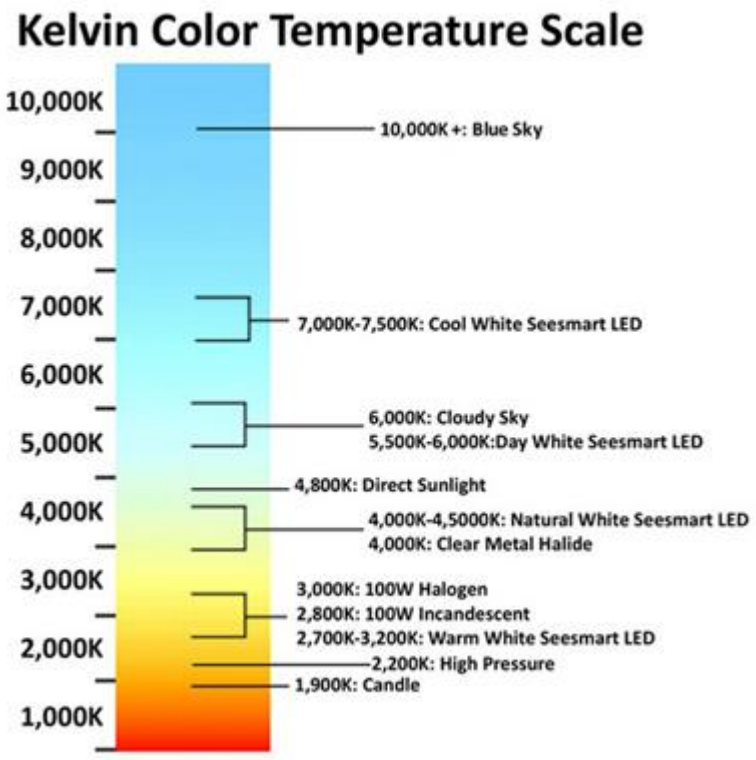


图 13 色温示意图

不同色温对应的颜色可用图13表示：

从图中可见，不同的色温对应于不同的颜色，必须强调的是色温是用来描述白光颜色偏向是暖色还是冷色的一个概念，对应于正白的色温表示该颜色恰好位于暖色和冷色的平衡点，即该颜色不偏暖也不偏冷，这个平衡点大概再5000多K左右。此时，与该色温对应的温度下，黑体辐射的峰值波长会取555nm左右的一个数值，该波长对应的单色光颜色为黄绿色。但此时绝对不能说和5000多K色温对应的颜色为黄绿色，因为色温不是描述单色光色度的参量，色温是描述白光色度特性的参量，它体现了白光中暖色和冷色的平衡程度。

③光源的显色性

显色性是用于描述白光光源综合色度特性的一个参数。

原则上，人造光源应与自然光源相同，使人的肉眼能正确辨别事物的颜色。

光源对于物体颜色呈现的程度称为显色性，通常用“显色指数（Ra）”来描述，它表示物体在某一光源照明下的颜色与基准光（太阳光）照明时颜色的偏离。显色性能较全面反映光源的颜色特性，它描述了事物的真实颜色（其自身的色泽）与某一标准光源下所显示的颜色关系。

Ra 值的确定，是将 DIN6169 标准中定义的 8 种测试颜色加上其它 7 种试样，在标准光源和被测试光源下做比较，色差越小则表明被测光源颜色的显色性越好。Ra 值为 100 的光源表示，事物在其灯光下显示出来的颜色与在标准光源下一致。代表性试样的选择如下：1－8 号：中彩度色：如 深红、深黄、深绿、深蓝等（明度为 6）；9－12 号：高彩度的红色、黄色、绿色、蓝色；13 号：白种人女性肤色，14 号：叶绿色，15 号：中国女性肤色(日本女

性肤色）。

显色性是通过与同色温的参考或基准光源（白炽灯或日光）下物体外观颜色的比较。光所发射的光谱内容决定光源的光色，但同样光色可由许多，少数甚至仅仅两个单色的光波组合而成，对各个颜色的显色性亦大不相同。相同光色的光源会有相异的光谱组成，光谱组成较广的光源较有可能提供较佳的显色品质。当光源光谱中很少或缺乏物体在基准光源下所反射的主波时，会使颜色产生明显的色差（color shift）。色差程度愈大，光源对该色的显色性愈差。

实际应用中对光源显色指数的要求见表 3：

表 3 不同场合下对光源显色指数的要求。

显指（CRI）	等级	显色性	应用场合
90-100	1A	优良	需要色彩精确对比的场所
80-89	1B		需要色彩正确判断的场所
60-79	2	普通	需要中等显色性的场所
40-59	3		对显色性的要求较低，色差较小的场所
20-39	4	较差	对显色性无具体要求的场所

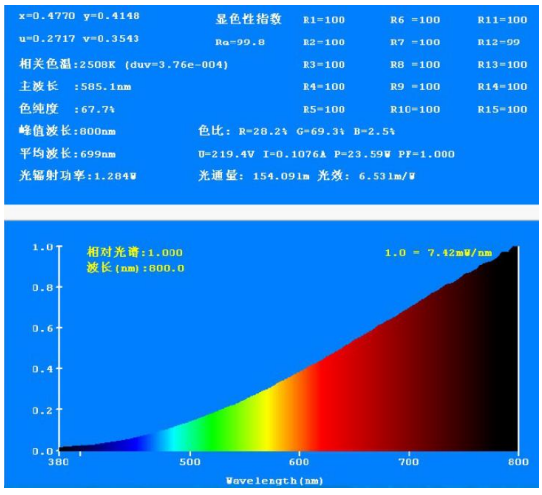
各种不同光源的显色指数如下的表 4：

表 4 各种光源的显色指数

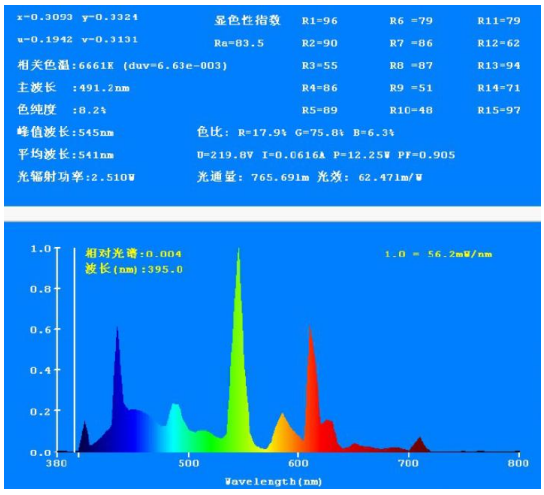
光源	白炽灯	荧光灯	卤钨灯	高压汞灯	高压钠灯	金属卤化物灯
显指	97	75-94	95-99	22-51	20-30	60-65

④光源光谱图

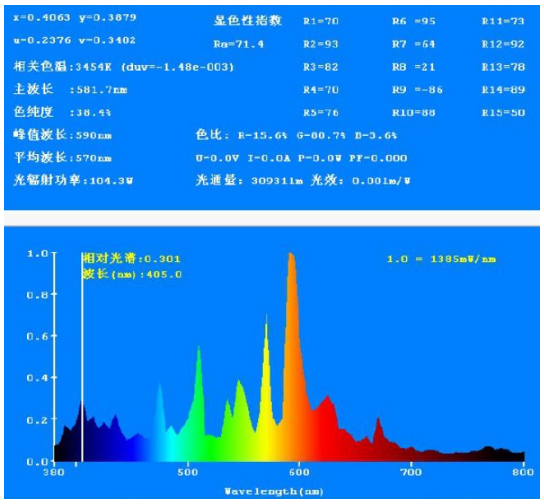
利用灯具光色电综合测试仪测试了白炽灯、荧光灯、高压钠灯和不同显示指数 LED 灯等各种不同光源的光色电参数和相应的光谱图，比较如下图 14 所示。



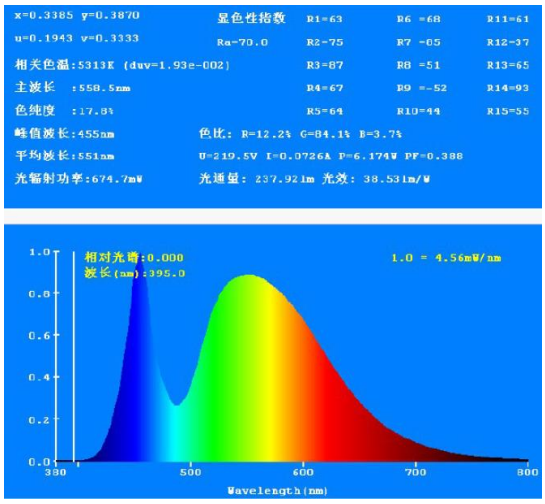
（a）白炽灯测试参数及光谱图



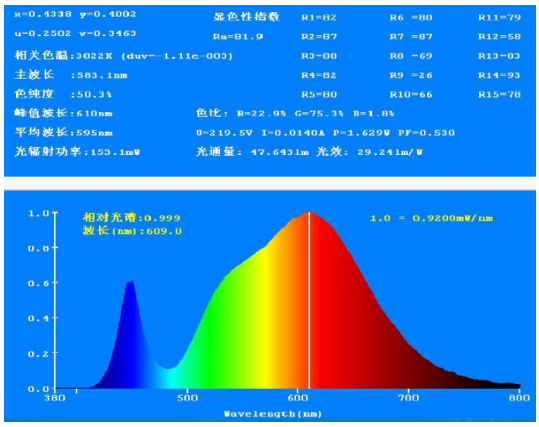
（b）荧光灯测试参数及光谱图



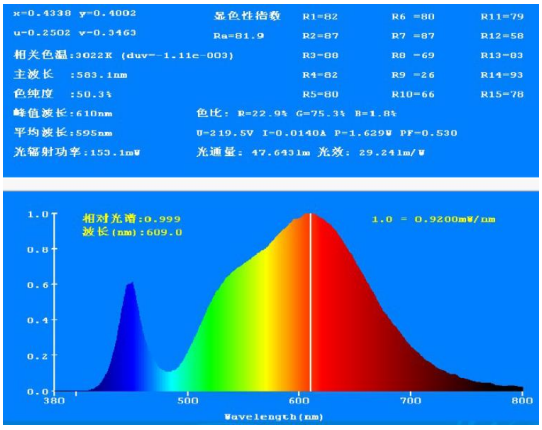
（c）高压钠灯测试测试机光谱图



（d）LED 灯（Ra：70）测试参数及光谱图



（e）LED 灯（Ra：81.9）测试参数及光谱图



（f）LED 灯（Ra：85.7）测试参数及光谱图

图 14　不同光源测试参数及光谱图对比

从图 14 中的不同光源测试参数及光谱图对比可知，光源的光谱分布决定了光源的显色性，光源的色温和显色性之间没有必然的联系，具有不同光谱分布的光源可能有相同的色温，但显色性可能差别很大。从光谱图外形特点也可反推这是何种光源，例如 LED 的光谱图，都有一个明显的蓝光波峰和一个比较宽的包含绿、黄、红的宽光谱，可见这款 LED 发光原理为 LED 蓝光芯片激发黄色荧光粉所得，这是常用的典型的 LED 封装形式：蓝光芯片+黄色荧光粉。从光谱图也可看出，显示指数的高低与红色光谱占比有很大关系，这可以在 LED 光源封装过程中荧光粉配比实验中提供重要的指导性方向。

任务三　电学特性

固体电光源 LED 是目前广泛使用的节能环保电光源，所以讨论照明技术中的电学特性主要针对 LED 光源的电学特性而言。对于 LED 作为一种 PN 结发光的电光源，显然，其电学特性参数也是非常重要的。LED 的电学特性参数主要是伏安特性（曲线），以及根据对该曲线的分析而提取出来的正向工作电流、正向压降、反向电流、反向压降、功率等。此外，作为一个电光源，显然发光效率也是其重要的联系电、光特性的参数。

①伏安特性曲线

器件的伏安特性是指流过器件的电流和器件两端施加的电压之间的函数关系。伏安特性是一切电阻型电子器件的主要特性，LED 属于这一范畴，因此，伏安特性是 LED 主要的电学特性。LED 的伏安特性曲线如下的图 14 所示：

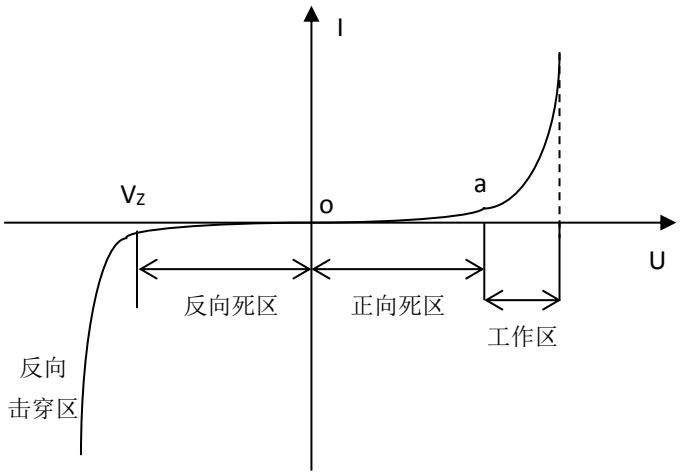


图 14 LED 伏安特性曲线

伏安特性也是表征 LED 芯片 PN 结制备性能主要参数。LED 的伏安特性具有非线性、单向导电的特点，即外加正偏压表现低接触电阻，反之为高接触电阻。

从图 0.17 中可见伏安特性曲线分为四段。

（1）正向死区：这是正向电压太低，LED 还没有开启工作的状态（图 oa 段），a 点对应的 V_a 为开启电压，当 V＜Va，外加电场尚克服不少因载流子扩散而形成势垒电场，此时 R 很大；开启电压对于不同 LED 其值不同，GaAs 为 1V，红色 GaAsP 为 1.2V，GaP 为 1.8V，GaN 为 2.5V。

（2）正向工作区：这是 LED 正常工作的发光状态，电流 I_F 与外加电压呈指数关系：

实际工作室，一般令处于一个合适的当然，如果正向电压加很高，或者电流很大，LED 也能发光，但是处于超负荷高发热工作状态，寿命将大大缩短。

（3）反向死区 ：V＜0 时 PN 结加反偏压，这是加上一个较小的反向电压的情形，LED 反向电流很小，处于反向截止状态

（4）反向击穿区：$V＜-V_Z$ ，V_Z 称为反向击穿电压，这是反向加上一个很高的电压的情形，反向电压 V_R 对应 I_R 为反向漏电流。当反向偏压一直增加使 $V_R＜-V_Z$ 时，则出现 I_R 突然增加而出现击穿现象。由于所用化合物材料种类不同，各种 LED 的反向击穿电压 V_R 也不同。反向击穿会对 LED 造成损坏。

②几个常用的重要参数

根据 LED 的伏安特性曲线，可以较为全面地分析 LED 的电学特性，在 LED 芯片制造、封装以及不同应用场合的器件选型和设计时，通常需要强调以下几个参数的。

（1）正向工作电流 I_F（mA）

正向工作电流包括以下几种情形：

1）额定工作电流 I_F（mA）： LED 在理想的线性工作区域，在此电流下可安全地维持正常的工作状态，一般情况下，小功率 LED 的额定工作电流为 20mA 上下；

2）最小工作电流 I_{FL}（mA）： LED 在小于此电流工作时，由于超出理想的线性工作区域，将无法保证 LED 的正常工作状态（尤其是在一致性方面）；

3）最大容许正向电流 I_{FH}（mA）： LED 最大可承受的正向工作电流，在此电流下，LED 仍可正常工作，但发热量剧增，LED 的使用寿命将大大缩短；

4）最大容许正向脉冲电流 I_{FP}（mA）： LED 最大可承受的一定占空比的正向脉冲电流的高度。

（2）正向压降 V_F（V）

伏安特性曲线中正向工作电流所对应的电压称为正向压降或正向电压。

正向电压 V_F 是指额定正向电流下器件二端的电压降，这个参数既与材料的禁带宽度有关，同时也标识了 PN 结的体电阻与欧姆接触电阻的高低。V_F 的大小一定程度上反映了电极制作的优劣。相对于 20 毫安的正向电流，红黄光类 LED 的 V_F 值约为 2 伏，而 GaN 基兰绿光类 LED 器件的 V_F 值通常大于 3 伏。

（3）反向电流 I_R（μA）：

LED 在一定的反向偏压（通常取 V_R=5V）下的反向漏电流。

反向漏电流 I_R 是指给定的反向电压下流过器件的反向电流值，这个值的大小十分敏感于器件的质量。通常在 5 伏的反向电压下，反向漏电流应不大于是 10 微安，I_R 过大表明结特性较差。

反向击穿电压是指当反向电压大于某一值时，反向漏电电流会急剧增大，反映了器件反向耐压的特性。对一个具体器件而言，漏电流大小的标准有所不同，在较为严格的情况下，要求在规定电压下，反向漏电流不大于 10 微安。

（4）反向电压 V_R（V）：

LED 在指定反向电流下所对应的反向电压。

（5）最大容许反向电压 Vz（V）：

LED 所能承受的最大反向电压，即反向击穿电压超出此电压使用，将导致 LED 反向击穿。

（6）耗散功率 P_D（W）：

LED 的耗散功率 $P_D=I_F \cdot V_F$，耗散功率既是 LED 消耗的电功率多少。根据耗散功率的大小通常把 LED 划分为小功率和大功率，一般以 0.5W——1W 作为分界线。

（7）发光效率 η_e

发光效率简称光效，光源的发光效率定义为其光通量与所消耗功率的比值。即：

$$\eta_e = \frac{\Phi_v}{P_D} \qquad (0.14)$$

光效的单位是 lm/w（流明每瓦）。

通常白炽灯与荧光灯的光效分别为 15lm/w 与 60lm/w，灯泡的功率越大，光通量越大。对于一个性能较高的 LED 器件，光效为数十 lm/w，实验室水平达到 100lm/w 以上。为使 LED 器件更快地用于照明，必须进一步提高 LED 器件的发光效率，目前，LED 的光效可达 200lm/w。

人类将会迎来一个固态光源全面替代传统光源的新时代。

任务四　热学特性

对于照明技术中，电光源在能量转换时不是百分百将电能全部转换为光能，很大一部分电能转换位热能损耗了，而转换成热能部分如果没有及时疏解将导致热能集聚温度升高影响电光源的性能，尤其是大功率照明电光源。

为了满足照明领域对 LED 高光通量的要求，在优化器件结构、提高发光效率的同时，增加单个 LED 器件的输入功率是最有效直接的方法，但随着功率的增加 LED 会产生大量的热量引起芯片温度的升高，温度升高将影响 LED 量子效率低、寿命减少、颜色漂移等技术指标，所以，在大功率照明中必须了解热学特性，考虑散热问题。

由此可见，除了以上描述 LED 工作瞬时状态的光学和电学特性参数之外，在应用的角度， LED 的使用寿命以及工作状态的稳定性和可靠性等参数，以及与寿命和稳定性密切相关的热学特性，也是非常重要的特性参数。

①LED 的使用寿命与可靠性

LED 与传统光源相比较的一个重要优势就是其使用寿命长：一般而言，LED 的使用寿命在 50,000 小时以上，还有一些生产商宣称其 LED 可以运作 100,000 小时左右。LED 之所以持久，是因为它不会产生灯丝熔断的问题。LED 不会直接停止运作，但它会随着时间的流逝而逐渐退化。理论预测以及实验数据表明，高质量 LED 在经过 50,000 小时的持续运作后，还能维持初始灯光亮度的 60%以上。假定 LED 已达到其额定的使用寿命，实际上它可能还在发光，只不过灯光非常微弱罢了。通常，LED 的寿命结束不是指其不能发光的时间，而是指其光通量（或额定电流）下降到最初使用时一半的时间。

可靠性是在 LED 的工作（发光）期间，其各个主要特性参数保持在额定范围内的几率，这也是衡量 LED 产品优劣的一个重要指标。

②LED 的热学特性

影响 LED 寿命长短的最重要因素是散热的好坏，要想延长 LED 的使用寿命，就必须降低 LED 芯片的温度。对于单个 LED 而言．如果热量集中在尺寸很小的芯片内而不能有效散出．则会导致芯片的温度升高．引起热应力的非均匀分布、芯片发光效率和荧光粉激发效率下降。当温度超过一定值时．器件的失效率将呈指数规律攀升。

（1）结温及其对 LED 性能的影响

结温就是 LED 中 PN 结的温度，这是影响 LED 光学特性、电学特性以及寿命的最重要和最根本的参数。

据分析：元件温度每上升 2℃，可靠性将下降 l0％。为了保证器件的寿命，一般要求 PN 结的结温在 110℃以下。而且，随着 PN 结结温的升高，白光 LED 器件的发光波长将发生红移。在 110℃的温度下．波长可以红移 4～9 nm，从而导致 YAG 荧光粉吸收率下降，总的发光强度会减少，白光色度变差。在室温附近，温度每升高 l℃．LED 的发光强度会相应减少 l％左右．当器件从环境温度上升到 l50℃时．亮度下降多达 35％。当多个 LED 密集排列组成白光照明系统时，热量的耗散问题更严重。因此解决散热问题已成为 LED 应用，尤其是功

率型 LED 应用的首要问题。

（2）降低 LED 结温的途径

LED 的输入功率是元件热效应的唯一来源，能量的一部分变成了辐射光能，其余部分最终均变成了热，从而抬升了元件的温度。显然，减小 LED 温升效应的主要方法，一是设法提高元件的电光转换效率（又称外量子效率），使尽可能多的输入功率转变成光能，另一个重要的途径是设法提高元件的热散失能力，使结温产生的热，通过各种途径散发到周围环境中去。降低结温所采取的主要的途径如下：

1）减少 LED 本身的热阻；

2）良好的二次散热机构；

3）减少 LED 与二次散热机构安装介面之间的热阻；

4）控制额定输入功率；

5）降低环境温度

【项目小结】

近年来辐射度学、光度学和色度学的发展特别迅速。光源的种类日新月异地发展着，其发光效率与颜色得到了很大的改善。在信息技术飞速发展的今天，辐射度量、光度量以及色度量的评价和测量已成为照明技术发展的基础，因此，建立光通量、光强度、照度、亮度、色度等一系列计量标准，提高国防、工业、医疗和照明等领域的有关测试和计量技术的进步，推动我国辐射度、光度以及色度计量的标准化，具有重要意义。

作为一个电光源，电学特性参数也是非常重要的，随着 LED 器件的发光效率不断提高，人类将会迎来一个固态光源全面替代传统光源的新时代。热学特性决定了照明电器的寿命和可靠性，也是不容忽视的。

【思考与练习】

1、人眼的锥细胞与杆状细胞的功能比较。

2、名称解释

（1）光通量

（2）照度

（3）发光强度

（4）显示指数

（5）色温

3、LED 作为显示器光源有和优点？

4、利用 LED 产生白光的方式有哪几种？与一般路灯照明比较，采用 LED 有哪些优缺点？

项目二　照明中常用光学器件

【知识目标】

1、掌握照明中常用透镜、反射器及其组合等光学器件特点；

2、了解照明中常用光学器件在不同场合中的应用；

3、会分析照明光学器件中几何光学传播规律。

【技能目标】

1、能利用照明中常用光学器件进行简单的照明设计；

2、会选择和应用照明中常用的光学器件。

【任务导入与项目分析】

照明技术中光场分布是通过对光线传播方向的控制，最终实现光通量的合理分配，满足照明设计要求的过程。而控制光线的途径，在照明光学设计里，一般均采用光的几何光学传播规律：折射和反射（很少使用物理光学原理）。对光线的折射和反射，离不开透镜元件和反射元件。

透镜元件和反射元件，已经广泛应用于照明中的各个方面，成为照明设计中不可或缺的一部分。射灯、路灯、自行车灯和汽车车灯等各个方面，都有使用。本项目简要介绍照明中常用的透镜元件和反射元件结构及其各自的光学性能。具体的设计方法在下一个项目中介绍。

任务一 照明中常用透镜

透镜是照明灯具中不可或缺的光学元件，它一般有以下几种材料种类：

（1）硅胶透镜

硅胶是一种高活性吸附材料，属于非晶态物质，其化学分钟寺为 m$\mathbf{Si}\boldsymbol{O_2}\cdot$n$\boldsymbol{H_2O}$。不溶于水和任何溶剂，无毒无味，化学性质稳定，除强碱、氢氟酸外不与任何物质发生反应。各种型号的硅胶因其制造方法不同形成不同的微孔结构。硅胶的化学组份和物理结构，决定了它具有许多其他同类材料难以替代的特点：吸附性高、热稳定性好、化学性质稳定、有较高的机械强度等。因为硅胶耐温高（也可以过回流焊），因此常用直接封装在 LED 芯片上。一般硅胶透镜体积小，直接 3-10mm。

（2）PMMA 透镜

光学级 PMMA（Polymethyl methacrylate 的简称）也称为聚甲基丙烯酸甲酯,俗称有机玻璃或亚克力，是迄今为止合成透明材料中质地最优异、价格比较适宜的品种。PMMA 是目前最优良的高分子透明材料,有极好的透光性能,可见光透过率达到 92%。紫外光会穿透 PMMA，

与聚碳酸酯（PC）相比，PMMA 具有更佳的稳定性。PMMA 允许小于 2800nm 波长的红外线通过；存在特殊的有色 PMMA，可以让特定波长的红外光透过，同时阻挡可见光。PMMA 是塑胶类材料，它的优点有：生产效率高（可以通过注塑完成），透光率高（3mm 厚度时穿透率 93%左右）；它的缺点主要是耐温 70%（热变形温度 90℃）

（3）PC 透镜

光学级 PC（Polycarbonate 的简称）也称聚碳酸酯，属于塑胶类材料，由于聚碳酸酯结构上的特殊性，现已成为五大工程塑料中增长速度最快的通用工程塑料。采用光学级 PC 制作的光学透镜不仅可用于照相机、显微镜、望远镜和光学测试仪器等，还可用于电影投影机透镜、复印机透镜、红外自动调焦投影仪透镜、激光束打印机透镜，以及各种棱镜、多面反射镜等诸多系统，应用范围广。它的优点有：生产效率高（可以通过注塑完成），耐温高（130℃以上）；它的缺点主要是透光率稍低（87%）。

（4）玻璃透镜

玻璃是一种无规则结构的非晶态固体，玻璃具有高透过率。玻璃分为两种，冕牌玻璃（K）和火石玻璃（F），其中，K 代表冕牌玻璃，F 代表火石玻璃。冕牌玻璃的特征是其折射率较小而色相系数较大，有 QK、K、PK、BaK、ZK、LaK 等；火石玻璃的特征则相反，其折射率较大而色相系数较小，有 KF、QF、BaF、F、ZF、ZBaF、LaF、TF、AlaF 等。另外，材料的光学均匀性、化学稳定性（折射率大时往往较软，化学稳定性差）、气泡、条纹、内应力等，皆对成像有影响。总之应根据仪器要求挑选不同等级的玻璃。光学玻璃材料，具有透光率高（97%）耐温高耐紫外线等等优点；它的缺点主要是易碎、非球面精度不易实现、生产效率低和成本高等。

1.1 凸透镜和凹透镜

凸透镜和凹透镜在照明光学设计中是应用的最简单透镜形式。凹透镜可以实现对光线的发散；凸透镜可以实现对光线的会聚和发散（会聚之后再发散）。如图 1 所示。

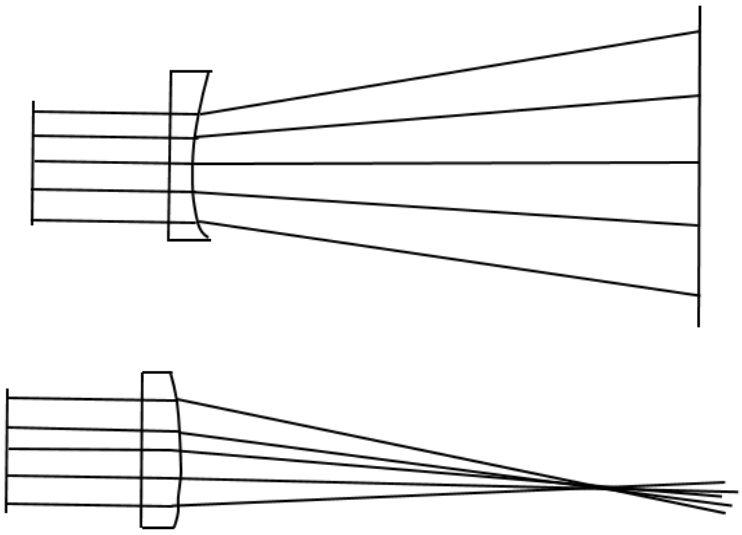


图 1　凹透镜和凸透镜

调整凹透镜和凸透镜与光源的距离或调整透镜的曲率半径，均可以实现对光线出射角度的调整。

以图 1 中凸透镜为例，当其孔径为 D，曲率半径为 r，凸透镜折射率为 n 时，其出射光线发散角度为：

$$\theta = 2 \cdot \arctan \frac{(n-1)\,D}{2 \cdot r} \qquad (2.1)$$

凸透镜或凹透镜的阵列组合，可形成复眼透镜。与全反射透镜组合，控制全反射透镜的发光角度。

1.2 棱镜

棱镜可以用来改变光线前进方向，使光线偏折一定的角度。通过切割球面，获得的偏心球面透镜，在偏折光线的同时，也可起到扩散或会聚光线的作用。

光线经棱镜折射后，出射光线向棱镜较厚的一边折射。从图 2 所示的图中，还可以看出，棱镜对不同波长颜色的光线，偏折角度是不同的。对蓝光偏折角度最大，对红光偏折角度最小，这就是著名的牛顿色散实验。根据折射定律分析此现象，可知：同种材料，对于不同波长，其折射率是不同的。

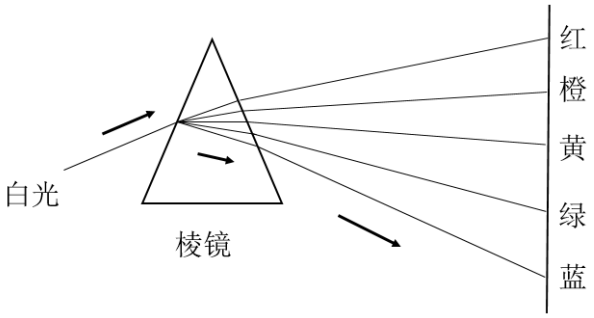


图 2　三棱镜对白光的色散示意图

在照明光学设计中，在需形成非对称光形效果如非对称照度分布或非对称光强分布时，经常采用棱镜以实现此效果。且棱镜的采用，并非一定要用平面棱镜的结构，大多数情况下，均是对光线的偏转和光束角的调整同时进行，即采用偏心的球面透镜或柱面镜，在改变主光线传播方向的同时，改变整个光束发散角度。此种透镜，在警示灯具、自行车灯、汽车车灯等灯具中，均有使用。

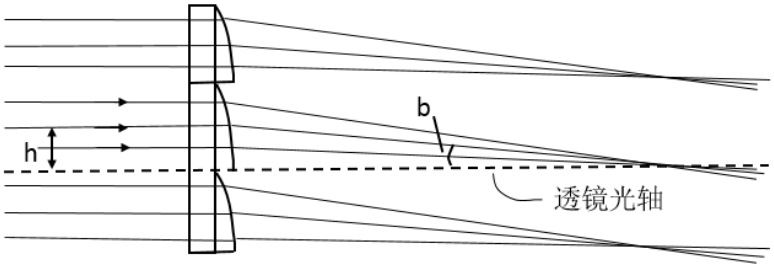


图 3　偏心球面镜

偏转角计算公式：

$$b = \text{atctan}\frac{(n-1)\,h}{r} \qquad (2.2)$$

1.3 菲涅尔透镜

菲涅尔透镜 (Fresnel lens)，又称螺纹透镜，是由法国物理学家奥古斯汀·菲涅尔（ Augustin ·Fresnel）发明的，他在 1822 年最初使用这种透镜设计用于建立一个玻璃菲涅尔透镜系统——灯塔透镜。菲涅尔透镜多是由聚烯烃材料注压而成的薄片，也有玻璃制作的，镜片表面一面为光面，另一面刻录了由小到大的同心圆，如图 4 所示，它的纹理是利用光的干涉及衍射和根据相对灵敏度和接收角度要求来设计的，透镜的要求很高，一片优质的透镜必须是表面光洁，纹理清晰，其厚度随用途而变，多在 1mm 左右，特性为面积较大，厚度薄及侦测距离远。

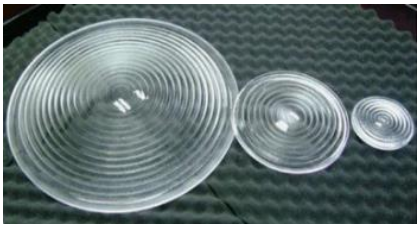


图 4　菲涅尔透镜

菲涅尔透镜的设计思想是将透镜分成若干个具有不同曲率的环带，使通过每一环带的光线近似会聚在同一像点上。菲涅尔透镜设计原理如图 5 所示，这也是传统透镜到菲涅尔透镜结构的变化过程。菲涅尔透镜的作用主要有两个：一个是聚焦作用；另一个是准直作用。

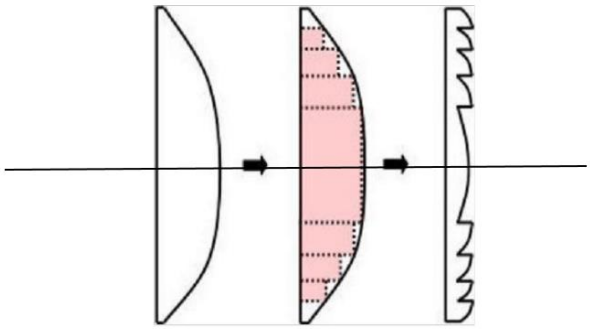


图 5　菲涅尔透镜设计原理图

菲涅尔透镜的分类：

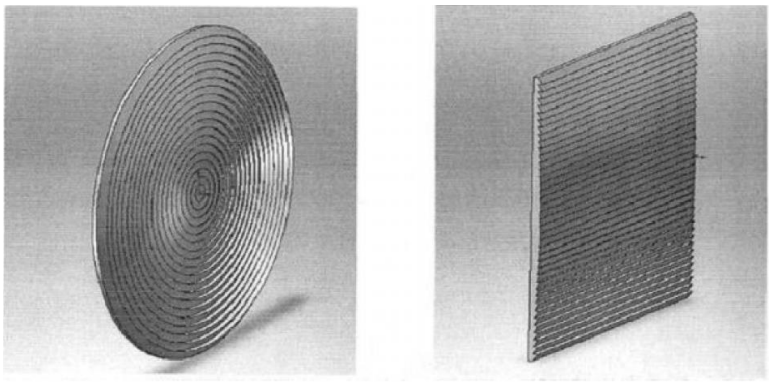
1、从光学设计上来划分，分为正菲涅尔透镜和负菲涅尔透镜。

正菲涅尔透镜：光线从一侧进入，经过菲涅尔透镜在另一侧出来聚焦成一点或以平行光射出，焦点在光线的另一侧，并且是有限共轭。这类透镜通常设计为准直镜（如投影用菲涅尔透镜、放大镜等）以及聚光镜（如太阳能用聚光聚热用菲涅尔透镜等）。

负菲涅尔透镜：和正菲涅尔透镜刚好相反，焦点和光线在同一侧，通常在其表面进行涂层，作为第一反射面使用。

2、从结构上划分，主要有：圆形菲涅尔透镜、菲涅尔透镜阵列、柱状菲涅尔透镜、线性菲涅尔透镜、衍射菲涅尔透镜、菲涅尔反射透镜、菲涅尔光束分离器和菲涅尔棱镜。

圆形菲涅尔透镜和线性菲涅尔透镜如图 6 所示。



（a）圆形菲涅尔透镜　　（b）线性菲涅尔透镜

图 6　两种不同聚焦方式的平板菲涅尔透镜

在大孔径的照明系统中，常采用菲涅尔透镜(螺纹透镜)来代替单透镜或二次曲面透镜，其优点有：1）减小透镜的质量和厚度；2）在一定程度上减小单透镜带来的球差（即不同入射高度的光线，经单透镜球面折射之后，不会聚于同一点的现象)。球差的原理如图 7 所示。

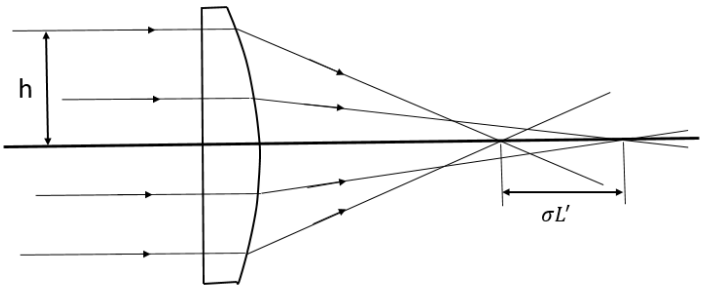


图 7　单透镜球差原理示意图

菲涅尔透镜既可以校正球差，又可以减小透镜的重量和厚度，这在大口径的照明系统中是非常重要的。基于以上优点，菲涅尔透镜在大口径照明系统、航空障碍灯、汽车信号灯等灯具中均有大量使用。

菲涅尔透镜设计主要的步骤包括分割环带高度和计算曲率半径，除此之外还有如分角度法和分厚度法等多种菲涅尔透镜设计方法。后面项目会做专门详细的介绍具体设计方法，这里不做赘述。

1.4 全反射透镜

全反射透镜是指一面或多面，运用全反射原理，实现光线收集或分配的透镜元件。全反射透镜广泛应用于照明的各个领域。射灯、准直透镜、航空障碍灯、自行车灯均有使用。

全内反射透镜（TIR，Total Internal Reflection)，是一种典型的复杂结构光学元件。它一般运用二次曲面，形成全反射面，参与光线的会聚，之后通过复眼透镜或其他透镜形式的组合，最终实现对光线的收集和光通量分配，达到预定的照明效果。如图 8 所示。全内反射透镜原理分为两个部分：中间类似于一个凸透镜，将 LED 小角度光线会聚；边缘利用全反射原理，将 LED 大角度光线转换到所需角度范围内，达到出射均匀的目的。

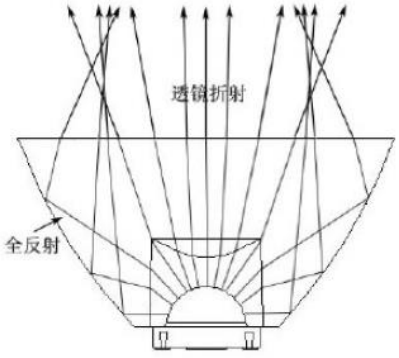


图 8　全内反射透镜

若对全内反射透镜的出光面做某些处理，如将出射介面为平面做成特殊的表面，出射光的角度将发生变化，从而改变光出射均匀性。如图 9-11 所示。也可将其出光介面做成蜂窝状，在透镜的出光面上增加蜂窝阵列，使得出光更加均匀，不需要新的模具，增加出光角度，防止出现芯片镜像，效率将降低 2-3%。如图 12（a）和（b）对比图所示。

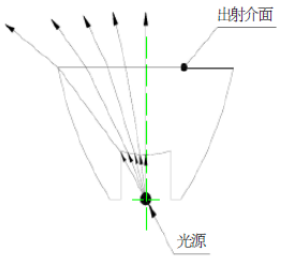


图 9 出射介面为平面

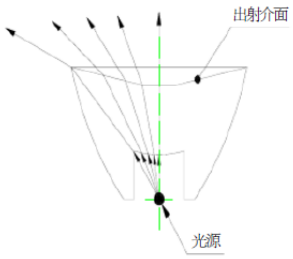


图 10 出射介面为圆锥面

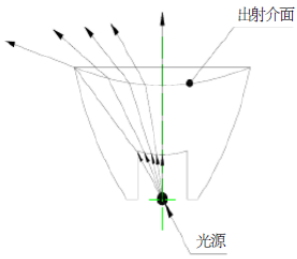
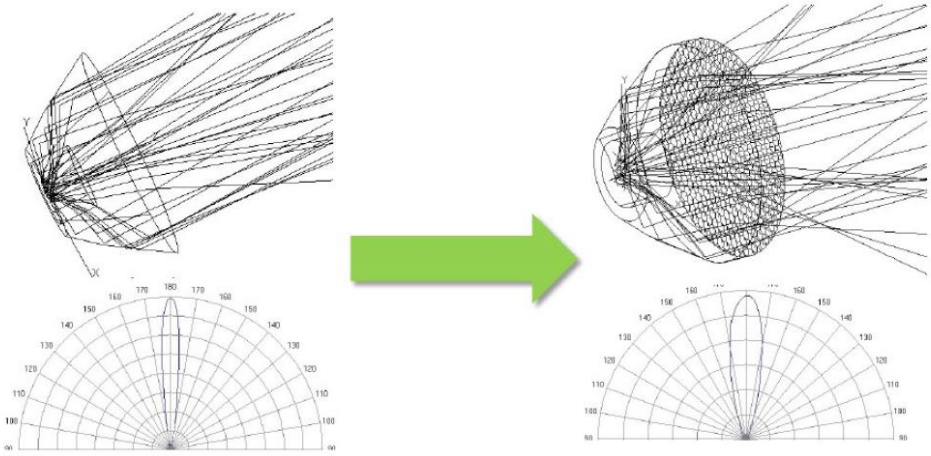


图 11 出射介面为圆弧面



（a）光束角 15°，效率 92%　　（b）光束角 25°，效率 90%

图 12 TIR 蜂窝面出光面与平面出光面光束角和效率对比

1.4 自由曲面透镜

在照明光学设计中，自由曲面透镜的使用也是很常见的。路灯透镜、均匀照明透镜、背光透镜等等，均采用自由曲面实现对光线的有效控制并最终获取符合要求的照度分布或光强分布。

自由曲面透镜设计，后续有专门一项目任务，进行详细介绍其设计方法。

任务二 照明中常用反射器

反射器设计基础理论：

将反射器上任意点（ 角度θ ）接收的光源光线反射到与轴线成希望夹角α的方向上，换言之， 要注定反射器上各区域将光线投射到什么方位，这是设计的第一步。为此，需要下述数据：

1. 光束分布（ 配光）

用出射光线光强该光线与轴线夹角α表示，采用函数式或曲线图都可以；

2. 光源发出光线的光分布（ 光强分布）

采用从它发出的各条光线与轴线夹角θ表示，常用曲线表示，在近似的计算中光源的配光常用余弦分布；

3. 从要求的光束分布的总光通，考虑光源与反射器之间的结构限制等因素确定光源的功率。

计算中遵循光通量的守恒。具体细节如下：

1. 对从光源射向四周空间的光线，要选择合适的角度间隔进行划分，如图 13 所示。

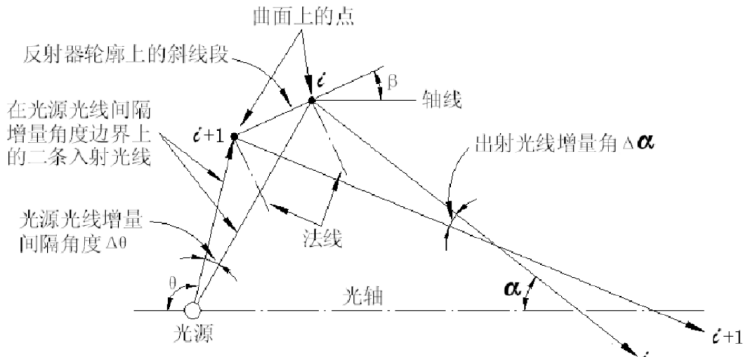


图 13　角度间隔划分

2. 计算在光源光分布和出射光束光分布中各个角度间隔内的立体角；

3. 采用光通增量=光强×立体角增量的公式计算各问隔内的光通，其中光强由光源光分布和出射光束光分布中提供，往往取间隔角度的中值角上的值；

4. 找出光源能提供的光通和光束中需要的光通之差值，得到折换系数，统一二者的差异；

5. 找出光源在某个θ角间隔内能提供的光通正好和光束在某个α角间隔内需要光通相一致的对应关系，即××θ角内的光线射到××α角中去的θ～α关系。

根据θ～α的关系，求出反射器曲面形状，这是计算反射器的第二步。其中包括：

1. 用公式计算光源光线间隔角度中反射面与轴线夹角β；

2. 列表写出光源光线间隔角度θ和β角的正切值；

3. 以光源置放点为原点，光轴（ 对称轴） 为 x 轴，写出从光源发出的各光线间隔角度上光线的方程： $y=\tan\theta x$；

4. 设反射器起始于第一点的坐标是 x_0y_0，它的斜率为 $\tan\beta_0$，则反射器上第一段的折线方程为： $y-y_0=(x-x_0)\tan\beta$；

5. 计算该线段与下一个光线间隔角度的交点 x_1y_1，即解下述方程组：

$$y_1-y_0=(x_1-x_0)\tan\beta_0$$

$$y_1=\tan\theta x_1$$

6. 重复过程 5，计算下一个点，不同的是将 x_1y_1 的值作为 x_0，y_0 来处理，β_0 与 $\tan\theta$ 另取新的值；

7. 完成上述全过程就可得到一个需要的反射器曲线。

2.1 二次曲线反射器

二次曲线包括圆、椭圆、抛物线和双曲线。

从圆锥曲线的一个焦点发出的光线，经过圆锥曲线的反射后，得到的反射光线所在的直线，相较于曲线的另一个焦点（抛物线的另一个焦点可看为无穷远点），即：

圆面的光学反射同学：从圆心发出的光线，经圆球表面反射后，仍会聚于圆心；

椭圆面的光学反射特性：从椭圆一个焦点发出的光线，经椭圆表面反射后，会聚于另一个焦点。

抛物面的光学反射特性：从抛物面焦点发出的光线，经抛物面反射后，形成平行光；

双曲面的光学反射特性：从双曲面一个焦点发出的光线，经双曲面反射后，反射光线反向延长线，交于双曲面另一个焦点。

当光源偏离抛物面、椭圆面、双曲面焦点时，光线经反射后，光束发散和会聚情况发生变化。

利用二次曲面反射器的性质，可以实现光线的收集和角度控制，完成光学设计要求不高的一些照明光学设计需求。

2.2 其他反射器设计

简单二次曲面反射器，很难满足越来越高的照明光学设计要求。例如：轨道灯、射灯反射器设计，既要求照度均匀，又要求外形尺寸、轮廓基本不变的情况下，方便实现同一系列灯具，发光角度的改变，比如 16°到 40°的变化，此种设计要求可采用如图 14 的鳞甲反射器方案。

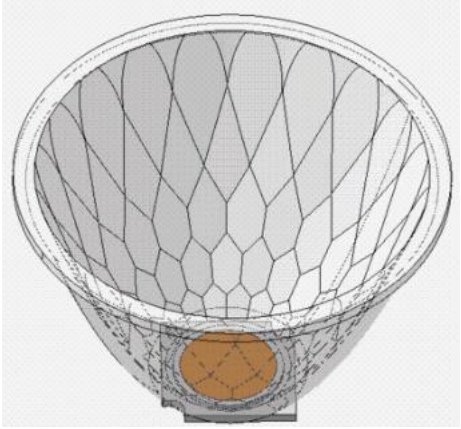


图 14　鳞甲反射器

又如：车灯尾灯的设计，需要形成横向、纵向不同的发光角度，可采用自由曲面反射器实现；车灯前照灯的设计，需要形成非对称的光型要求，也可以采用自由曲面反射器实现。此类反射器的设计较复杂，在后续内容将详细介绍。

2.3 反射器透镜组合形式

反射器与透镜的组合照明系统，也比较常见。

例如，采用全内反射透镜与鳞甲反射器的组合，可提高光通量利用率，并方便在不改变反射器外形尺寸的情况下，修改照明系统的发光角度。

【项目小结】

照明技术中光场分布是通过对光线传播方向的控制，最终实现光通量的合理分配，满足照明设计要求的过程。而控制光线的途径，在照明光学设计里，一般均采用光的几何光学传播规律：折射和反射（很少使用物理光学原理）。对光线的折射和反射，离不开透镜元件和反射元件。

透镜元件和反射元件，已经广泛应用于照明中的各个方面，成为照明设计中不可或缺的一部分。射灯、路灯、自行车灯和汽车车灯等各个方面，都有使用。本项目简要介绍照明中常用的透镜元件和反射元件结构及其各自的光学性能。

【思考与练习】

1、照明中常用的光学器件有哪些？

2、菲涅尔透镜的设计思想是什么？

3、全内反射透镜的特点是什么？

4、照明中常用的反射器有哪些？各有什么特点？

项目三　照明光学设计

【知识目标】

1、掌握照明中常用光学设计方法；

2、了解照明中常用光学器件在不同场合中的应用的光学设计修正；

3、会分析照明光学设计中的照度分布和配光曲线。

【技能目标】

1、能利用照明中常用光学器件进行简单的照明设计；

2、会选择和应用照明中常用的光学器件。

【任务导入与项目分析】

能源问题是 21 世纪最热门的话题之一，而 LED 在其中扮演着极其重要的角色。为了使 LED 芯片发出的光能够更好地输出，提高 LED 出光效率，得到最大程度地利用，并且在照明区域内满足设计要求，需要对 LED 进行光学系统的设计。其中，在封装过程中的设计被称为一次光学设计，这主要是针对芯片、支架和模粒这三要素的设计，而 LED 之外进行的光学设计被称为二次光学设计，也叫二次配光设计，这也是本项目主要的介绍的内容。

LED 二次光学设计主要考虑的是光通量、光强、照度和亮度，而这些属于非成像光学的研究范围。在非成像光学中，评判系统性能的优劣不再适用于成像光学中的相差理论和成像质量，而是吧光能利用率作为系统的评价标准。如何提高光能利用率也是照明系统的关键问题，如何将 LED 发出的光线最大限度地利用起来并满足照明要求，这就是二次光学设计考虑的范畴。

任务一 全反射透镜设计

任何光源都是有尺寸的，点光源只是针对相对尺寸较小的光源而采取的近似办法，是一种理想化光源。但是，面向点光源的光学设计仍然有其必要的研究意义，是面向扩展光源的光学设计的基础。由于光源的相对尺寸很小，故认为从光源其他部分发出的光与从光源中心射出的光之间的差别可忽略不计。所以，面向点光源的光学二次设计方法其实质就是：只处理从光源中心射出的光线。设计所要完成的任务就是将每一条光线经过折射(或反射)投射到指定方向或指定位置。因此，问题的关键就在于：如何确定每一条光线所要投射的方向或位置来实现所要求的光场分布。

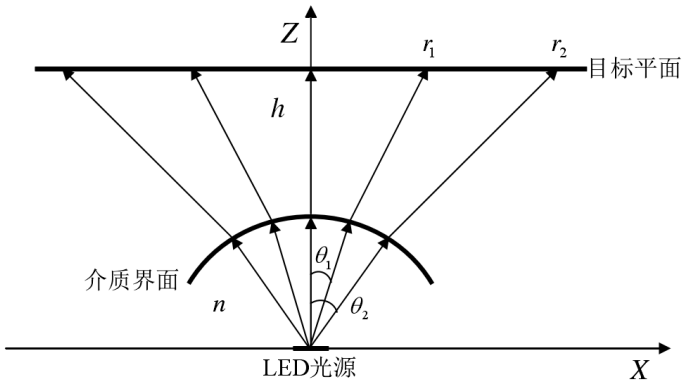


图 1　实现照度均匀的透镜设计示意图

1.1 射灯透镜设计

这里以在目标接收平面上实现照度均匀的透镜设计为例，如图 1 所示。光源位于坐标原点，目标接收面距离原点的高度为 h ，透镜介质的折射率为 n ，光线经过介质界面折射而投射到目标接收面来实现均匀照度的要求。平行于光轴方向(Z 轴)的出射光线入射到目标接收面的中心，随着出射光线与光轴的夹角逐渐变大，夹角为θ_1和θ_2的出射光线分别入射到目标接收面上的半径为 r_1和 r_2的位置上。因此，合理地分配各光线的走向，即可实现目标接收面上的照度均匀。考虑到与光轴的夹角为θ_2的光线入射到目标接收面上半径为 r_2 的位置上，与 Z 轴的夹角小于θ_2的光线入射到目标接收面上的位置。因θ_2和 r_2是任选的一条光线，故关系式实际上就决定了光源每条光线的走向。通过能量守恒关系和光的折反射定律就可以得到介质界面的解析式，从而求得满足设计要求的自由曲面。

发光体实际上是一个电磁波辐射源，光学系统可以看作是辐射能的传输系统，波长在 380-760nm 范围内的电磁波称为“可见光”。研究可见光的测试、计量和计算的学科称为“光度学”，研究电磁波辐射的测试、计量和计算的学科称为“辐射度学”。

可见光是能对人的视觉形成刺激并能被人感受的电磁辐射，因为人们很自然的用视觉受到的刺激程度，即视觉感受来度量可见光。按这种视觉原则建立的表征可见光的量便属于光度学范畴。

光学特性包括描述其发光强弱以及其光强空间分布情况的光度学特性如光通量、发光强度、亮度、光束发散角等，以及描述其颜色（色光 LED）或颜色倾向性（白光 LED）的色度学特性参数如波长或颜色（光谱特性）、色温、显色指数等。

光源的光度学特性主要包括它发出的光的总量多少、它发出的光在某一个特定方向上的强弱、以及它发出的光强随空间的分布情况等。

全反射透镜是指一面或多面，运用全反射原理，实现光线收集或分配的透镜元件。全反射透镜广泛应用于照明的各个领域。射灯、准直透镜、航空障碍灯、自行车灯均有使用。

全内反射透镜（TIR，Total Internal Reflection），是一种典型的复杂结构光学元件。它一般运用二次曲面，形成全反射面，参与光线的会聚，之后通过复眼透镜或其他透镜形式的组合，最终实现对光线的收集和光通量分配，达到预定的照明效果。如图 2 所示。全内反射透镜原理分为两个部分：中间类似于一个凸透镜，将 LED 小角度光线会聚；边缘利用全反射原理，将 LED 大角度光线转换到所需角度范围内，达到出射均匀的目的。

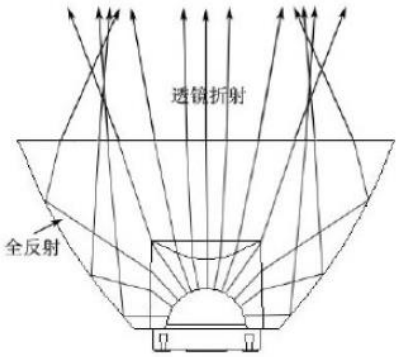


图 2　全内反射透镜

若对全内反射透镜的出光面做某些处理，如将出射介面为平面做成特殊的表面，出射光的角度将发生变化，从而改变光出射均匀性。如图 3-5 所示。也可将其出光介面做成蜂窝状，在透镜的出光面上增加蜂窝阵列，使得出光更加均匀，不需要新的模具，增加出光角度，防止出现芯片镜像，效率将降低 2-3%。如图 6（a）和（b）对比图所示。

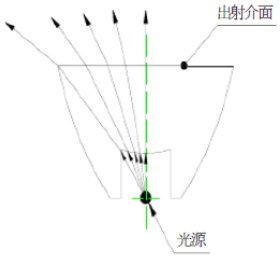


图 3 出射介面为平面

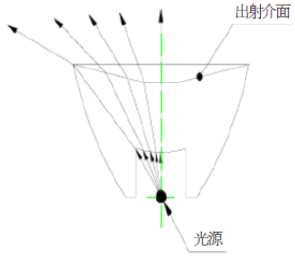


图 4　出射介面为圆锥面

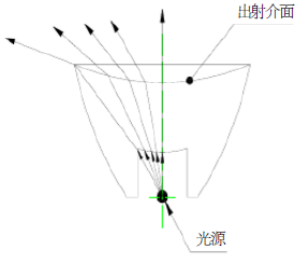
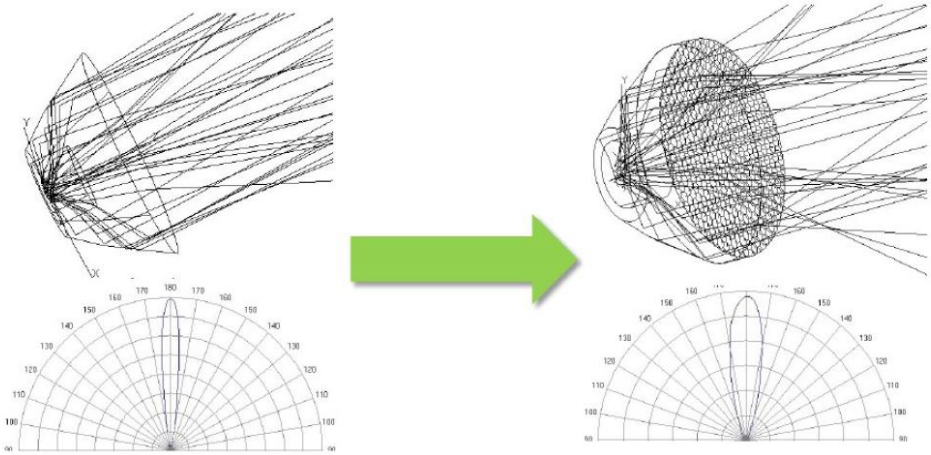


图 5　出射介面为圆弧面



（a）光束角 15°，效率 92%　　（b）光束角 25°，效率 90%

图 6　TIR 蜂窝面出光面与平面出光面光束角和效率对比

1.2 自行车前照灯透镜设计

自行车 LED 前照灯配光透镜，包括 TIR 透镜，所述 TIR 透镜的中部从后向前依次开有第一通光空腔、及第二通光空腔，第一通光空腔的后端面正对 TIR 透镜的光源面，TIR 透镜的光源面嵌入安装有 LED 灯珠；第二通光空腔的前端面开在 TIR 透镜的出光面上，出光面的轴心与第二通光空腔前端面的轴心重合，出光面上半部分向外凸出形成中心厚边缘薄的外凸半球

面,出光面下半部分向内凹陷形成中心凹陷深边缘薄的内凹半球面。本实用新型采用了凸透镜、凹透镜对光束的会聚和发散作用,并基于棱镜对光束的偏折原理,设计了结构简单、造价低廉的自行车 LED 前照灯配光透镜。

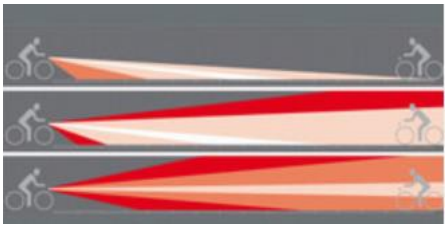


图 7　自行车前照灯

电源接小灯线.　即开小灯时产品点亮.接雾灯线.即开雾灯产品点亮.接发动机线.即打着火行车灯点亮.产品特性：1）外壳材料：采用高精密度氧化铝及 6MM 钢化玻璃透镜铸造而成；2）外观：产品的整体外观设计，表面精细化工艺，光泽优越等，适合中档或个性化改装路线车型，能很好地满足欧美消费者的理念；3）散热与功率：纯铝的散热能力，仅次于铜，决定我们的产品设计可以做到很足的功率；4）防护等级：采用纯铝结构，通过防水硅胶密封，达到**防护等级 IP68（3 米水深情况下）；5）抗震动/抗腐蚀能力：氧化铝及 6MM 钢化玻璃结构具备很强的抗震动/抗腐蚀能力；6）光利用率：采用 6MM 钢化玻璃，并经过配光；采用先进的恒流技术，出光均匀，光色饱满，发光角度，光色高度保持一致性；7）产品执行标准：欧洲经济委员会 ECE R87 及中国 GB 标准，汽车昼间行驶灯配光性能；8）IC 电路的应用：产品工作时出现过压/低压，过流，过热时，能起到智能调控，保障产品正常使用安装指南：a、接后倒车灯(雾灯)并联，开倒车灯（雾灯）则鹰眼灯开。b、安装位置，后车牌灯底部。



图 8　自行车前照灯透镜

自行车前照灯 10 米元测试面光斑图如图 9 所示。

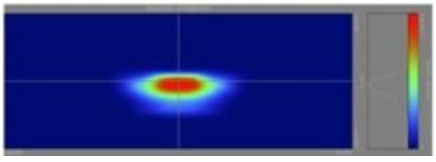


图 9　10m 测试面光斑图

任务二 菲涅尔透镜设计

任何光源都是有尺寸的，点光源只是针对相对尺寸较小的光源而采取的近似办法，是一种理想化光源。但是，面向点光源的光学设计仍然有其必要的研究意义，是面向扩展光源的光学设计的基础。由于光源的相对尺寸很小，故认为从光源其他部分发出的光与从光源中心射出的光之间的差别可忽略不计。所以，面向点光源的光学二次设计方法其实质就是：只处理从光源中心射出的光线。设计所要完成的任务就是将每一条光线经过折射(或反射)投射到指定方向或指定位置。因此，问题的关键就在于：如何确定每一条光线所要投射的方向或位置来实现所要求的光场分布。

菲涅尔透镜 (Fresnel lens) ，又称螺纹透镜，是由法国物理学家奥古斯汀·菲涅尔 (Augustin ·Fresnel) 发明的，他在 1822 年最初使用这种透镜设计用于建立一个玻璃菲涅尔透镜系统——灯塔透镜。菲涅尔透镜多是由聚烯烃材料注压而成的薄片，也有玻璃制作的，镜片表面一面为光面，另一面刻录了由小到大的同心圆，如图 4 所示，它的纹理是利用光的干涉及衍射和根据相对灵敏度和接收角度要求来设计的，透镜的要求很高，一片优质的透镜必须是表面光洁，纹理清晰，其厚度随用途而变，多在 1mm 左右，特性为面积较大，厚度薄及侦测距离远。

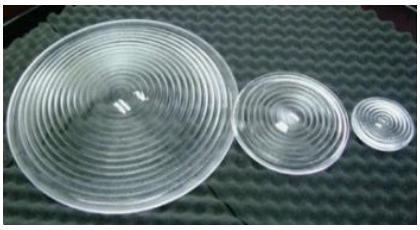


图 10　菲涅尔透镜

菲涅尔透镜的设计思想是将透镜分成若干个具有不同曲率的环带，使通过每一环带的光线近似会聚在同一像点上。菲涅尔透镜设计原理如图 5 所示，这也是传统透镜到菲涅尔透镜结构的变化过程。菲涅尔透镜的作用主要有两个：一个是聚焦作用；另一个是准直作用。

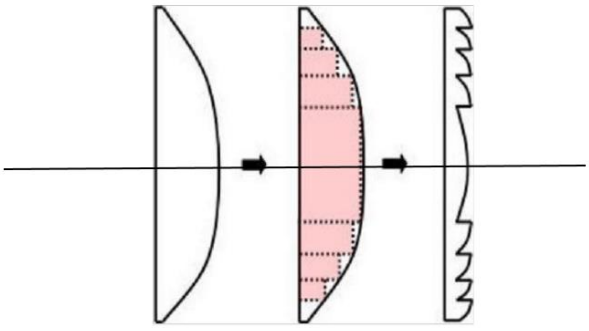


图 11　菲涅尔透镜设计原理图

菲涅尔透镜的分类：

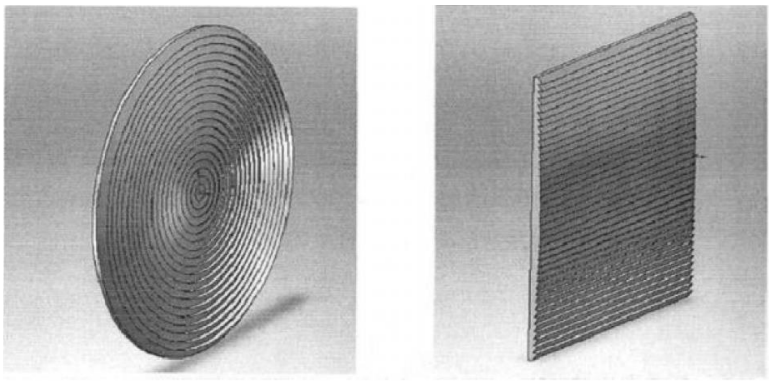
1、从光学设计上来划分，分为正菲涅尔透镜和负菲涅尔透镜。

正菲涅尔透镜：光线从一侧进入，经过菲涅尔透镜在另一侧出来聚焦成一点或以平行光射出，焦点在光线的另一侧，并且是有限共轭。这类透镜通常设计为准直镜（如投影用菲涅尔透镜、放大镜等）以及聚光镜（如太阳能用聚光聚热用菲涅尔透镜等）。

负菲涅尔透镜：和正菲涅尔透镜刚好相反，焦点和光线在同一侧，通常在其表面进行涂层，作为第一反射面使用。

2、从结构上划分，主要有：圆形菲涅尔透镜、菲涅尔透镜阵列、柱状菲涅尔透镜、线性菲涅尔透镜、衍射菲涅尔透镜、菲涅尔反射透镜、菲涅尔光束分离器和菲涅尔棱镜。

圆形菲涅尔透镜和线性菲涅尔透镜如图 6 所示。



（a）圆形菲涅尔透镜　　（b）线性菲涅尔透镜

图 12　两种不同聚焦方式的平板菲涅尔透镜

在大孔径的照明系统中，常采用菲涅尔透镜(螺纹透镜)来代替单透镜或二次曲面透镜，其优点有：1）减小透镜的质量和厚度；2）在一定程度上减小单透镜带来的球差（即不同入射高度的光线，经单透镜球面折射之后，不会聚于同一点的现象）。球差的原理如图 7 所示。

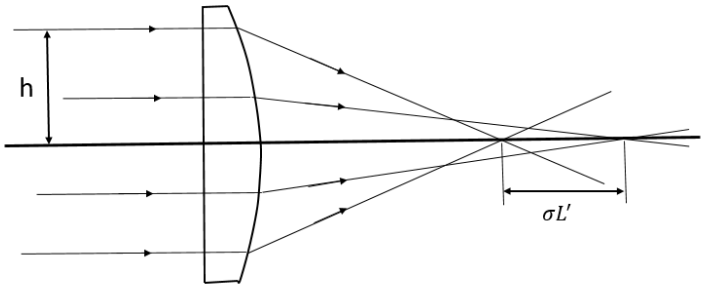


图 13　单透镜球差原理示意图

菲涅尔透镜既可以校正球差，又可以减小透镜的重量和厚度，这在大口径的照明系统中是非常重要的。基于以上优点，菲涅尔透镜在大口径照明系统、航空障碍灯、汽车信号灯等灯具中均有大量使用。

菲涅尔透镜设计主要的步骤包括分割环带高度和计算曲率半径，除此之外还有如分角度法和分厚度法等多种菲涅尔透镜设计方法。

任务三 鳞甲反射器设计

在灯具设计中，特别是开发投光灯、轨道灯等类型灯具时，经常会遇到系列化设计问题。在不修改基本外形结构的情况下，要想获得不同发光角度、照度均匀，提出了一种通过鳞甲片改变出光角度的反射罩设计方案，包括鳞片参数的计算、基面合理分隔方法、实际仿真模拟。

3.1 反射器基面设计

反射罩基面设计主要是针对光源中心与反射罩顶面距离H、反射罩出光面开口直径D，以及反射曲线的设计，如图1 4 所示。

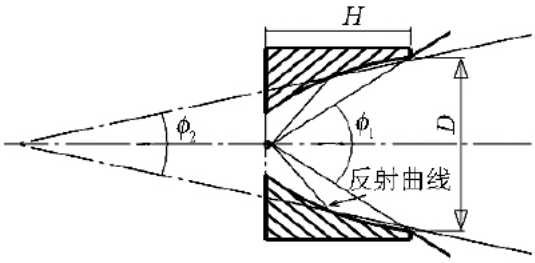


图14　基面设计

其中H与D共同决定溢散光出光角$\emptyset_1$。反射曲线决定光线通过反射后出光角$\emptyset_2$。本文设计基于抛物线型反射罩。反射曲线选用抛物线型，光源置于焦点处，反射后出光角度$\emptyset_2$近似零度。溢散光出光角度 60°，保证大部分光线经过鳞甲面反射后不会再次反射，同时溢散光出光角不宜过大，以保证光能利用率。

3.2 鳞甲反射器设计

光源出射光线通过抛物线型基面条件下球面鳞甲反光片反射，出射光线角度改变如图15 所示。图中O为坐标原点，S为光源，处于抛物线焦点位置。光源发出任意方向小角度光线入射光线1 、入射光线2 分别与抛物线母线交于A 、 B 两点。SN 为∠ASB 的角平分线，出射光线2 与Y 轴平行。出射光线1 与出射光线3 夹角为β，入射光线1 与入射光线3 夹角为θ 。3 条入射、出射光线的角平分线延长线共同交于M点，该点为近似交点，θ 角取值越小，3 条延长线越趋于一点。α 角为入射、出射光线1 角平分线与入射、出射光线3 角平分线之间的夹角。同一基面下鳞甲片设计由上述角度决定，最终确定M点坐标与鳞甲片半径R即可。

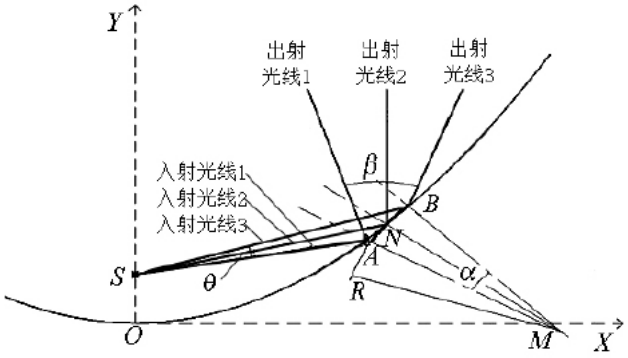


图15　鳞甲片反射

其中θ 为基面分割角度，以球面作为鳞片面型时采用等角度划分法。β 为出射光角度，该角度根据设计辐照强度分布要求确定。鳞甲匀光原理与复眼匀光原理相似，可将不均匀宽

光束转化为均匀光斑。图 15 中 θ 角度内的光线，通过鳞甲面反射到整个照明面上，最终照明区域为所有鳞甲面反射照明的叠加。由于 θ 角度很小，可假设每个鳞甲反射照明均匀，则最终叠加照明效果也均匀。因而基面分隔份数越多，光斑照度均匀性越好。但分隔份数过多，会使鳞甲片交界处产生杂光增多，导致光效降低，需要对此特性进行分析，找出光能利用率与匀光效果之间的平衡点。

3.2.1 鳞甲片半径与球心位置计算

图 15 中单个鳞甲片反射光线可由边缘光线计算得出出射光线角度分布。即由 θ 角与 α 角，可确定 β 角，三个角度已知两者即可计算得出第三个角度。鳞甲片反射可简化为球形鳞甲反射点切平面反射光线，不同入射光线简化为同一入射光线与反射面法线夹角不同。两个鳞甲切面夹角即为两条角平分线夹角。

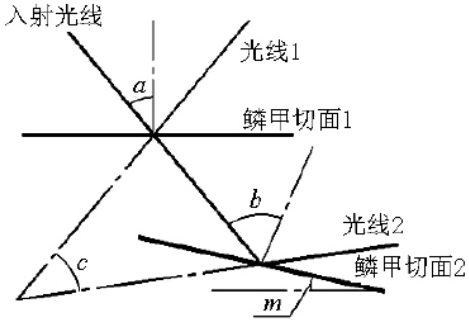


图 16　鳞甲反射简化图

图 16 中 a 为入射光线与鳞甲切面 1 法线夹角； b 为入射光线与鳞甲切面 2 法线夹角； c 角为出射光线夹角； m 角为鳞甲切面夹角。由图 16 可知，鳞甲切面夹角 m ＝ b － a ，又出射光线夹角 c ＝2b－2a，由此可知 m＝12c，从而图 15 中 α 、 θ 、 β 角度关系为

$$\alpha = \frac{1}{2}(\beta - \theta) \qquad (3.1)$$

如图 15 建立坐标，光源 S 位于抛物线焦点。设图 15 中 A 点坐标为（x_a，y_a），抛物面方程为 $2py=x^2$，OA、OB 夹角为θ，设 B 点坐标为（x_b，y_b），则 AB 两点间距为

$$L = \sqrt{(x_a^2 - x_b^2) + (y_a^2 - y_b^2)} \qquad (3.2)$$

图 15 中出射光线 2 仍保持与 Y 轴平行，需保证圆弧在 N 点处与反光罩抛物线相切，同时切面重合，因而实际圆弧球心不在 A、B 点处出射光线与入射光线角平分线交点处，但是偏差很小，相较与光源面积对于发散角度影响可以忽略。因此在后续鳞甲面半径与球心位置计算中假设球心位于 N 处入射光 2 与出射光 2 角平分线上，且最终鳞甲面既在 N 点与抛物面相切，同时经过 A、B 两点。

根据边缘光线与基面交点 A、B 两点间距，角平分线夹角 α ，估算小曲面曲率半径为

$$R = \frac{L}{2sin\frac{\alpha}{2}} \qquad (3.3)$$

与 B 点坐标同理求得 N 点坐标为（x_n，y_n），设角平分线 NM 所在向量为 $(-1, \frac{p}{x_n})$，该向量可由抛物线切线法向量公式求得，设 M 点坐标为（x_m，y_m），则可以求出圆心 M 坐标为 $(\frac{pR}{\sqrt{p^2+x_n^2}} + x_n,\ \frac{x_n R}{\sqrt{p^2+x_n^2}} + y_n)$。

3.2.2 鳞甲片圆周切割角度

光线经单个鳞甲片反射，圆周方向与基准面母线方向由于像差的产生，圆周方向照明角度相较母线方向会较小，因而鳞甲片两方向分割角度需要根据模拟仿真调整，找到合适比例。

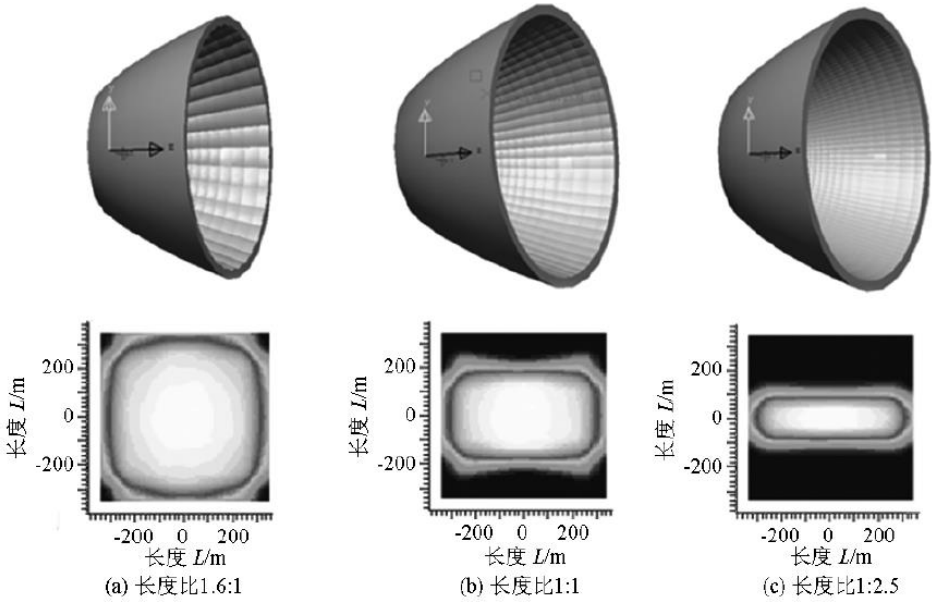


图 17　鳞甲片圆周方向与基面母线方向长度分隔对比

图 17 中以 20° 匀光鳞甲片反射罩，照目目标 1 m处半径 700㎜ 圆形区域为例，采用矩形鳞甲分隔方式。图 17（a）鳞甲片圆周方向与基面母线方向长度比为 1.6:1，最终照明区域为目标区域，且在区域内基本均匀。图 17（ｂ）鳞甲片圆周方向与基面母线方向长度比为１：１，照明区域成矩形。图 17（ｃ）鳞甲片圆周方向与基面母线方向长度比为１：２．５，照明区域为细长矩形。由于同一圆周鳞甲片最终照明为图示单个鳞甲片照明区域围绕目标区域中心旋转一周叠加的照明效果，中右两种圆周分割方式经旋转叠加后，势必造成最终光斑的中心照度增加，边缘照度降低，造成光斑不够均匀。经过仿真验证，该种角度下，一般圆周分割鳞甲长度为母线方向鳞甲片宽度的１．６倍左右可以得母线圆周两方向到最为对称的照度结果。不同角度下该比值关系需要根据实际情况通过仿真调整比例关系。

3.2.3 鳞甲片阵列结构设计

鳞甲反射片的阵列结构同时影响发散角和发光强度分布，采用合理的微结构排布方式可以显著提高匀光效果。本文设计鳞甲结构采用球面结构，常用排布方式有矩形、菱形、六边形等，如图 18 所示。

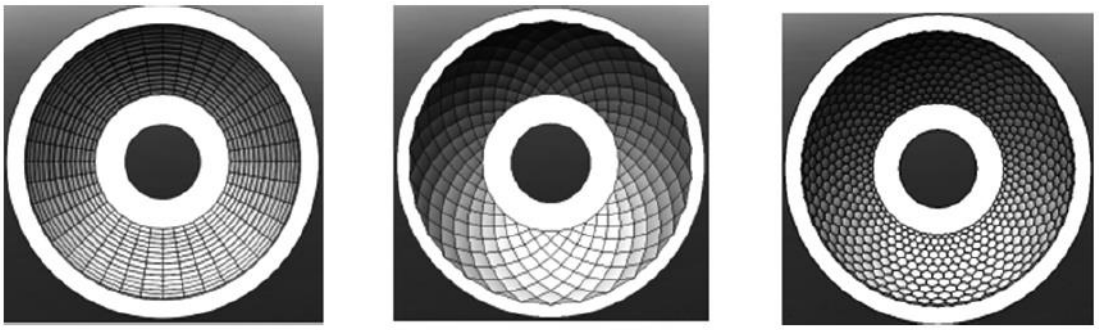


图 18　排列方式

鳞甲反光器出光面为圆形，最终照明区域也为圆形区域。不考虑像差情况下，不同阵列

结构鳞甲片形状与单个鳞甲片反光后照明区域轮廓形状相同，因而鳞甲片越接近圆形，则最终匀光效果越好。

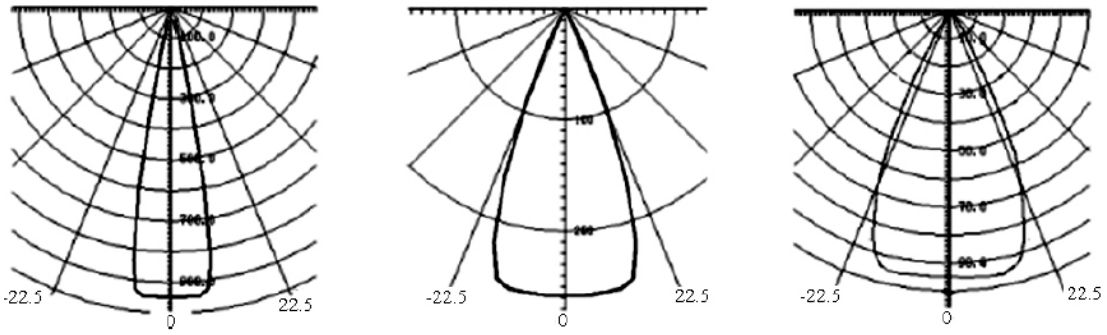
3.3 仿真效果

分别建立三种鳞甲面反射罩，并在出光口径 1000mm 处分别设置 350mm×350mm，750mm×750mm，1200mm×1200mm 接收屏，三种尺寸接收屏分别对应 20°、40°、60° 发散（FWHM）角 1 m处照明尺寸。同时设置远场接收器，最终进行光线追迹，经过鳞甲面反射，照度均匀性显著提高。在图 19 中观察照度图可以发现，随着鳞甲反射罩发散角度



(a)20°发散角　(b)40°发散角　(c)60°发散角

图 19　20°、40°、60° 模拟结果



(a)20°发散角　(b)40°发散角　(c)60°发散角

图 20　强度分布

增加，匀光效果逐渐变差。这是由于随角度增加部分光线需经过两次反射才能够从反射罩出光面出射，且大角度下经过单个鳞甲片反射光斑像差增大，照明区域趋近鹅蛋形状，经叠加中心照度较边缘强。图 20 分别为三种发散角对应光强分布，三种角度下匀光效果与光能利用率见表 1 。

表 1　系统仿真结果

结果 / 发散角/(°)	最大光强 I/cd	光通量 Φ/lm	光效 /%	照度均匀性/%
20	1120	106.55	76.11	89.12
40	260	117.05	83.61	87.44
60	75	126.21	90.18	81.62

合理设计鳞甲结构，配合基面特性，能够更好解决系列产品匀光特性，为解决系列化产品问题以及均匀照明提供了新的解决方案。

任务四 自由曲面透镜设计

任何光源都是有尺寸的，点光源只是针对相对尺寸较小的光源而采取的近似办法，是一种理想化光源。但是，面向点光源的光学设计仍然有其必要的研究意义，是面向扩展光源的光学设计的基础。由于光源的相对尺寸很小，故认为从光源其他部分发出的光与从光源中心射出的光之间的差别可忽略不计。所以，面向点光源的光学二次设计方法其实质就是：只处理从光源中心射出的光线。设计所要完成的任务就是将每一条光线经过折射(或反射)投射到指定方向或指定位置。因此，问题的关键就在于：如何确定每一条光线所要投射的方向或位置来实现所要求的光场分布。

4.1 基于点光源的照度均匀自由曲面透镜设计

1.提出设计的目标与要求

使用一个朗伯分布的 LED 光源，使光源发出的光经过透镜后折射到距离为 h=3m 的目标接收面上，形成一个半径为 $3\sqrt{3}$ m 的照度分布均匀的圆形光斑，即在 r≤$3\sqrt{3}$ m 的范围内照度 $E=E_c$，而当 r＞$3\sqrt{3}$ m 时 E=0 。

2.编写程序，建立实体模型

根据本项目任务一中提到的设计方法，在 MATLAB 编程软件中编写程序实现算法。设定初始值为透镜高度 H=15mm ，求出自由曲面在 X-Z 平面内的曲线的离散点坐标，如图 21 所示。然后将这些离散点坐标导入三维制图软件 SolidWorks 中，拟合成实体模型，如图 22 所示。

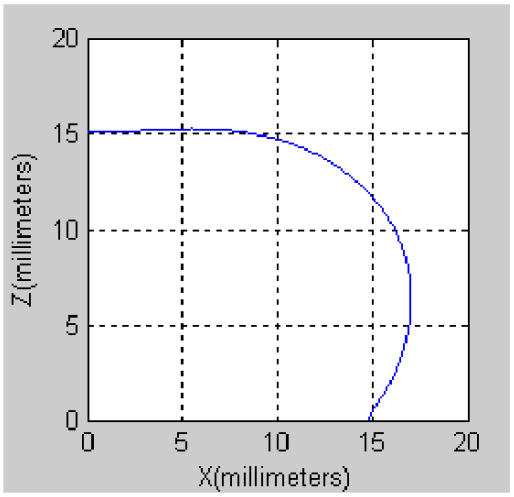


图 21 透镜外形轮廓曲线图

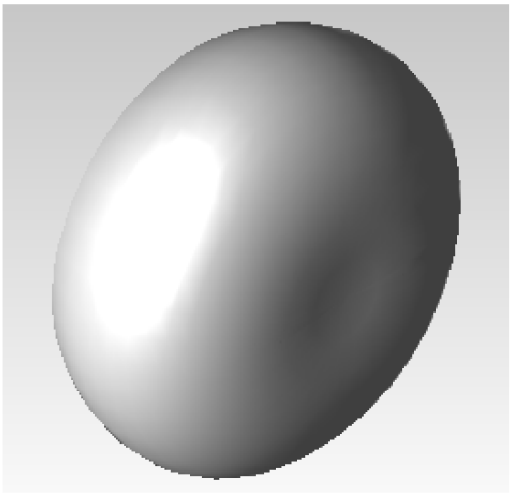


图 22 透镜实体模型

3.光学仿真，得出模拟效果

将得到的实体模型导入 TracePro 软件中进行光线追迹仿真，得到该模型照明目标面上的照度分布图，如图 23 所示。

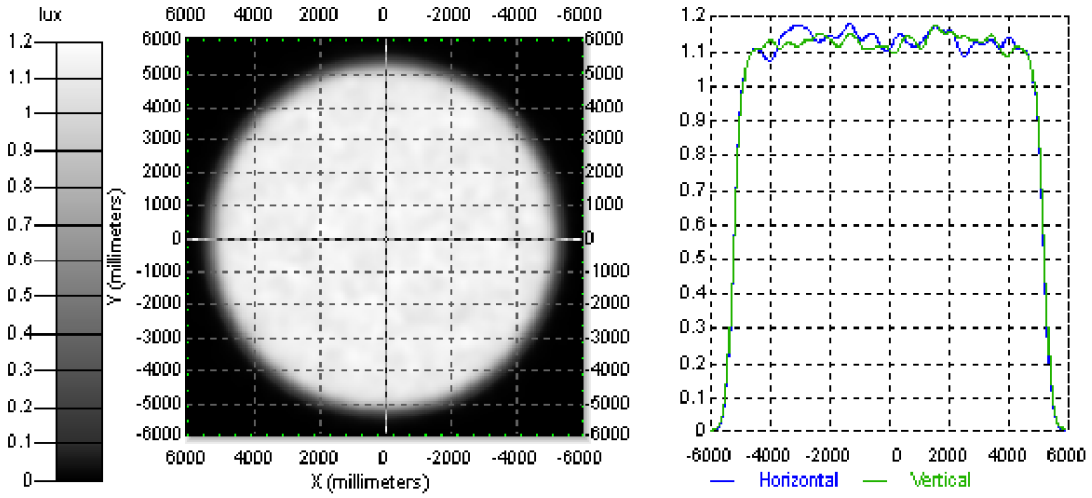


图 23　透镜仿真照度分布图

仿真结果的数据：光源总光通量为 1001m，接收面上半径为 $3\sqrt{3}$ m 的目标照明区域内接收到的光通量为 96.0111m，即光能的利用率为 96.011%；并由照度分布图可见，在目标照明区域内，照度分布的均匀度达到 95%以上。因此，设计的透镜自由曲面是符合设计要求的。

4.2 基于点光源的小角度均匀照明系统设计

1、设计原理

透镜设计的原理如图 24 所示，由于整个系统是关于 Z 轴旋转对称，因此图中只表示出系统剖面的一半。光源位于坐标系的原点，光线接收面距离光源的高度为 h，透镜介质的折射率为 n，光线经过介质界面的折反射后投射到目标接收面上。

设计中，将光源发出的光线分成两部分，与 Z 轴夹角较小的光线经过曲面 1 和曲面 4 后投射到目标接收面上，与 Z 轴夹角较大的光线经过曲面 3、曲面 2 和曲面 4 后投射到目标接收面上。考虑到过多的设计自由度会大大增加系统设计的难度，我们将透镜的顶部曲面 4 设定成一个水平面，将曲面 3 设定成一个竖直面，因此曲面 1 和曲面 2 就是设计的主要对象，这样就有效地降低了系统的复杂度。设计过程中，分别对曲面 1 和曲面 2 进行设计。

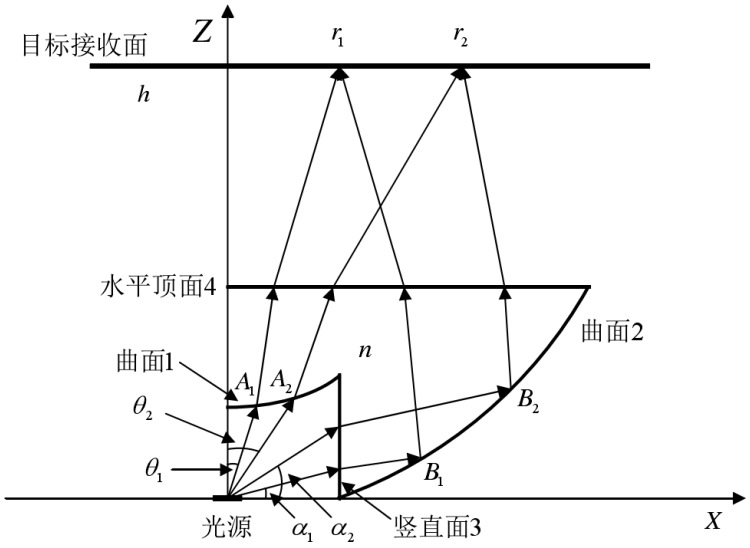


图 24　系统设计的原理示意图

2、编程实现算法，建立实体模型

设计目标：使用一个朗伯分布的 LED 点光源，使光源发出的光经过配光器后投射到距离为 h=3m 的目标接收面上，形成一个半径为 r=0.4m 的照度分布均匀的圆形光斑，即实现角度约为 7.5° 的小角度均匀照明。

根据上述的设计原理，并结合步进法的设计方法，在 MATLAB 编程软件中编程实现算法。设定初始值：透镜的高度为 11.9mm，曲面 1 的初始点为(0,0,2.7mm)，曲面 2 的初始点为(9.10772mm,0,8mm)，求出自由曲面在 X-Z 平面内的曲线的离散点坐标，如图 25、图 26 所示。然后将这些离散点坐标导入三维制图软件 SolidWorks 中，拟合成实体模型，如图 27 所示。

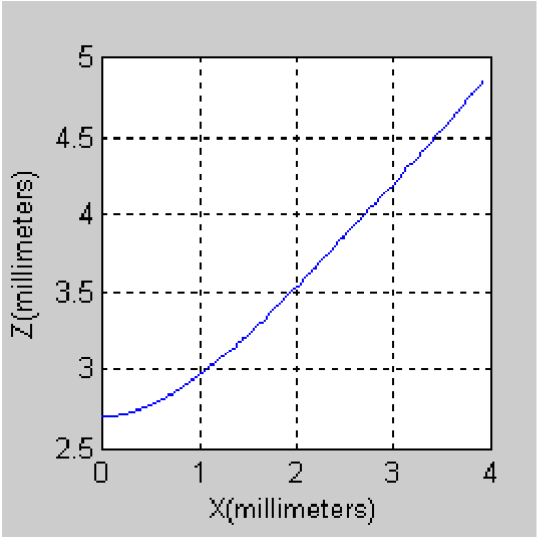


图 25　曲面 1 的剖面曲线图

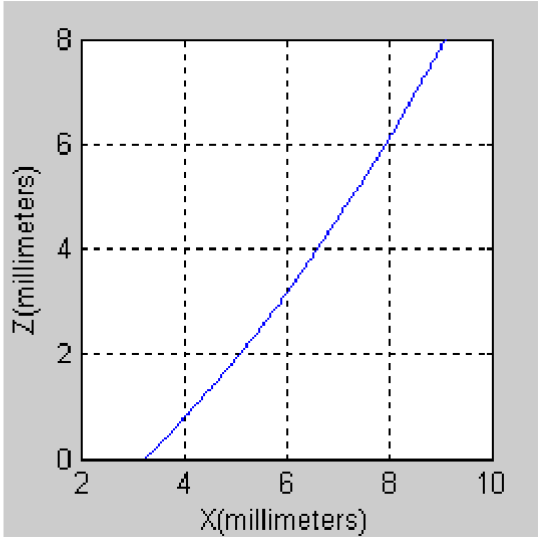


图 26　曲面 2 的剖面曲线图

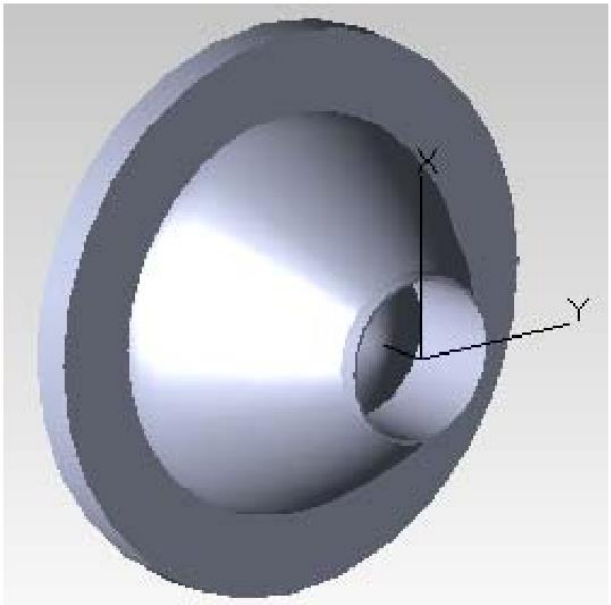


图 27　透镜实体模型

3.光学仿真，得出模拟效果

将得到的实体模型导入 TracePro 软件中进行光线追迹仿真，得到该光学系统模型的照明目标面上的照度分布，如图 28 所示。

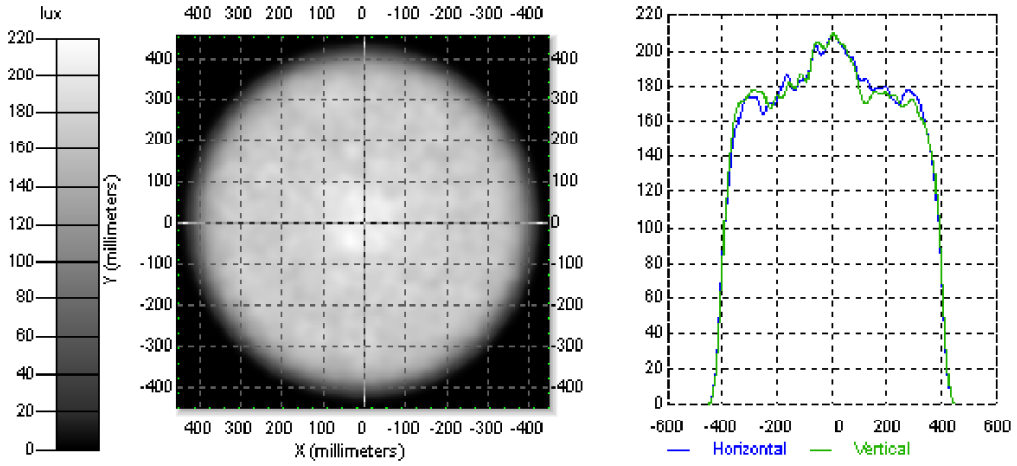


图 28　照明面上的照度分布图

模拟结果数据：光源的总光通量为 1001m，接收面上半径为 0.4m 的目标照明区域内的光通量为 85.4281m,即光能的利用率为 85.428%;由照度分布图可看出,在目标照明区域内，照度分布的均匀度达到 85%以上。应该说，设计的透镜系统是符合小角度均匀照明的设计要求的，达到了预期的设计目标。

4.3 基于点光源的自由曲面光学设计的问题

LED 作为新一代的绿色光源，正在被广泛大量地应用于当代照明领域中，包括路灯、汽车前照灯、景观灯等领域。在二次光学设计过程中将 LED 视为理想点光源，通过相应的能量对应关系能够设计出效果较好的光学配光器模型，这是目前针对单颗 LED 光源所采取的一种普遍的光学设计方法。

现实中，不论什么样的光源都是有尺寸的，而点光源只不过是为了便于光学设计而采用的理想化光源，是基于光源的相对尺寸(相对于配光器件来说)较小的情况下的一种近似。因此，基于点光源的自由曲面光学设计存在的问题就是：当 LED 光源的相对尺寸变大，即 LED 光源的尺寸和配光器的尺寸较为接近，若这时再将 LED 光源近似成点光源来进行二次光学设计，则设计出来的光学模型与预期效果会出现较大的差距。

这里以实现目标接收面上照度均匀的透镜设计为例来说明，LED 光源的尺寸(即直径)与透镜的尺寸(即高度)之间的示意图如图 29 所示。图中 D 表示为 LED 光源的直径，H 表示为透镜的高度。

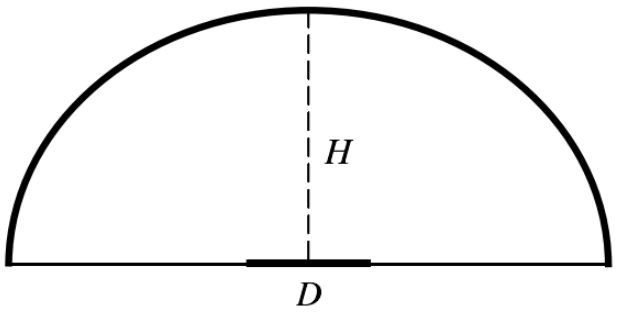


图 29　LED 光源与透镜的尺寸示意图

透镜设计采用基于点光源的照度均匀自由曲面透镜设计，即前面 4.1 节所提到的透镜设计，透镜自由曲面的截面轮廓曲线如图 21 所示，透镜的实体模型如图 22 所示。将基于点光

源的透镜实体模型导入 TracePro 光学软件中，设定不同的透镜与光源的尺寸比 H:D ，然后分别进行光线追迹仿真，查看结果。

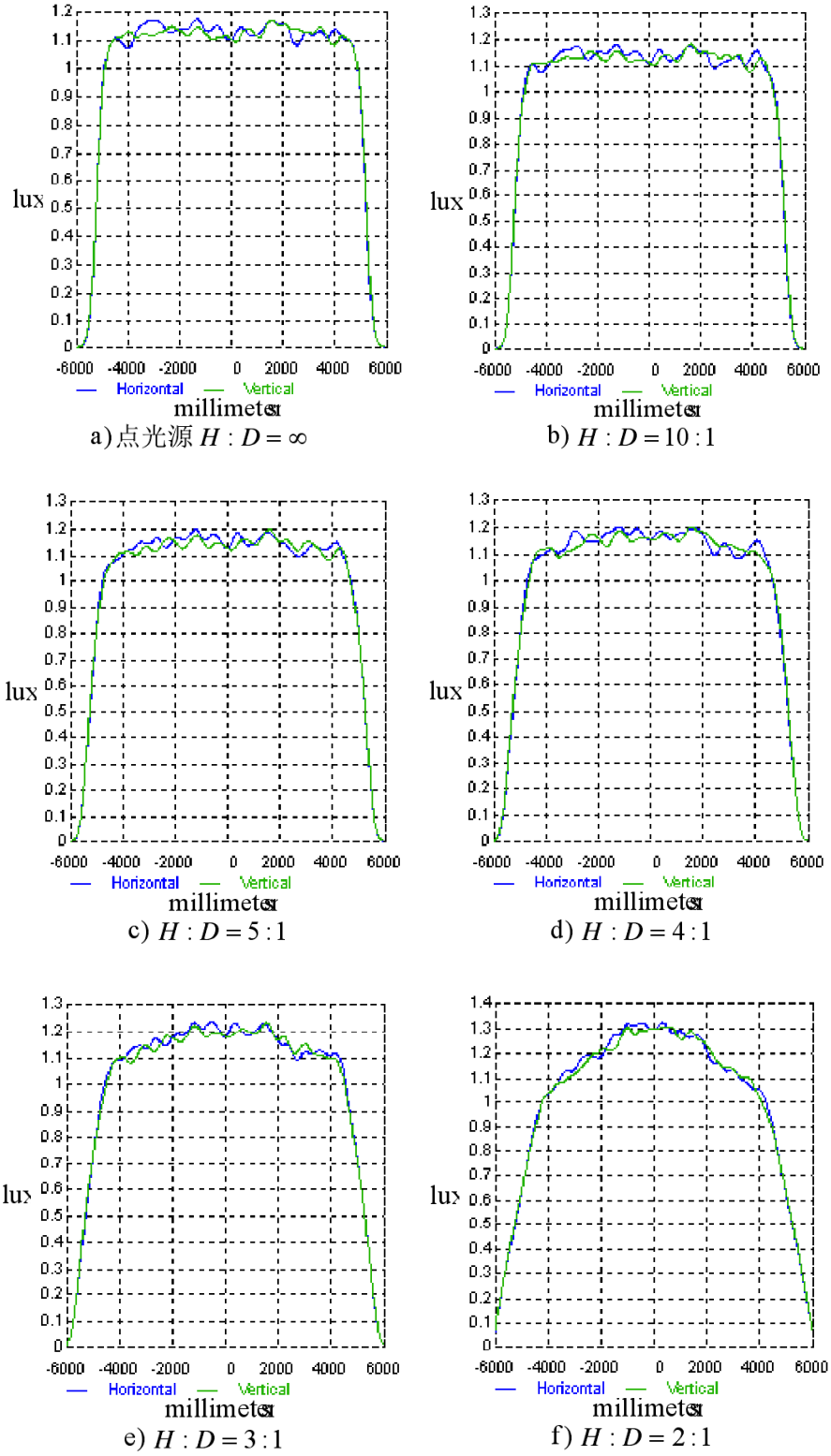


图 30　不同的透镜与光源尺寸比下所得的照度分布曲线图

图 30 为透镜与光源的尺寸比 H:D 分别为∞、10、5、4、3、2 时所得到的照度分布曲线图。由图可以看出，当 H:D=5 或者更大时，目标照明区域内的照度分布曲线相对比较水平，

即照度均匀度很高，达到均匀照度的要求，故这种情况下可以将 LED 光源视为点光源来处理，其结果的误差是在可允许的范围之内；而当透镜与光源的尺寸比例进一步逐渐接近时，照度分布曲线的水平性就会逐渐下降，比如当 H:D=4 时，由图可见，目标照明区域的边缘地带已出现照度下降的趋势，而当 H:D=3、2 时，照度下降的范围从目标区域的边缘延伸到内部，且目标区域外的照度值也变大，光线所投射到的区域已超出了设计所要求的目标照明区域，特别是当 H:D=2 时，产生了比较大的偏差，偏离了最初的设计要求。

由此可见，基于 LED 点光源的光学自由曲面设计是针对 LED 光源的相对尺寸较小时的一种理想化处理方式，当透镜与光源的尺寸比较大时这样的近似处理尚且使用，而当透镜与光源的尺寸比较小时这样的近似处理就会带来误差，偏离设计目标。因此，基于 LED 点光源的二次光学设计方法在面对 LED 扩展光源时是无法直接套用的，必须寻找新的理论来支持 LED 扩展光源的光学设计。

【项目小结】

本项目从光度学基本知识的角度详细介绍了关于 LED 照明光学设计技术，主要就二次光学设计即 LED 配光问题进行了具体阐述，涉及全反射透镜设计、菲涅尔透镜设计、鳞甲反射器设计和自由曲面透镜的设计。当然，照明中二次光学设计涉及的远不止这些设计，本项目也就举这些特例详细介绍和分析 LED 的配光步骤，其他类型的配光设计可以参考这些设计方法，举一反三。

【思考与练习】

1、全反射透镜设计的思路是什么？
2、射灯透镜设计的步骤是什么？
3、导光管的设计原理是什么？
4、菲涅尔透镜的设计方法有哪些？各有什么特点？
5、简述鳞甲反射器的设计步骤？
6、自由曲面透镜的设计原理是什么？设计步骤如何？

四　照明散热系统设计

【知识目标】

1、掌握照明中灯具的散热基础知识；

2、了解照明中常用散热器件材料；

3、会分析应用照明系统中散热部分的设计。

【技能目标】

1、能合理选择散热途径和散热材料；

2、会散热系统设计。

【任务导入与项目分析】

LED 是一种能够将电能转换成光能的半导体，目前大功率 LED 的电光转换效率仅为 20%-30%，有 70%-80%的电脑转换成了热能。如果热量不能有效地散出去，会引起 LED 芯片结温升高，导致发光波长红移、光衰加剧、寿命缩短等问题。结温过高会导致输出光通量下降，影响光效；结温过高还会使荧光粉效率下降，影响色温。因此散热问题是 LED 照明普及和发展的最大瓶颈，如何提高大功率 LED 的散热能力是实现产业化急需解决的关键技术之一。

任务一 散热基础

散热的目的是控制产品内部所有电子元器件的温度，使其在所处的工作环境条件下不超过标准及规范所规定的最高温度。最高允许温度的计算应以元器件的应力分析为基础，并且与产品的可靠性要求以及分配给每一个元器件的失效率相一致。

1.1 热量传递的三种基本方式

热量传递一般有三种基本方式：热传导；热对流；热辐射。

1、热传导

热传导是介质内无宏观运动时的传热现象，其在固体、液体和气体中均可发生，但严格而言，只有在固体中才是纯粹的热传导，而流体即使处于静止状态，其中也会由于温度梯度所造成的密度差而产生自然对流，因此，在流体中热对流与热传导同时发生。

物体或系统内的温度差，是热传导的必要条件。或者说，只要介质内或者介质之间存在温度差，就一定会发生传热。热传导速率决定于物体内温度场的分布情况。

热量从系统的一部分传到另一部分或由一个系统传到另一个系统的现象叫传热。热传导是三种传热模式(热传导、对流、辐射)之一。它是固体中传热的主要方式，在不流动的液体或气体层中层层传递，在流动情况下往往与热对流同时发生。

在导体中，因存在大量的自由电子，在不停地作无规则的热运动。一般晶格震动的能量较小，自由电子在金属晶体中对热的传导起主要作用。所以一般的电导体也是热的良导体，但是也有例外，比如说钻石(Diamond)--事实上，珠宝商 可以通过测钻石的导热性来判断钻石的真假。在液体中热传导表现为:液体分子在温度高的区域热运动比较强，由于液体分子之间存在着相互作用，热运动的能量将逐渐向周围层层传递，引起了热传导现象。由于热传导系数小，传导的较慢，它与固体相似;不同于气体，气体分子之间的间距比较大，气体依靠分子的无规则热运动以及分子间的碰撞，在气体内部发生能量迁移，从而形成宏观上的热量传递。如图 1 所示。

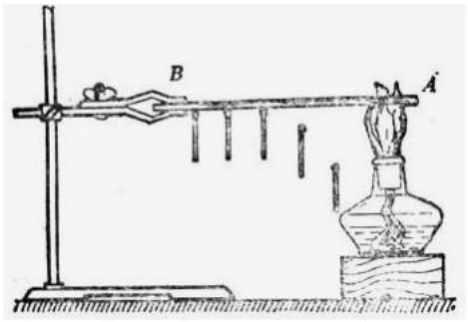


图 1　热传导

2、热对流

热对流是指热量通过流动介质，由空间的一处传播到另一处的现象。火场中通风孔洞面积愈大，热对流的速度愈快；通风孔洞所处位置愈高，热对流速度愈快。热对流是热传播的重要方式，是影响初期火灾发展的最主要因素。影响热传导的主要因素是：温差、导热系数和导热物体的厚度和截面积。导热系数愈大、厚度愈小、传导的热量愈多。如图 2 所示。

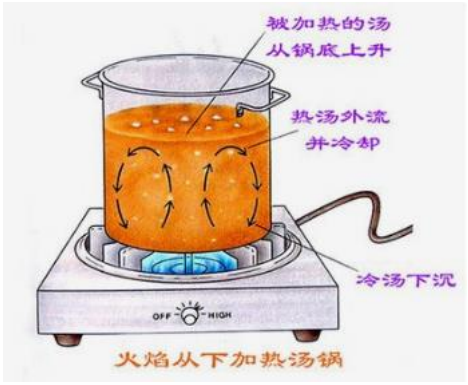


图 2　热对流

3、热辐射

物体因自身的温度而具有向外发射能量的本领，这种热传递的方式叫做热辐射。热辐射虽然也是热传递的一种方式，但它和热传导、对流不同。它能不依靠媒质把热量直接从一个系统传给另一系统。热辐射以电磁辐射的形式发出能量，温度越高，辐射越强。辐射的波长分布情况也随温度而变，如温度较低时，主要以不可见的红外光进行辐射，在 500℃以至更高的温度时，则顺次发射可见光以至紫外辐射。热辐射是远距离传热的主要方式，如太阳的热量就是以热辐射的形式，经过宇宙空间再传给地球的。

热传递的三种基本方式之间的联线与区别如图 3 所示。

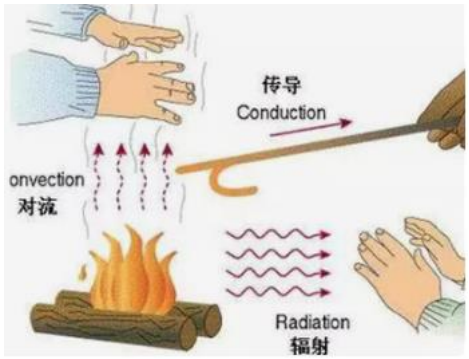


图 3　热传递的三种基本方式

1.2 散热设计术语

散热设计中常提到的名词对象有：单板，散热器，风扇，导热界面材料，换热器，热管，均温板，冷板等，下面一一作简单介绍。

1、单板(PCB,PWB)

PCB（ PrintedCircuit Board），中文直译为印制电路板，又俗称单板，板子等。它是重要的电子部件，电子元器件通过单板互相连接。常说的“走线”、“布线”等，就是元器件之间的信号线如何在单板内部排布。

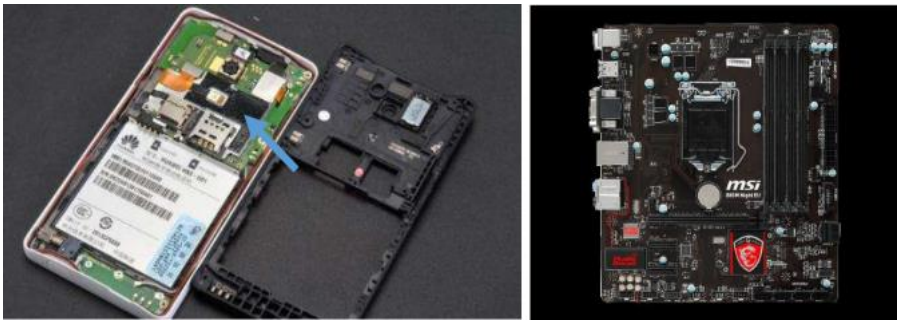


图 4　单板

2、散热器（heatsink，finstack）

通常由铝铜等制成，大多为翅片形状，作用是在一定空间内与外界实现更大的接触面积，同时兼顾对流体产生的阻力。广义上来讲，所有可以把热源的热量吸走，随后散逸到周围环境中的结构件，都可以称为散热器。如图 5 所示。



图 5　散热器

3、风扇，风机（fan，blower，airmover）

风扇是用来加速空气流动的部件。又称为风机。分为轴流风扇和离心风扇。



图 6　风扇

4、导热界面材料（thermalinterface material,tim）

刚性固体接触面间会产生细小的缝隙,可以用柔性的介质填充这些缝隙,连接导热路径。如图 7 所示。导热界面材料是这类材料的统称，有导热衬垫（thermal pad），导热硅脂（thermal grease)、导热凝胶（thermal gel）等。如图 8 所示。

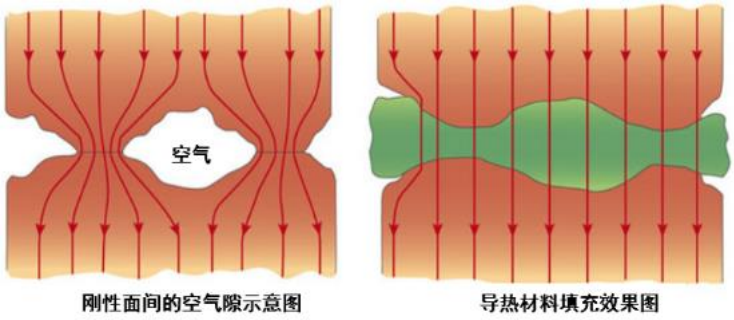


图 7　导热界面



（a）导热垫片　　（b）导热硅脂

图 8　导热材料

5、换热器（heatexchanger）

换热器可以认为是散热器的一种。换热器通常不直接冷却热源。如下图所示的电脑 CPU 液冷模块，其中的水排就是典型的换热器。这一换热器直接冷却的不是发热源，而是用来冷却热源的液体工质，即它是间接低冷却热源。如图 9 所示。



图 9　换热器

6、热管和均温板（heatpipeand vapor chamber）

热管和均温板都是利用相变换热传热效率高这一特点制作出的高传热效率的部件。在高功率密度的场景中，应用广泛。热管可以简单地理解为一根导热系数非常高的管，VC 则可简单地理解为一块导热系数非常高的板。如图 10 所示



图 10　热管

7、冷板（coldplate）

冷板一般指液冷设计中装配在发热源上方的、内部有液体工质流过的结构件。消费电子如 CPU，GPU 等，冷板尺寸一般较小，又称为冷头。如图 11 所示。

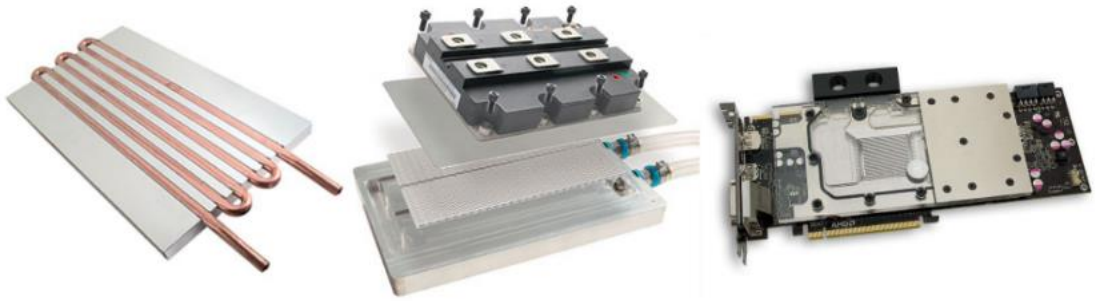


图 11　冷板

任务二 散热途径与材料选择

散热的目的是控制产品内部所有电子元器件的温度，使其在所处的工作环境条件下不超过标准及规范所规定的最高温度。最高允许温度的计算应以元器件的应力分析为基础，并且与产品的可靠性要求以及分配给每一个元器件的失效率相一致。

1.1 照明灯具的散热途径

现在大街上随处可见的 LED 显示屏，还有装饰用的 LED 彩灯以及 LED 车灯，处处可见 LED 灯的身影，LED 已经融入到生活中的每一个角落。依据不同的封装技术，其散热方法亦有所不同，而 LED 各种散热途径方法大致有以下几种：

（1）从空气中散热；

（2）热能直接由 Systemcircuitboard 导出；

（3）经由金线将热能导出；

（4）若为共晶及 Flipchip 制程，热能将经由通孔至系统电路板而导出。

一般而言，LED 芯片（Die）以打金线、共晶或覆晶方式连结于其基板上(Substrate of LED Die)而形成一 LED 晶片(chip)，而后再将 LED 晶片固定于系统的电路板上(Systemcircuitboard)。因此，LED 可能的散热途径为直接从空气中散热，或经由 LED 晶粒基板至系统电路板再到大气环境。而散热由系统电路板至大气环境的速率取决于整个发光灯具或系统之设计。

然而，现阶段的整个系统之散热瓶颈，多数发生在将热量从 LED 晶粒传导至其基板再到系统电路板为主。此部分的可能散热途径：其一为直接藉由晶粒基板散热至系统电路板，在此散热途径里，其 LED 晶粒基板材料的热散能力即为相当重要的参数。另一方面，LED 所产生的热亦会经由电极金属导线而至系统电路板，一般而言，利用金线方式做电极接合下，散热受金属线本身较细长之几何形状而受限;因此,近来即有共晶(Eutectic)或覆晶(Flipchip)接合方式，此设计大幅减少导线长度，并大幅增加导线截面积，如此一来，藉由 LED 电极导线至系统电路板之散热效率将有效提升。

经由以上散热途径解释，可得知散热基板材料的选择与其 LED 晶粒的封装方式于 LED 热散管理上占了极重要的一环，后段将针对 LED 散热基板做概略说明。以上就是 LED 技术的相关知识，相信随着科学技术的发展，未来的 LED 灯回越来越高效，使用寿命也会由很大的提升，为我们带来更大便利。

1.2 照明灯具的散热材料

LED 作为卤素灯、白炽灯和荧光灯照明系统的替代品，其照明市场的发展将是很可观的。LED 的增长归功于 LED 在适应性、寿命和效率方面优于传统照明形式。LED 有更多的设计自由度，提供非常长的使用寿命，并且也相当高效，能将大部分能量转换成光，从而最大限度地减少散发的热量。

然而，LED 仍然在半导体结处产生明显的热量。这种热量可对 LED 产生不利影响，因此必须进行散热，以确保实现固态照明（SSL）的真正优势。LED 通常通过色温进行分类，市场上有很多不同颜色的变体。

假如 LED 的工作温度发生变化，其色温也会发生变化。例如，白光的温度升高，可导致 LED 发出较暖的 CCT。另外，如果在相同阵列中的 LED 上存在芯片温度的变化，则可能发射一定范围的色温，从而影响终端照明产品的质量和外观。

如表 2 所示，保持 LED 的正确芯片温度不仅可以延长使用寿命，而且还可以产生更多的光；因此，可以只需要少数量的 LED 就可以实现期望的效果。工作温度的升高可能会对 LED 的性能产生负面的影响，但这种影响是可以恢复的。然而，如果超过结温，特别是高于 LED

（120－150℃）的最高工作温度，则可能会发生不可恢复的影响，导致完全失效。

表 2　CREE XLamp LED 性能与温度的关系

温度(°C)	光通量（lm）	电压（V）	功效（lm/V）
25	196.1	3.237	86.5
60	182.2	3.149	82.7
85	172.3	3.087	79.7

如表 2 所示，CREE XLamp LED 性能随温度的变化而变化。

实际上，工作温度与 LED 的寿命直接相关；温度越高，LED 寿命越短，如图 12 所示。LED 驱动器也是同理，其寿命是由电解电容器的寿命决定。通过计算，可以确定，工作温度每下降 10℃，电容器的寿命增加一倍。因此，确保有效的散热管理可为 LED 阵列提供一致的质量、外观和使用寿命，从而为不断发展的行业开辟进一步应用的机会。

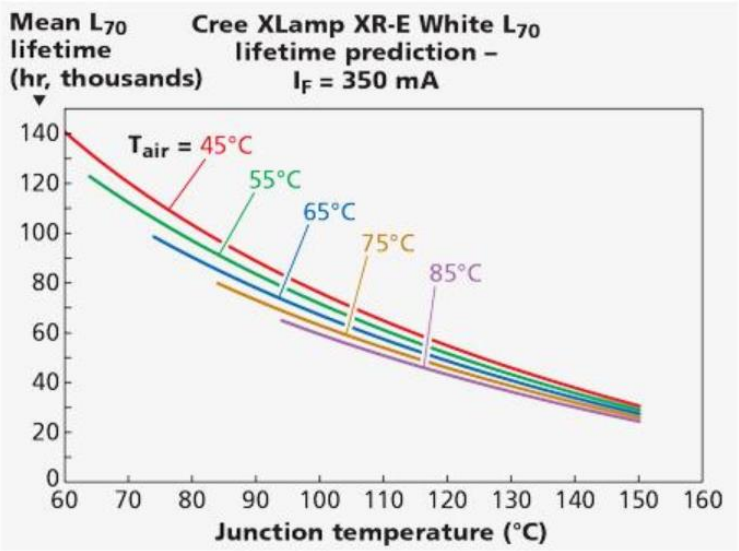


图 12　Cree XLamp LED 在 350 mA 驱动下的结温与寿命间的关系

有许多方法来改善 LED 产品的散热管理，必须选择正确类型的导热材料，以确保实现所需的散热效果。在材料领域，产品范围从提供散热和环境保护的导热封装树脂到用于提高导热效率的导热接口材料。

导热接口材料是设计用于填充器件和散热器之间间隙的化合物，从而降低两者之间边界处的热阻。这种材料会加快热损失，降低设备的工作温度。固化产品也可用作粘合材料。实例包括硅氧烷 RTV（室温硫化）或环氧化合物。材料的选择通常取决于所需的粘合强度或工作温度范围。

导热的另一个选择是使用导热封装树脂。这些产品设计用于提供对设备的保护，同时还让设备内产生的热量散发到周围环境中。在这种情况下，封装树脂变成散热器，并将热能从设备传导出去。这些产品可用于 LED 装置上，并且还可以根据所选择的颜色帮助从单元内进行光提取。

封装树脂还包括使用导热填料；然而，可以改变所使用的基础树脂、硬化剂和其它添加剂，以提供广泛的选择，包括环氧树脂、聚氨酯和硅树脂化学品。不同的化学材料将提供一系列的属性，每个都应该考虑到最终的应用需求。

封装材料选择：例如，聚氨酯材料提供优异的柔韧性，特别是在低温下，相对于环氧树

脂类来说是一个主要优点。有机硅树脂也可以在低温下提供这种灵活性，并提供优异的高温性能，超过其他现有的化学成分。有机硅产品通常也更昂贵。

环氧树脂类非常坚固，在各种恶劣环境中提供卓越的保护。它们是具有低热膨胀系数的刚性材料，并且在一些情况下可以在产品中加入一定程度的柔性。封装树脂的加入可以为各种应用产生大量的具有定制性能的产品；因此，建议与相关材料供应商详细讨论应用。

不管选择的散热产品的类型如何，还有一些关键属性也必须考虑。这些可以是相当简单的参数，例如设备的操作温度、电气要求或其他限制条件，如粘度、固化时间等。

其他参数对于设备来说更为重要，而仅仅一个数值可能不足以选定正确的产品。 热导率是一个主要的例子。热导率单位为瓦／米•度（W／m•K），代表材料的热传导能力。堆积导热率值建立在大多数产品数据表上，可以很好地反映预期的热传导水平，从而可以比较不同的材料。

但是，只依赖堆积导热率值不一定会有最有效的热传递。

热阻的单位是 K•m2 ／W，是热导率的倒数，它考虑了界面厚度。尽管度量标准取决于接触面和施加的压力，但是可以遵循一些一般规则来确保热阻值最小，从而将传热效率最大化。

例如，相比在界面处使用的传热化合物，金属散热器具有更高的热导率，所以只需要使用薄薄的一层该化合物。在这种情况下，增加厚度只会增加热阻。使用图 3 中的公式，就可以比较出使用 50 μm 的热胶和 0．5 毫米厚度的导热垫产生的热阻差异。因此，较低的界面厚度和较高的热导率可以最大程度地改善热传递。

了解热阻公式也是非常有必要的，它是选择最佳热材料是所必需的。如图 13 所示。

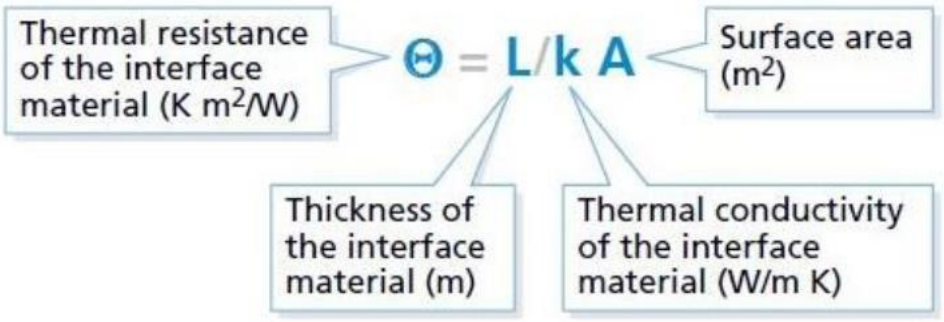


图 13　热阻公式的含义

我们在产品选择中需要考虑另一个重要因素 — 散热管理材料的应用。 无论是封装化合物还是界面材料，导热介质中的任何间隙都会导致散热速率的降低。

对于导热封装树脂来说，成功的关键是确保树脂可以在单元周围流动，包括进入任何小间隙。这种均匀的流动有助于去除任何气隙，并确保在整个单元中不产生热量。为了实现这种应用，树脂需要正确的导热性和粘度。通常，随着树脂的导热性增加，粘度也增加。

对于界面材料来说，产品的粘度或应用时可能的最小厚度对热阻有很大的影响。因此，与具有较低堆积导热率、较低粘度的产品相比，高导热性、高粘度的化合物虽然不能均匀地扩散到表面上，但是具有较高的耐热性和较低的散热效率值。为了将传热效率最大化，用户需要解决堆积导热率、接触电阻、应用厚度和工艺。

表 2 突出了需要考虑这些要求。通过测量使用中的发热装置的温度，比较散热的潜在差异。这些结果是基于一名终端用户的工作得出的，其所有产品都是热界面材料，使用相同厚度，使用相同的方法。

表 2　CREE XLamp LED 导热接口材料特性与温度的关系

产品序号	体积传热系数（W / m×K）	设备温度（°C）	温度降低（°C）
没有接口	N/A	30	N/A
1	12.5	22	27
2	1.0	24	20
3	1.4	21	30
4	4.0	23	23

从表中可以清楚地看出，较高体积热导率 12．5 W／m•K 与较低的 1．4 W／m•K 相比，不一定会有更有效的散热。这个原因可能是加工方法不适合该产品、该产品不易于应用、或者该产品不是为该特定应用设计的。无论什么原因，它突显了产品应用和产品选择的重要性；通过找到这两个参数的正确平衡，可以实现最大的传热效率。

回顾图 12“LED 性能与寿命”中的原始数据，并以上述结果为例，可以得出结论：散热管理材料的使用和正确选择很重要。举表 2 中的产品＃2。在测试应用程序中，将工作温度降低了 20％。如果对所讨论的 LED 实现类似的降低百分比，则通过将工作温度从 85℃降低至 68℃，效率可以大大提高，类似地，寿命从 95000 小时提高到 12 万小时。这是一个很大的改进。

然而，当您将把上面的情况与表 2 中的产品＃4 进行比较时，通过降低更多的工作温度，可以将效率提高大于 3％，寿命从 95000 小时增加到 14 万小时。因此，通过选择正确的产品并使用最佳工艺，用产品＃4 代替产品＃2 时，寿命可以进一步提高 15－20％。

随着电子工业的迅速发展，更具体地说在 LED 应用中，材料技术也必须满足越来越高的散热要求。该技术现在也被转移到封装化合物中，为产品提供更高的填料负载，从而提高导热性以及改善流动性。

任务三 散热系统设计

目前大功率 LED 灯主要散热技术有散热片、热管、均温板、辐射涂覆层、导热膏、导热垫片等。散热片是利用扩大的表面积将热对流散发到环境中， 影响散热片散热性能的因素有散热片形状，翅片数量、间距、尺寸大小、倾斜角度，散热片的材料以及加工工艺等， 也是最常用的散热技术， 本文中模型灯具就是采用散热片来散热的。热管是利用冷凝液相的循环变化， 将 LED 发出的高热量导出并散发掉。一般情况下热管冷端与散热片配合使用，来达到更好的散热效果。均温板与热管的原理类似， 只是热管是一维单向传热， 而均温板为面传热， 具有二维性，使整个散热器表面温度均匀。辐射涂覆层是在散热器外表面涂覆散热涂料，提高辐射率，使热更有效的辐射出去。而导热膏与导热垫片是为了减小接触热阻。

3.1 热分析工具

热分析软件能够比较真实地模拟系统的热状况，能够在产品设计阶段对其进行热仿真，确定出模型中温度的最高点。如果超过许用温度， 需对散热措施进行改进，使其达到使用的要求。这样可减少设计成本、再设计和再生产的费用，提高产品的一次成功率。

目前热分析软件多种多样，主要有 ANSYS、FLUENT 、EFD、ICEPAK 及 FloTherm 等。

1）从操作性上来讲， EFD 嵌入 PRO/E、SW、CATIA 软件中，该软件模型建立比较方便，设置简单， 对于工程中的粗略计算比较有用， 但是该软件占用系统资源较多，网格不宜划分过多，计算精度也不高。

2）从适用性上来讲， ICEPAK 嵌入了 ANSYS WB12.1 中，能够处理一般复杂的曲面，模型导入功能得到了相当大的提升，软件操作简单，与 EFD 一样，不需要手动计算流态，可以处理复杂网格，计算速度快。

3）从电子散热传统来讲， FloTherm 比 ICEPAK 更广，长期占据电子热分析市场，但是该软件处理曲面较难。对于做 LED 灯具设计者来说，模型处理是一个关键问题。

4）从专业上来讲， ANSYS 和 FLUENT 是学术和论文的首选软件，它们讲求从理论精确计算。ANSYS 软件是基于有限元的方式，计算结果精度高，适用于理论基础较高者使用，可以方便的实现手动编程和优化设计。

基于上述比较，我们一般采用 ANSYS 软件进行热分析。

3.2 大功率 LED 灯的热分析

对一款大功率 LED 灯为模型进行研究，运用 ANSYS 软件对该灯具进行热仿真分析，分析步骤为：建立简化模型、设置边界条件、划分网格并计算。

1、灯具物理模型

选用浙江某 LED 公司研制的一款大功率 LED 隧道灯作为研究模型， 如图 14 所示，该灯具由 LED 灯珠、灯盖、皮垫、反光镜、电路板、散热片及电源等组成。



图 14　LED 隧道灯结构外形

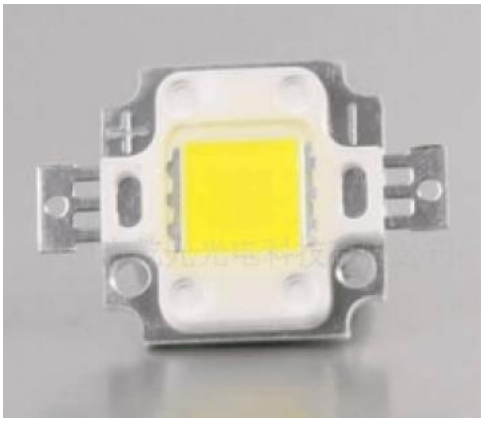


图 15　LED 灯珠外形

其中，灯珠如图 15 所示，属于集成式封装结构。每个灯珠封装 9 个 GaN 蓝光芯片，三串三并连接起来， 芯片表面涂有荧光粉进行光补偿， 用环氧树脂将芯片进封装，并用银胶将其固定于铜热沉上，加装透镜，用金线连接电极。热沉与线路板通过导热硅胶相连， 线路板与散热片通过散热片四边上的螺钉固定，为减小接触热阻，线路板与散热片中间层也涂覆导热硅胶。

2、灯具热网络模型

由灯具结构可分析该 LED 灯的散热途径主要有 3 个：

1）芯片—荧光粉层—环氧树脂—透镜—环境；

2）芯片—金线—支架—线路板—导热硅胶—散热片—环境；

3）芯片—银胶—铜热沉—导热硅胶—线路板—导热硅胶—散热片—环境。

由于封装用的环氧树脂热导率只有 0.2W/(m·k)，在这里做绝热处理。另外金线的面积很小， 其传热效果微乎其微， 所以主要的散热途径为第三个， 即芯片发出的热量由热沉、导热硅胶、线路板、导热硅胶传导到散热片上，再由散热片以对流方式进入空气中。

依据上述分析的主要散热途径来对模型进行简化： 将 LED 灯珠透镜简化为长方体以减小计算量； 将芯片与热沉间的银胶简化为 0.1 mm 的薄板；灯珠与散热片之间的导热硅胶简化为 0.3 mm 的薄板。简化后的结构如图 16 所示，其热网络图如图 17 所示。

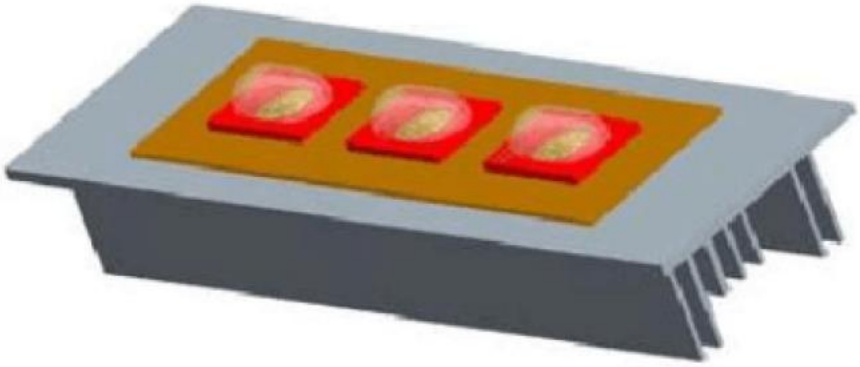


图 16　简化结构

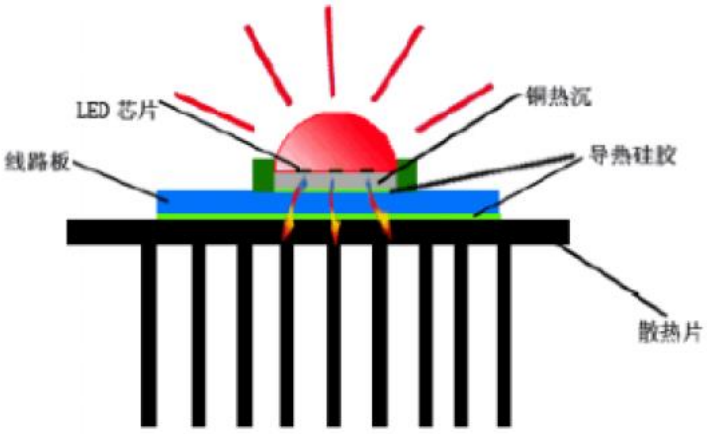


图 17　LED 等热网络图

3、灯具热分析

然后根据灯具的运用场合和实际工作情况来确定边界条件如下：

1）每个芯片功率为 1.5　W，发光效率为 20%，所以每个芯片发热功率为 1.2W，即将每个 source 的 total heat 定义为 1.2 W。

2）该灯具为隧道灯，且最高温度不会超过 100℃，故不考虑太阳辐射。

3）在实际使用过程中，　该灯具直接安装在外界空气中，　属于自然对流情况，故定义箱体 6 个面均为 opening，并假设环境温度为 25 ℃。

参考实验结果及相关材料手册，确定各材料特性如表 3 所示。

表 3　材料导热系数表（单位：　W/(m • k)）

材料	银胶	铜	线路板	导热硅胶	散热片	皮垫	透镜
导热系数	5	340	10	5	230	1	1

最后对该灯具划分网格并进行稳态计算后得到整体温度分布结果如图 18 所示。

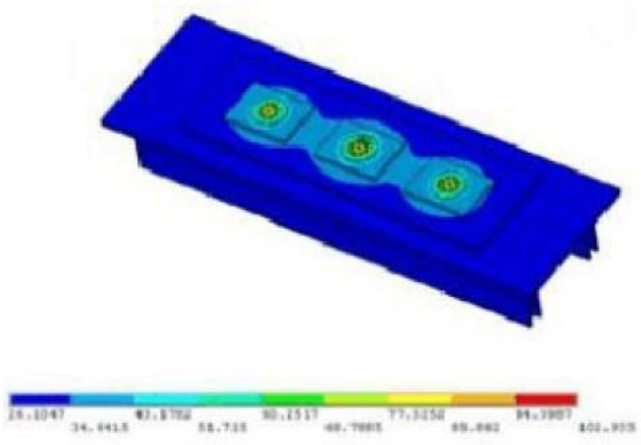


图 18　LED 灯整体温度场分布

图 18 表明灯具最高温度集中在芯片处，且最高温度高达 76.23　℃，考虑一定的误差，极有可能超过最大允许结温 80 ℃，可见，该 LED 灯具目前的散热情况比较差，有必要对目前散热系统进行改善。分析该灯具温度高的主要原因是：　线路板层厚度大且导热性差，　另

外散热层太多， 产生了导热瓶颈， 热量不能很好的传导。

4、改进设计

传统散热技术分为主动式散热和被动式散热， 散热片属于被动式散热， 即依靠空气自然对流散发热量， 而主动式散热包括热管、热电制冷技术、纳米传热技术、微喷散热技术、微通道散热技术、风扇、均温板、冷板等。对灯具散热结构进行改进的思路为： 首先考虑可以对线路板进行挖空处理， 然后对散热片的尺寸进行优化选择， 最后研究了界面材料对散热过程的影响， 并设计了其他 3 种方案：在散热片上加装热管、加装风扇、将散热片改用均温板材质。

对以上这些方案的仿真结果进行对比与分析后，提出了可行的建议。

（1）线路板挖空方案

改进设计应该遵守 LED 散热设计的一般原则： 在合理的范围内结构层越少越好，层的厚度越薄越好，层的面积越大越好，材料的导热系数越大越好。对于该 LED 灯，将线路板进行挖空处理，使热沉与散热片直接相连，这样减少了线路板层和导热硅胶层，更有利于热传导。

改进后的热网络模型减少了线路板层和一层导热硅脂。热传导线路为芯片—导热硅脂—铜热沉—导热硅胶—散热片—环境，于是热网络图如图 19 所示。

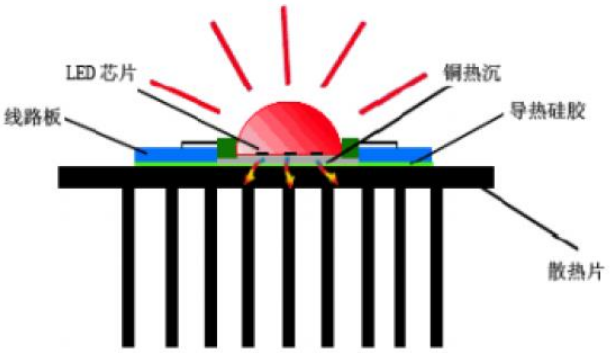


图 19　改进后的 LED 灯热网络图

模拟结果如图 20 至图 24 所示。图 20 为整个 LED 系统的温度分布图，图 21 到图 24 分别为 LED 芯片、铜热沉、导热硅胶及散热片的温度分布。

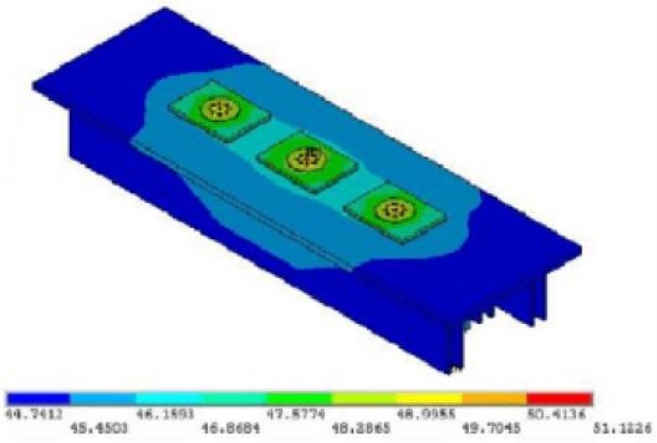


图 20　挖空线路板后的 LED 灯整体温度场分布

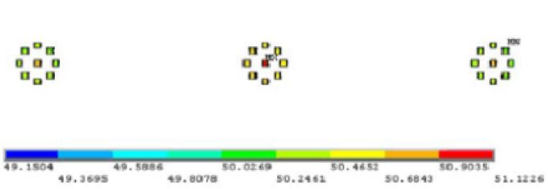


图 21　LED 芯片温度场分布

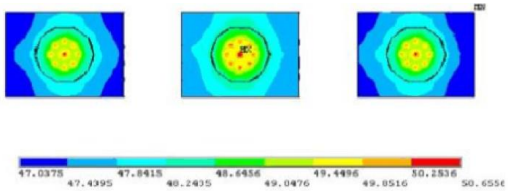


图 22　热沉温度场分布

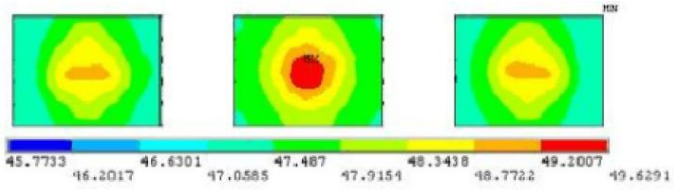


图 23　导热硅胶温度场分布

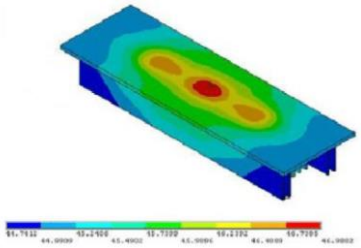


图 24　散热片温度场分布

由于 LED 芯片的布局不一致， 与之接触各部分温度分布也不均匀。此外由于各层的温度场分布不均匀， 相邻部分的温度会有重叠， 所以各层的温度带采用该部分最高温度与最低温度之差。

从仿真结果中可以读取结点温度为 51.1226℃，相比较未改进模型温度降低了很多，且在允许范围之内， 说明改进后的散热结构满足了散热要求， 证明了改进后散热结构的可行性。

（2）散热片优化方案

目前，大功率 LED 灯使用最多的散热技术是散热片， 散热片是利用较大的散热面积来对流散热。对于散热片而言，形状、加工工艺、尺寸及材料是决定散热性能的几个重要因素。下面主要对散热片的尺寸进行优化。

散热片主要尺寸包括翅片厚度 A、翅片间距 B、翅片高度 H 及散热片底板厚度 C，如图 24 所示。本例中 A=2 mm，B=6 mm，H=40 mm，C=4 mm。

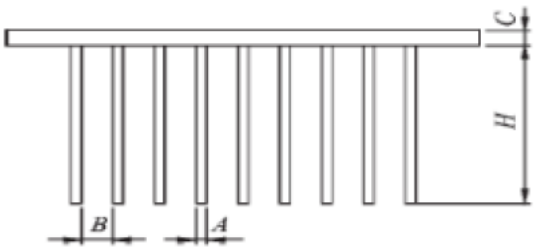


图 24　散热片（翅片）尺寸

运用 ANSYS 参数化设计功能来对该隧道灯的散热片进行尺寸优化，优化流程如下：

1）首先当 H=40，C=4 时，分别取 A 为 1.5，2，2.5，3，B 为 4.5，5，5.5，6，对 A、B 进行组合以得到 16 组值，仿真计算后得到 16 种情况下的结温，并将同一 A 值下结温与 B 值的关系绘制成曲线，如图 25 所示。

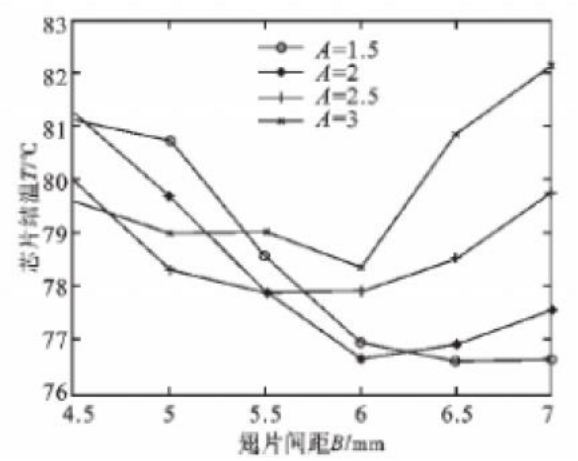


图 25　不同翅片厚度下结温随翅片间距的变化关系

由图 25 可以看出， 对于同一个 A 值，4 条曲线有类似的变化趋势， 都是随着翅片间距的增大结温先降低后升高， 另外从图中还可以看出， 当 A=2，B=6 时结温最低。

2）当 A=2，B=6，H=40 的情况下，取 C 为 3，4，5，6，7，8，9，得到 C 值与结温的关系，绘制成曲线，如图 26 所示。可以看出，随着基板厚度的升高，结温先快速降低，随之变得平缓甚至有略微的升高，且在 C 为 6 时，取得结温的最小值。

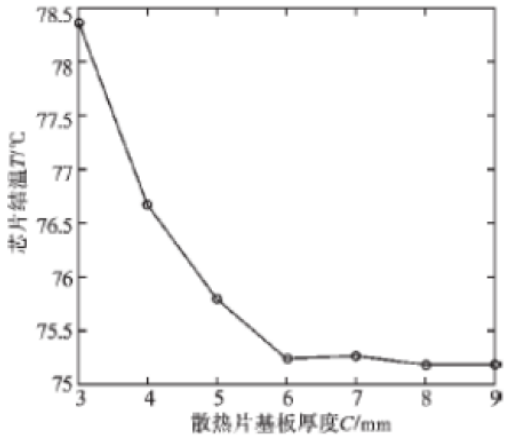


图 26　散热片基板与结温的关系

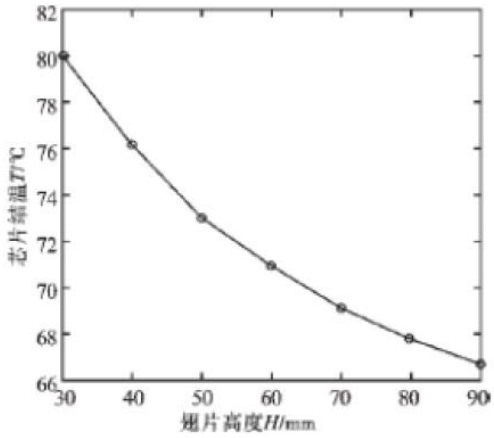


图 27　翅片高度与结温的关系

3）当 A=2，B=6，C=6 的情况下，分别取 H 值为 30，40，50，60，70，80，90，得到 H 值与结温的变化关系， 如图 15 所示。可以看出， 随着翅片高度的增大，结温先大幅降低随后变得缓慢，可见适当升高翅片高度对于结温的降低作用很大，另外当 H=60 时为翅片高度和结温的最佳值。

则当 A=2、B=6、C=6、H=60 时散热片的散热效率为最佳， 此时结温为 70.97 ℃，比优化之前大约降低了 5.35 ℃，可见，对散热片进行优化的效果很明显。

（3）加装热管方案

热管是一种优良的导热元件， 外部为铜壁， 内部有吸液芯和冷凝液， 通过液气两相的循环变化， 将 LED 发出的热量导出并散发掉。热管在 LED 上的应用有多种形式，可以将 LED 芯片直接安装在热管吸热端的顶部， 也可将其加工成平板式、回路式。热管的特点是能够将热量传输到较远的、容易散热的位置， 在实际应用中方便、灵活。

下面设计了散热片加装热管的散热方案， 加装热管后结构如图 28 所示，本研究将 2 mm 平板式热管蒸发端穿过芯片底部的热沉，并以工字型弯折，冷端垂直穿插在翅片中，每个芯

片底部加装 1 根热管。设置热管的轴向热导率 30 000 W/（m·k），另外两个方向为 450 W/（m·k）。

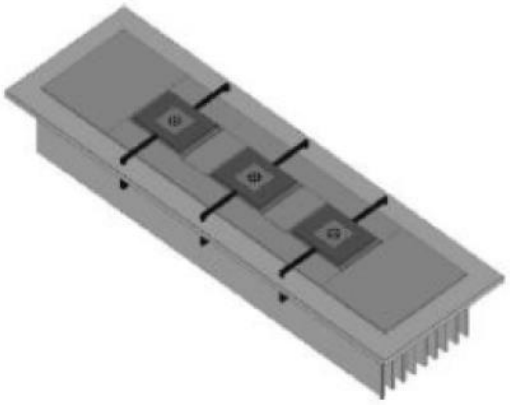


图 28　加装热管后结构

仿真结果显示，加装热管后芯片结温降低了 2.24 ℃，可见，加装热管有利于结温的降低，在以后的研究工作中还可以尝试改变热管安装位置或者尺寸来得到更好的散热效果。

（4）界面材料优化方案

热阻是反映阻止热量传递能力的综合参量，等于热流通道上的温度差与耗散功率之比，单位为 K/W 。当热量在物体内部以热传导的方式传递时，遇到的热阻称为导热热阻； 当热量流过两个接触固体的交界面时，由于缝隙产生的热阻为接触热阻，在灯具的制造过程中，导热硅胶或银胶等界面材料就是用来降低接触热阻的，但是这些界面材料本身的导热率不高， 造成了热传导过程中的瓶颈。针对这一热现象， 本研究对芯片与铜底座之间的界面材料进行研究， 选择了几种不同导热率的界面材料来模拟热分布，其结果如表 4 所示。

表 4　不同界面材料下的芯片温度

界面材料热导率 /(W/(m·k))	芯片最高温度 /℃	芯片最高温度 /℃
2	101.93	69.66
5	49.87	68.26
8	76.23	67.47
10	74.54	66.05

由表 4 数据可知，界面材料导热率稍微增大，结温将会大幅降低，所以提高界面材料导热率对 LED 散热有着非常大的作用， 应把更多的精力放在设计和选用更好的界面材料上，从而降低界面材料这一导热瓶颈的影响。

（5）加装风扇方案

风扇属于风冷强制散热， 可以较大程度地提高散热片散热效果。加装风扇方案为：在翅片垂直的端面上分别加装类型为 intake 的轴流风扇，分析结果显示：加装质量流量为 0.01 kg/s 风扇后，芯片最高温度降低了 9.76 ℃；加装 0.02 kg/s 风扇后，降低了 16.01℃，可见风扇对于 LED 散热具有明显的效果。

从上述数据可以看出，在增强热传导的同时更应该更加注重热对流的影响。但是加装风扇还存在两个问题：① 如何确保风扇寿命和 LED 寿命匹配的问题，一般风扇寿命多为几千小时，而 LED 寿命可长达 5 万小时；②加装风扇会使灯具显得笨重。如果能够有效地解决上述问题，将风扇很好地运用在 LED 灯具上，也不失为一种很好的选择。

（6）均温板设计方案

均温板的原理与热管相似， 但是热管的传热是一维单向的， 而均温板是二维的面传热方式。均温板可以使热量分散， 减小扩散热阻。该方案是将散热片用均温板材料来制造，仿真结果显示，均温板的散热效果比较明显， 结温降为 71.09 ℃，降低了 5.15 ℃，另外，散热片在平面方向上的温度非常均匀，可见均温板也是一种好的选择。

这部分内容举例一款大功率 LED 灯进行了热分析与改进设计，并应用 ANSYS 软件对改进前后 LED 灯具进行温度仿真分析，从而优化整个照明散热系统设计。结果显示， 要增强 LED 灯具的散热性能可以采取下面 4 种方式：①对线路板挖空处理； ②加装风扇来增强强制对流作用；③采用均温板材料或者热管技术；④提高界面材料热导率。

【项目小结】

散热技术是 LED 照明灯具设计的关键技术之一，良好的散热效果是照明灯具性能的保证，只有充分了解 LED 灯具热量产生及传递的路径，散热技术方案的设计才会更有针对性。通过掌握散热材料的热学、光学参数，借助分析模型，从影响热量传递的各个环节上优选最合适的材料；并且可以借助散热仿真软件，模拟分析 LED 灯具的热量分布，节省时间和成本，优化散热设计方案；同时 LED 电源设计、光学设计与散热设计是息息相关的，需要综合考虑。

【思考与练习】

1、照明灯具通过热传导、热对流和热辐射三种散热方式如何散发热量？针对不同的散热方式分别由哪些设计要求？

2、照明灯具的散热途径或散热通道是什么？

3、照明系统散热设计过程中材料如何优选？

4、如何在 ANSYS 中查看内部的热应力分布？

项目五　光源灯具设计

【知识目标】

1、掌握 Tracepro 光学设计软件；

2、掌握利用 Tracepro 进行常见的透镜和反光杯设计；

3、会光学设计过程中的照度分析和光强分析。

【技能目标】

1、能熟练使用 Tracepro 光学设计软件；

2、会优化光学设计方案。

【任务导入与项目分析】

照明技术中光场分布式通过对光线传播方向的控制，最终实现光通量的合理分配，满足照明设计要求的过程。而控制光线的途径，在照明光学设计里，一般均采用光的几何光学传播规律：折射和反射（很少使用物理光学原理）。对光线的折射和反射，离不开透镜元件和反射元件。而这些光学元器件的设计和仿真模拟需要借助于照明设计软件，常用的极易上手的照明设计软件是 Tracepro，它有强大的分析功能，适用于几乎所有的照明系统设计仿真。

任务一 Tracepro 简介

Tracepro 是一套可以做照明系统分析，传统光学分析，辐射度以及光度分析的软件，它也是第一套由符合工业标准的 ACIS 立体模型绘图软件所发展出来的光机软件。它提供了简单易用的图形接口，所以我们能够轻易的检视模型，建立立体对象，以及设定材料特性，表面性质和光源特性。它可以同时开启多个档案来完成编辑。

1.1 Tracepro 的操作界面介绍

安装好 Tracepro 软件后，程序会自动创建多国语言快捷方式，如英文版、简体中文版、繁体中文版、日语和意大利语等。其中 CHS 表示简体中文版，可通过工具下来菜单进行修改。若不选择默认是英文版，将其打开，得到如图 1 所示的操作界面。

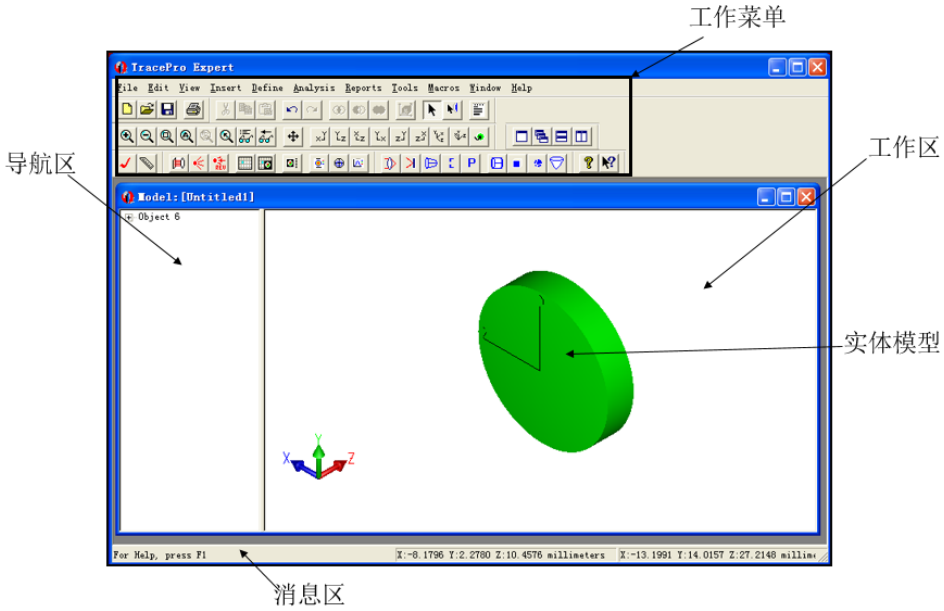


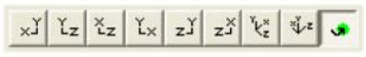
图 1　Tracepro 的操作界面

从图 1 可知，Tracepro 软件的主界面，抓哟分为五个部分：主菜单、快捷菜单按钮栏、系统树导航区、模型视图区域或工作区、坐标状态栏或消息区。

下面对一下常用的快捷按钮做简单介绍。



放缩移动工具



坐标转换与旋转工具

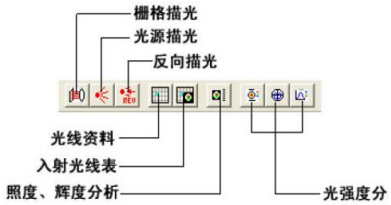


插入模型种类工具

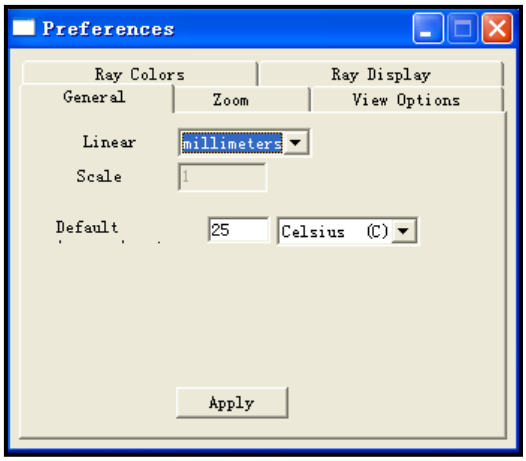


多窗口切换工具

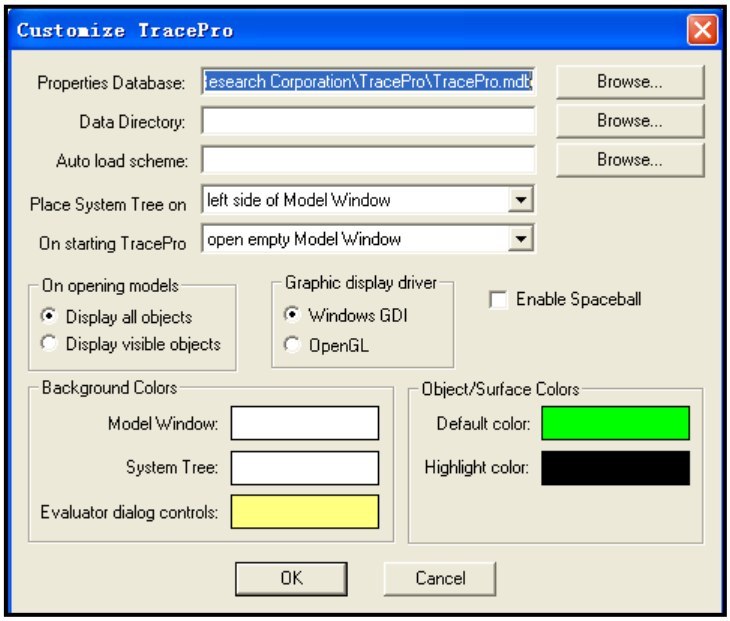




特性修改路径：View>Preference，此处可以设置 Tracepro 操作界面中显示方面的参数，如界面的显示单位，缩放时的倍率，显示光线的颜色，方式等等。



View>Customize，此处可以设置 Tracepro 操作界面中运行方面的参数，如导航区的位置，模型的显示方式，模型的颜色，背景的颜色等等。



1.2 Tracepro 模拟步骤

Tracepro 模拟步骤主要包括：建立模型、光学特性、光源设定、分析功能。

1、建立模型

建立模型的方法有以下三种：

1）Tracepro 自建模

利用 Tracepro 软件本身的功能建立各种模型面、平面、曲面、球面、非球面体、球体、正方体、椎体和环等。

2）在专业 3D 设计软件中建模，然后导入 Tracepro

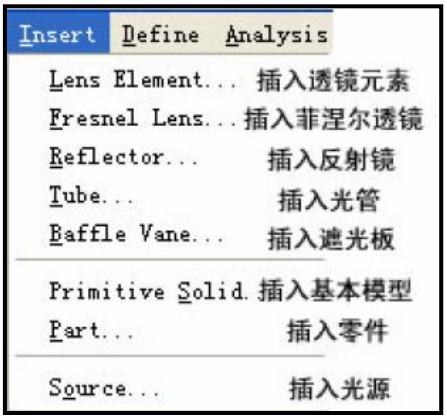
在 PRO/E、UG、CAD 或 SOLIWORKS 等 3D 专业模型设计软件中将实体建好，保存为 igs，sat，stp 等格式，导入 Tracepro 并设置属性后，就可进行模拟。

3）光学软件建模

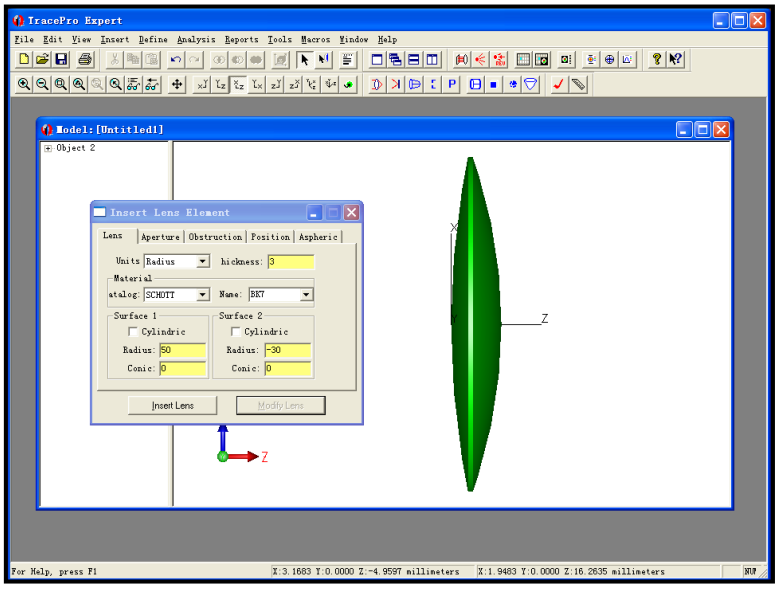
Tracepro 与很多光学模拟软件如 ZEMAX,OSLO,Code V 等是共用的，所以可以直接用 Tracepro 打开这些软件保存的文档。

首先介绍 Tracepro 软件自建模方法。

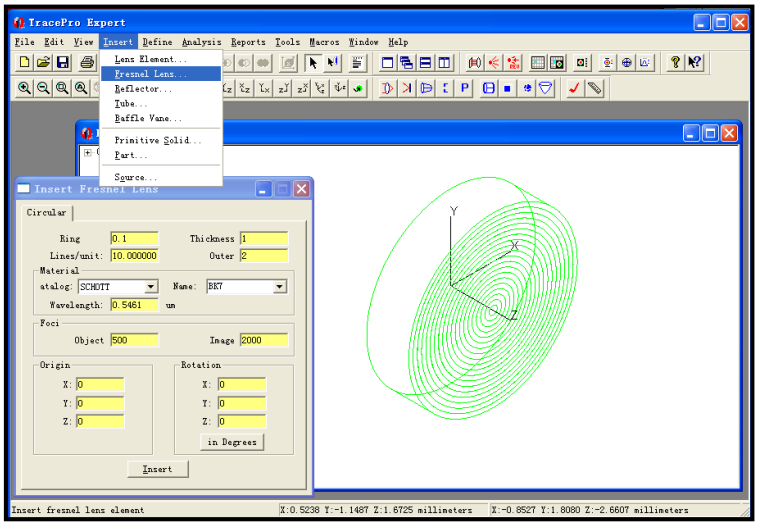
Tracepro 软件本身提供了一个强大的模型库，使用者可以根据自己的需要选择不同的模块来建立模型。其路径就是 :Insert>



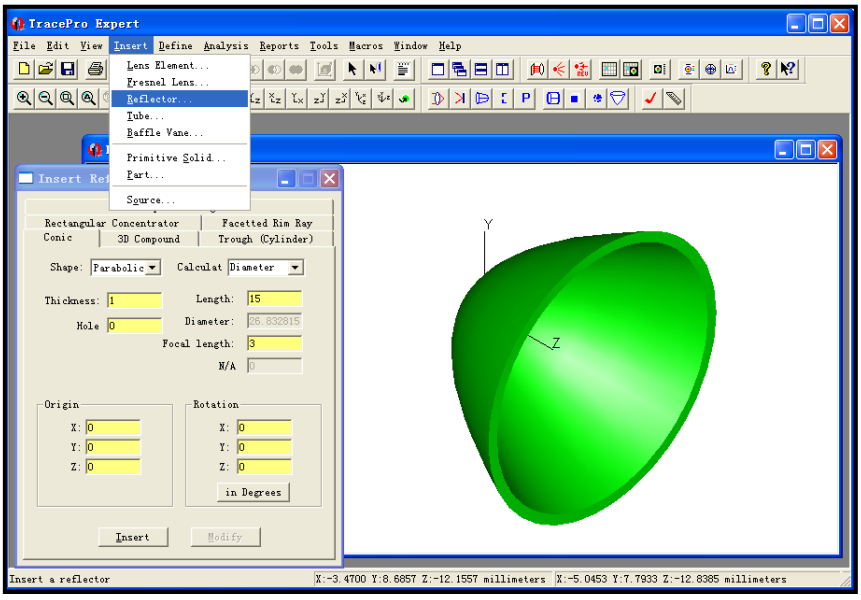
若选择插入透镜，Insert> Lens Element，主要要点：1）透镜材料选择；2）透镜参数设置；3）透镜的位置设置。



也可以在这里选择创建菲涅尔透镜，Insert> Fresnel Lens

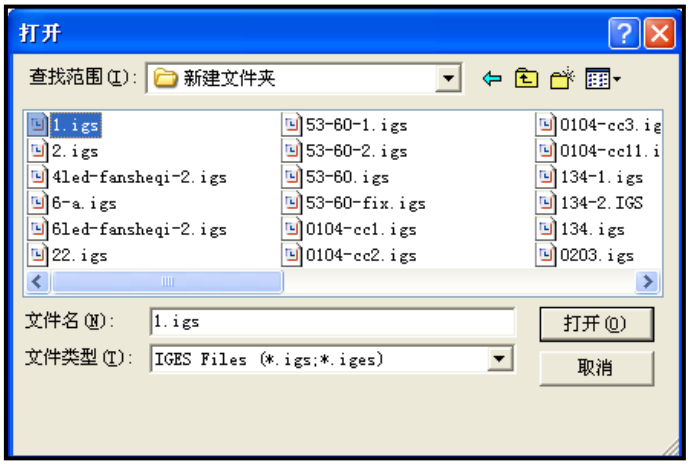


也可以在这里创建反射器，Insert> Reflector

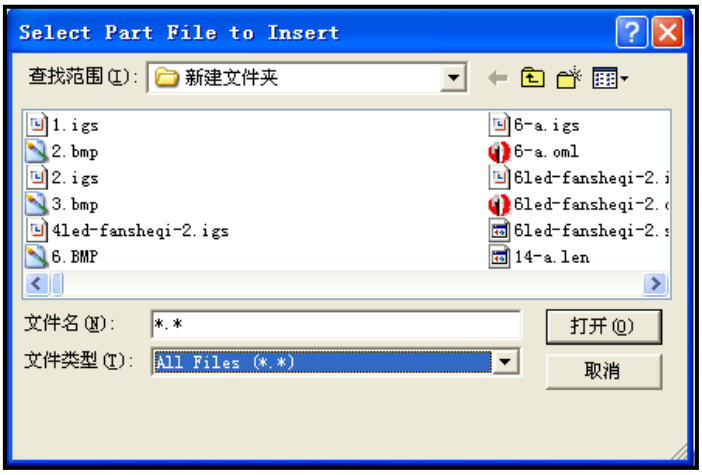


其次，专业 3D 设计软件中建模，然后导入 Tracepro 方法。有两种 3D 模型导入方式：

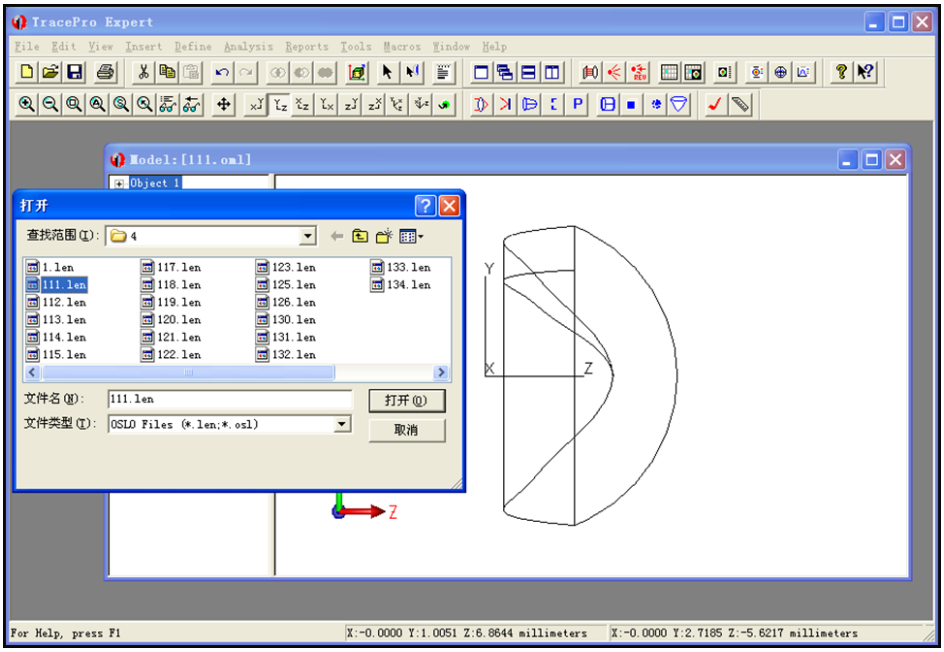
1）File>Open



2）Insert>Part



最后，在光学软件中的建模，Tracepro 可以将其他程序建好的模型，直接读取，简单方便。如图，通过 Tracepro 打开 OSLO 文档。



2、光学特性

Tracepro 的建模后，就要对模型进行属性的设置光学特性在 Tracepro 的模拟中非常重要，模拟的目的是模拟结果与实际更为接近。所以光学特性的定义就是给模拟效果一个好的起始。



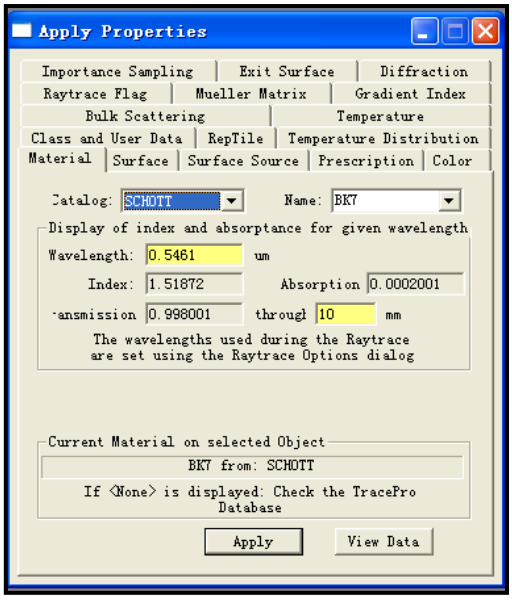
路径：Define>Apply Properties

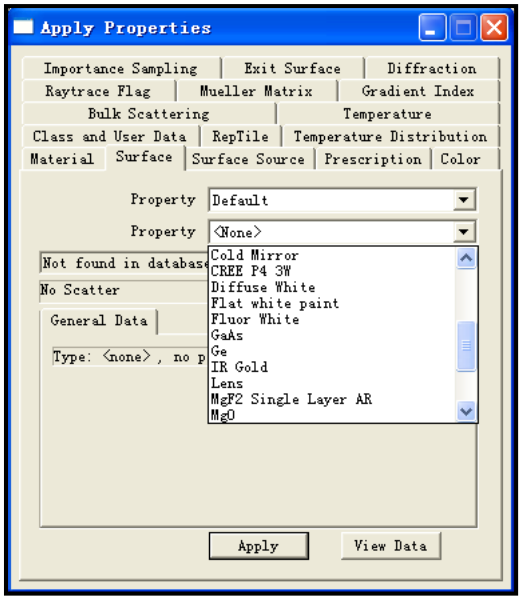
1）Material 用来定义实体的材料

如图：材料为 BK7 玻璃，材料的名称下面表示出材料的各种光学特性：色散系数，相对波长的折射率，材料的吸收率。而且，也可以通过最下方 View Date 更改材料的这些属性。

2）Surface 用来定义表面属性

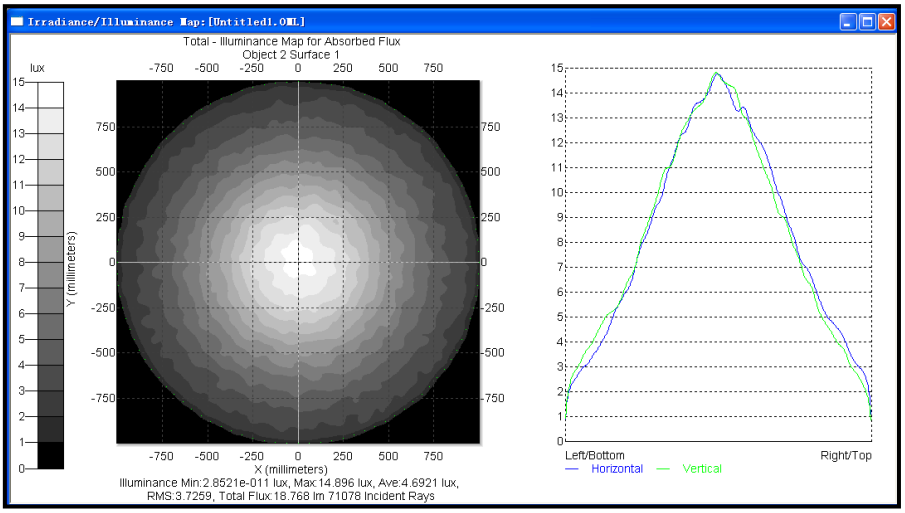
可以在此处对模型的表面进行定义。如：表面被设置为镜面，吸收面，散射面，或者在模型的表面定义一些薄膜，等等。





3、照度分析

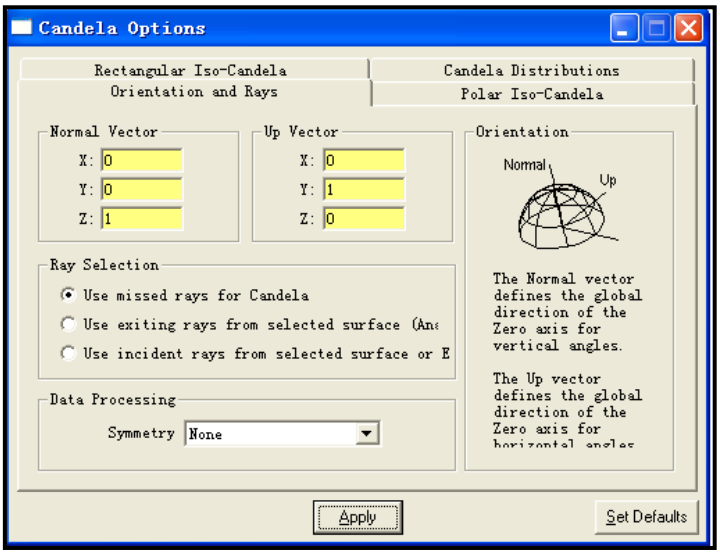
如图，一个 LED 光源投射在 1 米处的光斑照度效果图。在图的下方注明模拟结果：最大照度，平均照度，接受面接受到的光通量参数。



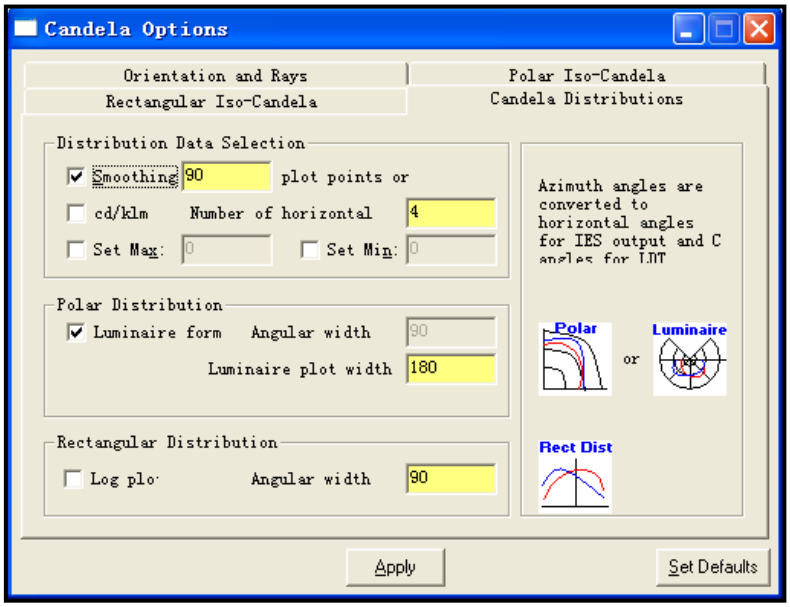
4、光强分析

光强分析参数设置：

方向参数的设置 Normal Vector 主方向光源投射的方向，输入不同的数值，软件会通过坐标自动的计算出该方向。Up Vector 参考方向与主方向垂直。

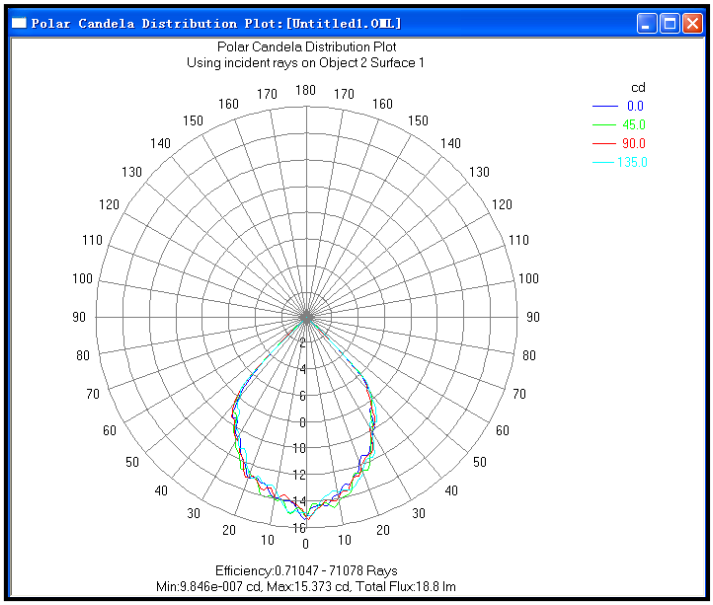


Smooting 设定光强分析的区间大小，设置的数目却大，分析的区间越小。当数目增大到一定程度时，配光曲线的光强不再变化，此时得到合适的模拟值。

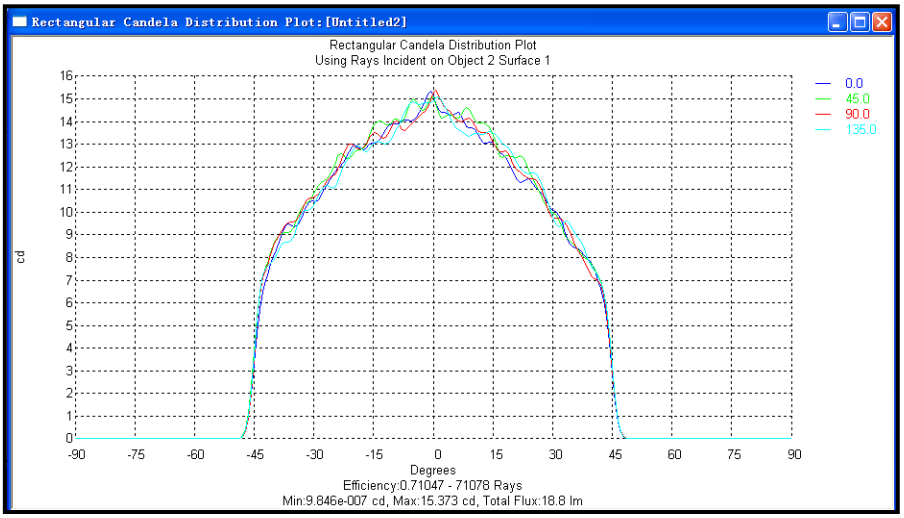


光强分析　极坐标配光曲线

如图，一个 LED 光源的极坐标配光曲线图。在图的下方已注明模拟的结果：效率，接受到的光线数目，最大光强，接受到的光通量。



光强分析　　直角坐标配光曲线



任务二 Tracepro 设计实例

Tracepro 设计实例。分析设计要求：

光源：Cree LED Q4　110lm；

光斑要求：1 米处最大光斑直径不于小 1 米，中心光斑直径不于小 0.12 米；

照度要求：1 米处最大照度要达到 4000lux；

透明件：3mm 钢化玻璃；

反光杯尺寸：25*20mm；

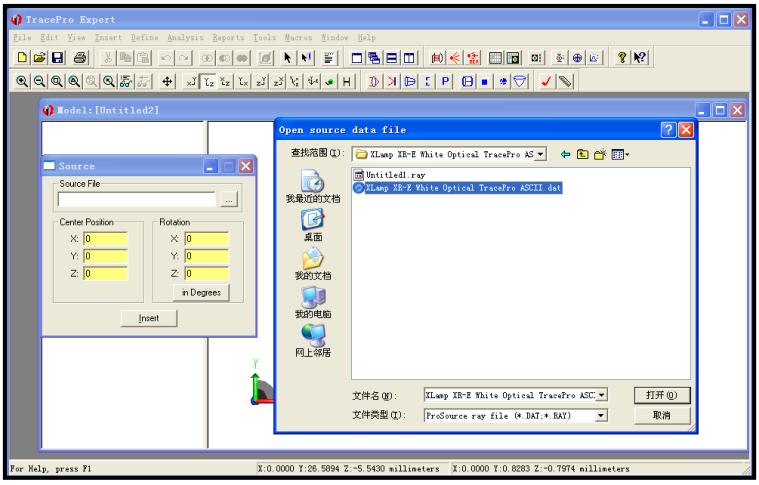
光源 ：总光通量 110lm ， 半光强角度 110 度；

配光： 截光角不应小于 27 度，半光强角不小于 6 度；

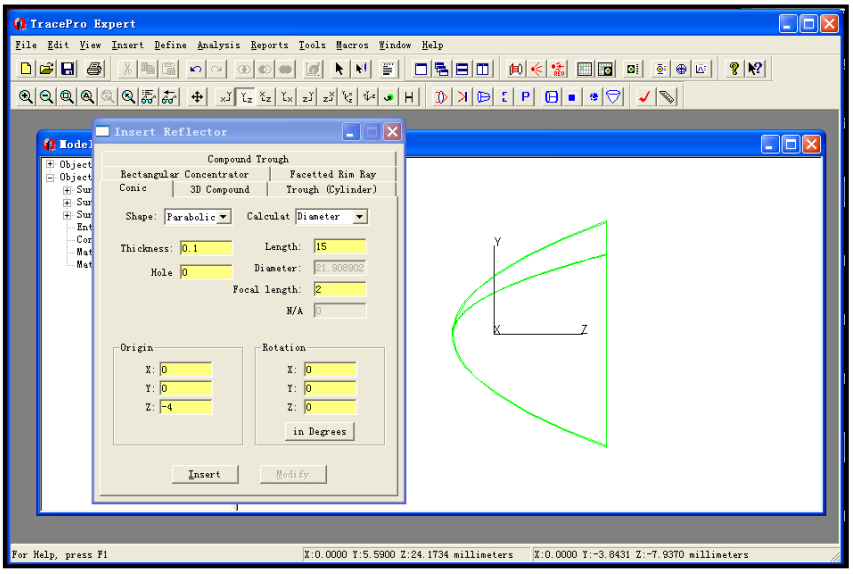
照度　中心光强为 4000cd。

通过分析，可以得出：设计需要一个聚光的反光杯，且反光杯的口径与深度的比值接近于 1。

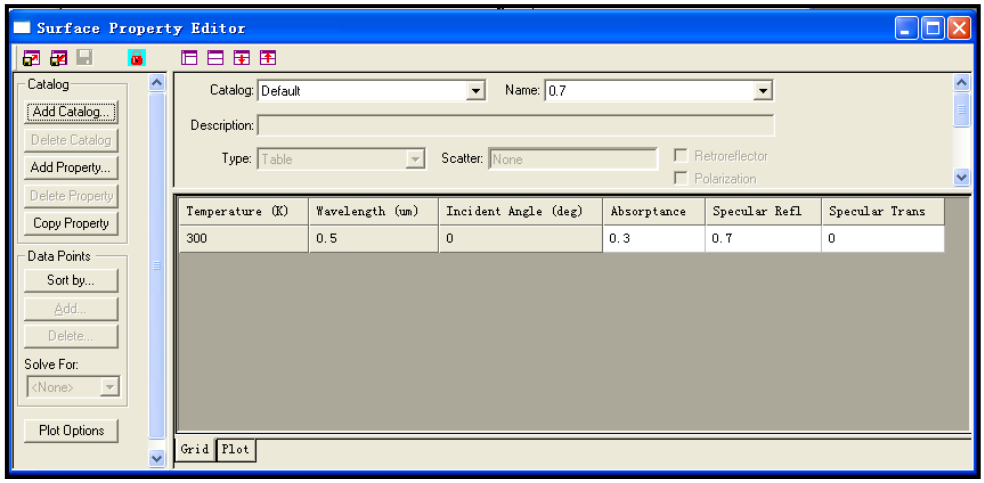
1、导入光源　Insert>source



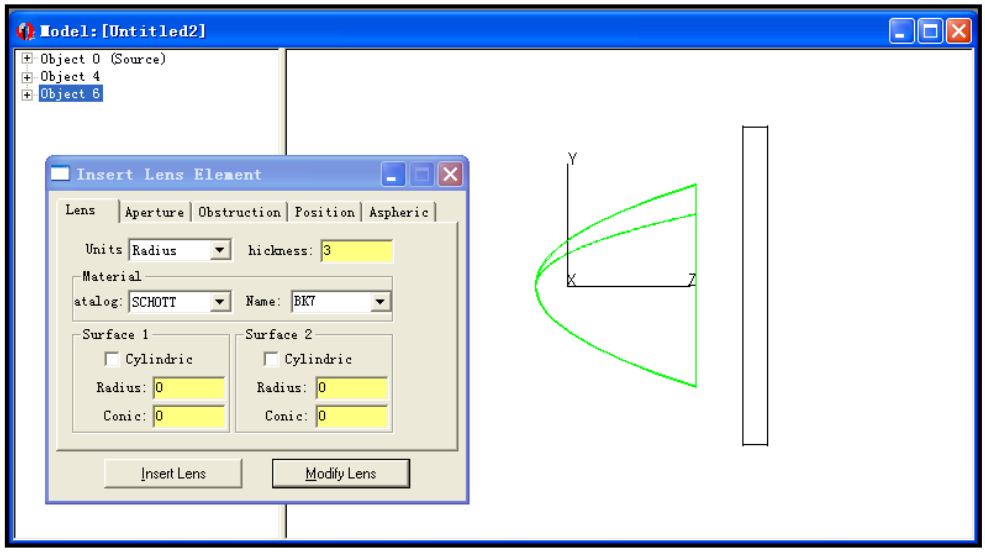
2、建立模型 Insert>Reflectior



建立好模型后，需要通过 ApplyProperties 来为模型添加表面属性。点击导航区中模型的名字，然后鼠标右键，选择 ApplyProperties，在 ApplyProperties 中选择 Surface。在 Surface 的下拉表格中有多种反射面模式，可以根据自己的需要选择合适的反射面，也可以点击 View Date，自定义反射面的属性。



反光杯建好后，材料属性也定义完毕，需要根据要求在反光杯的前方添加 3mm 的钢化玻璃。



3、添加一个接受平面

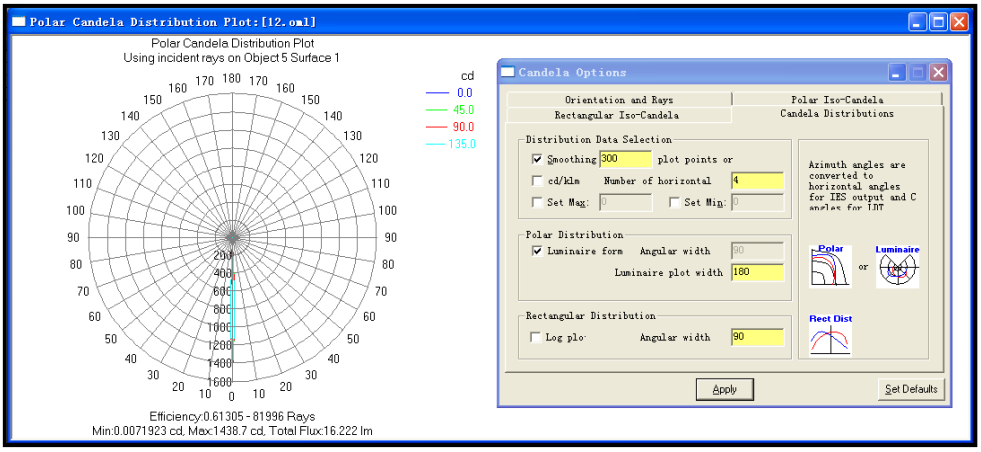
模型添加完毕后，最后需要添加一个接受平面。接受平面可以根据实际需要定义它的大小，位置。模拟完毕后，我们可以从接受平面上得到有效光效，光斑效果等模拟结果。

首先，Insert Primitive Solide，添加接受平面。

其次，将接受平面用过 Apply Properties 中 Surface 定义为 Perfect Absorber。

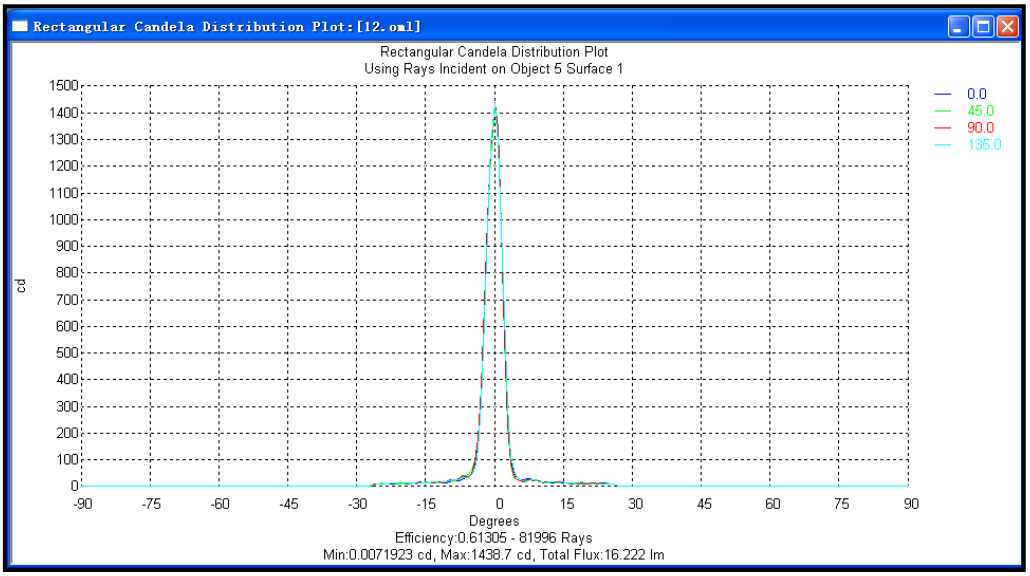
最后，点击  ，开始模拟。

4、查看模拟结果 ，极坐标配光曲线



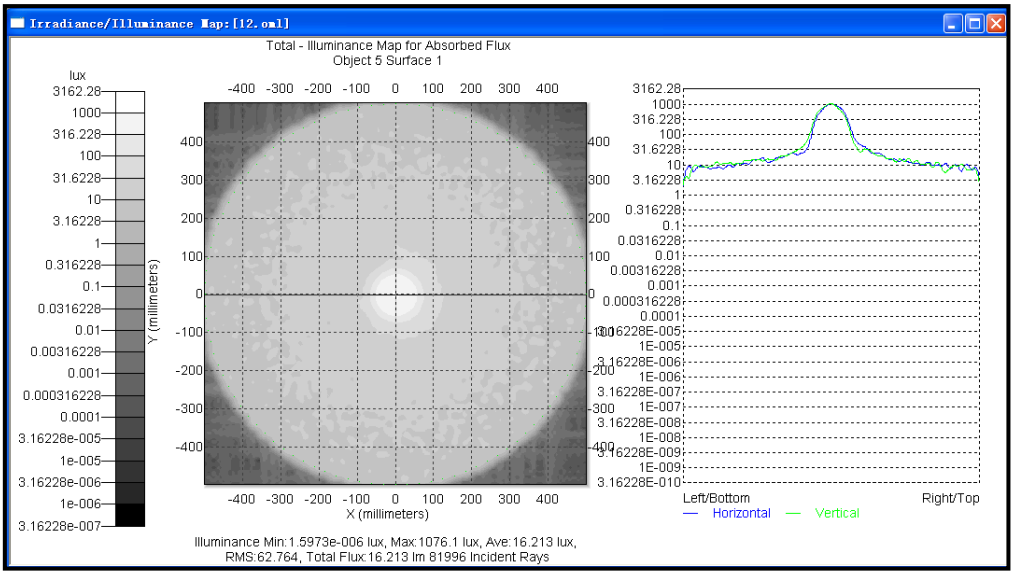
从模拟的结果中可以得出，灯具效率为 61%，最大光强 1438.7cd。

查看模拟结果 ， 直角坐标配光曲线



从模拟的结果中可以得出，半光强角为 6 度。

查看模拟结果 ， 光斑照度



从模拟的结果中可以得出，1 米处光斑的直径略大于 1 米，中心的最大照度为 1076lx，

平均照度 16.21x。

5、分析结果

上述的模拟结果，光源的光通量为 26.41m。当光源的光通量为 1201m 时，半光强角不变，光斑的大小尺寸不变，中心光强为 6086.8cd，1 米处最大照度为 45521x。对比设计要求，符合设计需要，设计完毕。

【项目小结】

Tracepro 是一套可以做照明光学系统分析、传统光学分析，辐射度以及光度分析的软件，它也是第一套有符合工业标准的 ACIS 立体模型绘图软件发展出来的光机软件。功能强大的 Tracepro 减轻了光学设计人员的劳动强度，节约了大量的人力资源，缩短了设计周期，还可以开发出更多质量更高的光学产品。

本项目介绍了 Tracepro 软件的基本操作，其模拟仿真的步骤：建立模型、光学特性、光源设定、分析功能。该软件相对其他光学设计软件来说操作比较容易入门。还介绍了运用 Tracepro 软件设计一个案例基本流程就非常清楚了。

【思考与练习】

1、Tracepro 光学设计软件模拟仿真的步骤如何？可以举例详细叙述。

2、在光学设计软件中构建模型有哪些方法？

3、在 Tracepro 光学设计软件进行模拟仿真时如何照度分析和光强分析？

4、本项目中介绍了反光杯案例的设计及优化，根据所学知识，请在 Tracepro 中举一透镜案例进行设计及优化？

项目七　　照明光环境设计

【项目聚焦】

照明设计又叫灯光设计，灯光是一个较灵活及富有趣味的设计元素，可以成为气氛的催化剂，是一室的焦点及主题所在，也能加强现有装潢的层次感。照明设计分按场景分为为室外照明设计和室内照明设计，其中室内照明是营造环境气氛的基本元素，但是其最主要的功能还是要提供空间照明效果。光作为设计要素之一，室内照明将以人文思想作为设计理念。丰富的照明手段将创造新颖的照明方式，人们的身心和视力健康将因优良的照明而获益。照明设计中大量使用 LED 等新技术，新产品，符合国内节能减排的政策。

【知识目标】

1、了解照明分类及未来照明设计的趋势；

2、掌握照明设计中涉及灯及灯具的照明专业用语：光污染、光辐射、光通量、照度、色温、显色性等；

3、掌握照明设计的四大原则：安全性原则、合理性原则、功能性原则、美观性原则。

【技能目标】

1、掌握 DIALux 软件基本操作技能；

2、利用 DIALux 软件和 DIALux 灯光精灵完成具体室内照明设计任务。

【拓展部分】

利用 DIALux 软件和 DIALux 灯光精灵完成户外照明设计。

【任务导入与项目分析】

照明设计又叫灯光设计，照明设计分按场景分为为室外照明设计和室内照明设计，其中室内照明是营造环境气氛的基本元素，但是其最主要的功能还是要提供空间照明效果。因此，灯光照明不仅仅是延续自然光，而是在建筑装饰中充分利用明与暗的搭配，光与影的组合创造一种舒适、优美的光照环境。于是，人们对室内照明设计越来越重视。本项目通过利用 DIALux 软件进行室内空间照明设计，完成室内空间建模、室内家具与物品置入，室内颜色与材质设置，室内灯具选择与放置，灯光场景设定，引入日光，并输出计算结果。

任务一　DIALux 简介及灯光精灵

一、DIALux 简介

DIALux 是德国 DIAL Gmbh 公司开发的一款针对专业照明设计的软件。可规划，计算和可视化室内与室外区域的照明，从整栋建筑物、各个空间、室外的停车位或道路照明都适用，并适用于所有灯具厂家提供的灯具。DIALux 成了当今市场上最具功效的照明计算软件，它能满足目前所有照明设计及计算的要求。

1、DIALux 软件主要特点

（1）可选择国内的灯具库进行精确计算；

（2）通过 DIALux 的智慧型计算程序提供正确及可信度高的数据结构，保证设计的准确度；

（3）方便、快捷计算出所需的设计方案照明，并输出完整的报表；

（4）住宅、商场、厂房、办公室、医院、景观、建筑物、道路等照明工程设计都适用；

（5）可轻松、简便地选择不同灯具，轻易地比较不同型式的灯具并快速呈现计算值；

（6）可独立建构 3D 的空间，形象、真实地表达设计意图；

2、DIALux 官方网站

官方网站：http://www.DIAL.DE 或 http://www.DIALux.com

3、DIALux 建议安装插件

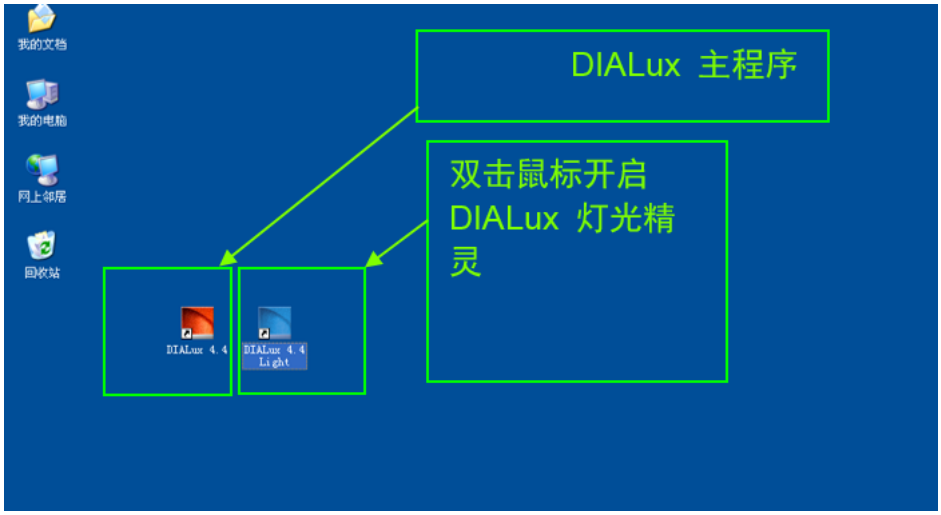
DIALux 建议必装的光源厂家有：OSRAM、PHILIPS、MEGAMAN 等；

建议选装的灯具厂家有：三雄极光、TCL、NVC、SFTLIGHTING、阳光照明等。

二、灯光精灵

DIALux 精灵是用于快速指引用户进行 DIALux 设计的软件。

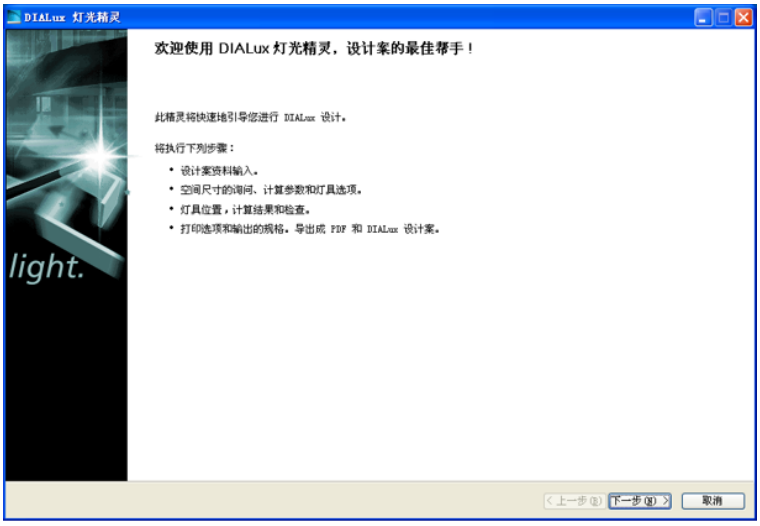
1、DIALux 灯光精灵图标及打开方式

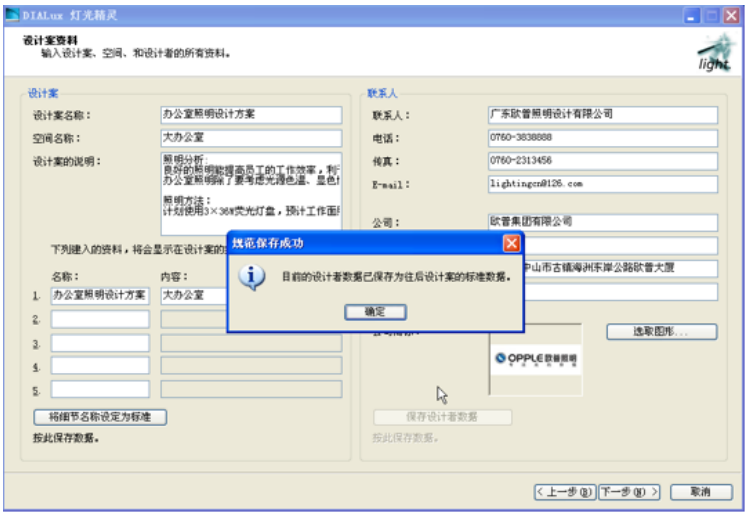


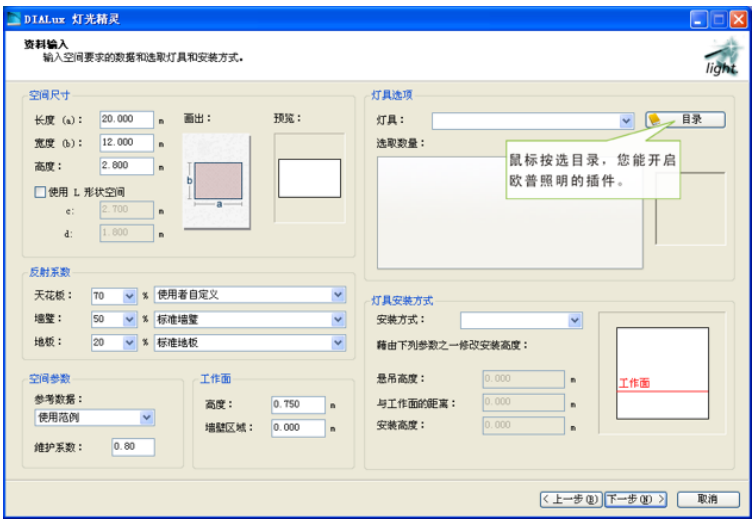
2、灯光精灵开启后，屏幕上会弹出一个欢迎画面，并有下一步操作的说明。

若您完成一个窗口的输入后，请按下一步键。

3、在设计案的资料窗口，您可输入设计人及客户的数据。这些数据以后都会被打印在报表中。



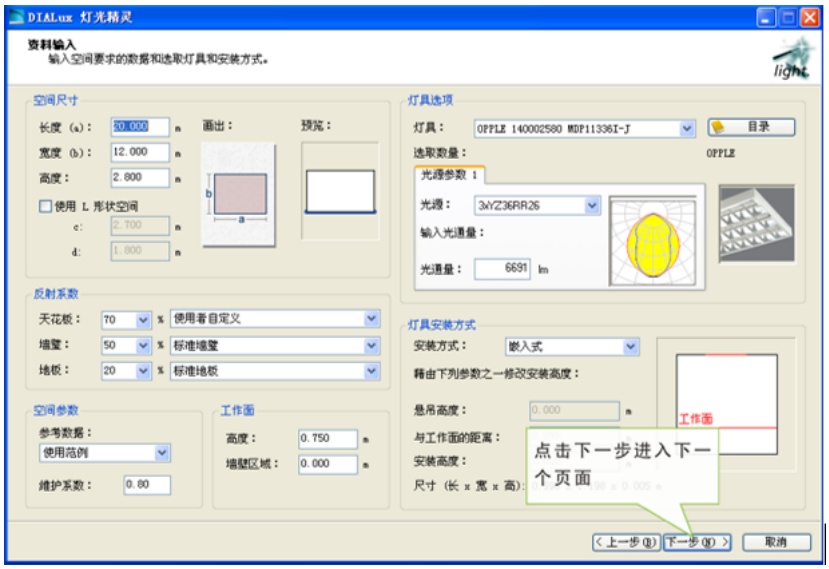


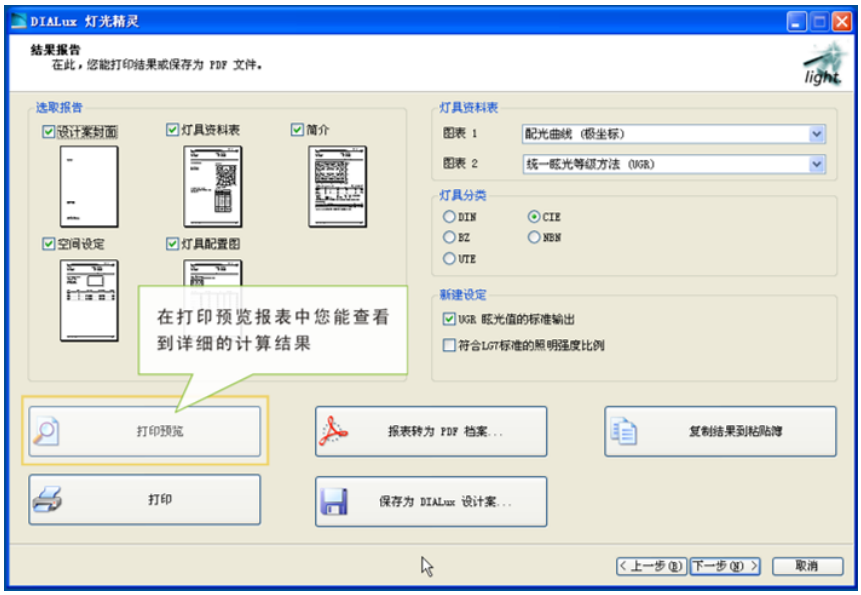


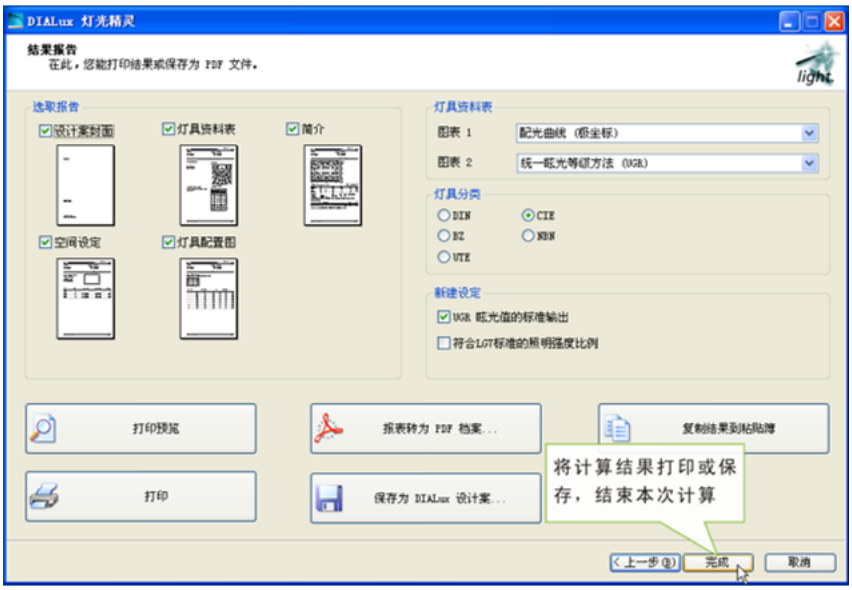
4、在数据输入窗口，可以在左侧确定空间的几何形状。一般来讲，DIALux

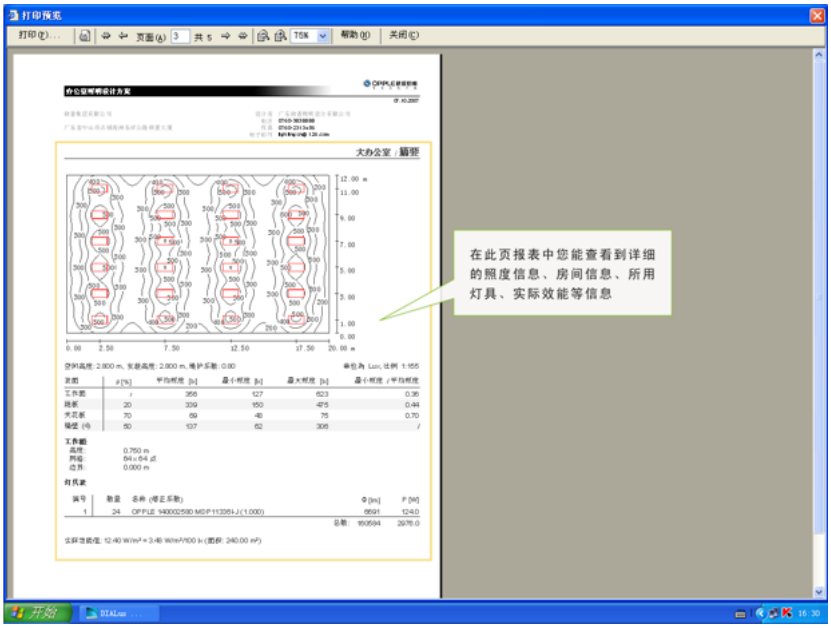
总是先预设一个长方形的空间。

5、鼠标按选目录，您能开启一家厂商的插件。选取所需灯具，按下插件中的使用键，然后关闭插件。DIALux 这时就将您选的灯具显示在右上角。






DIALux 灯光精灵
结果报告
在此，您能打印结果或保存为 PDF 文件。
选取报告
设计案封面
灯具资料表
简介
空间设定
灯具配置图
灯具资料表
图表 1
配光曲线（极坐标）
图表 2
统一眩光等级方法（UGR）
灯具分类
DIN
CIE
BZ
NBN
UTE
新建设定
UGR 眩光值的标准输出
符合LG7标准的照明强度比例
打印预览
报表转为 PDF 档案...
复制结果到粘贴簿
打印
保存为 DIALux 设计案...
将计算结果打印或保存，结束本次计算
< 上一步(B)
完成
取消


打印预览
打印(P)...
页面(A) 3 共 5
75%
帮助(H)
关闭(C)
大办公室，扇形
在此页报表中您能查看到详细的照度信息、房间信息、所用灯具、实际效能等信息
开始

任务二　室内空间建模

一、任务要求

建立室内空间：使用 CAD 底图建立一个办公室空间。

二、任务实施

（一）建立办公室空间

1、导入 CAD 文件《CAD 3a_Schriever》 ；

2、以图 1 左上角的办公室为底图，沿着下图中的红线（墙内壁）建立办公室空间，注意：CAD 中的单位是“米”；

3、输入房间高度：2.8 米；

4、反射率、维护系数等其他数值按默认值；

5、建立与房间高度相同的窗，并用“沿着线复制”布置两个整面墙壁，注意：在 CAD 中测量窗的尺寸和窗的距离；

6、建立门，注意：在 CAD 中测量门的位置和尺寸，门高 2 米；

7、保存文件为“任务 3a.dlx”。

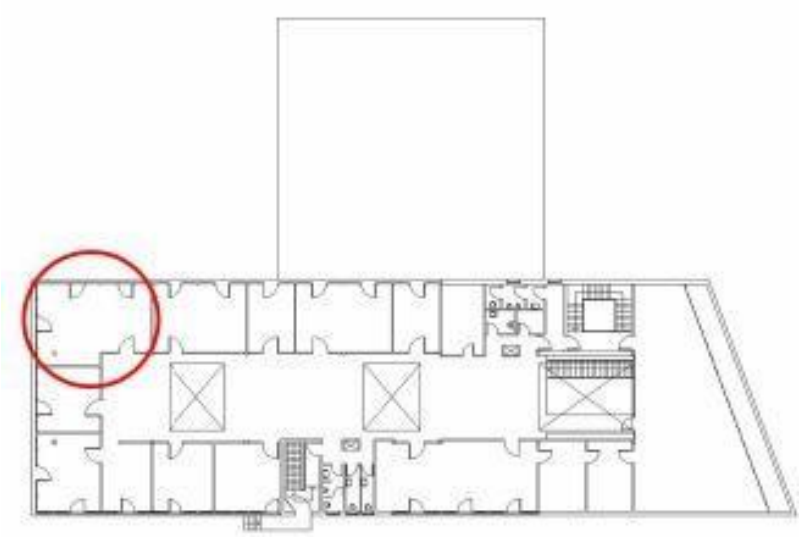


图 1



图 2

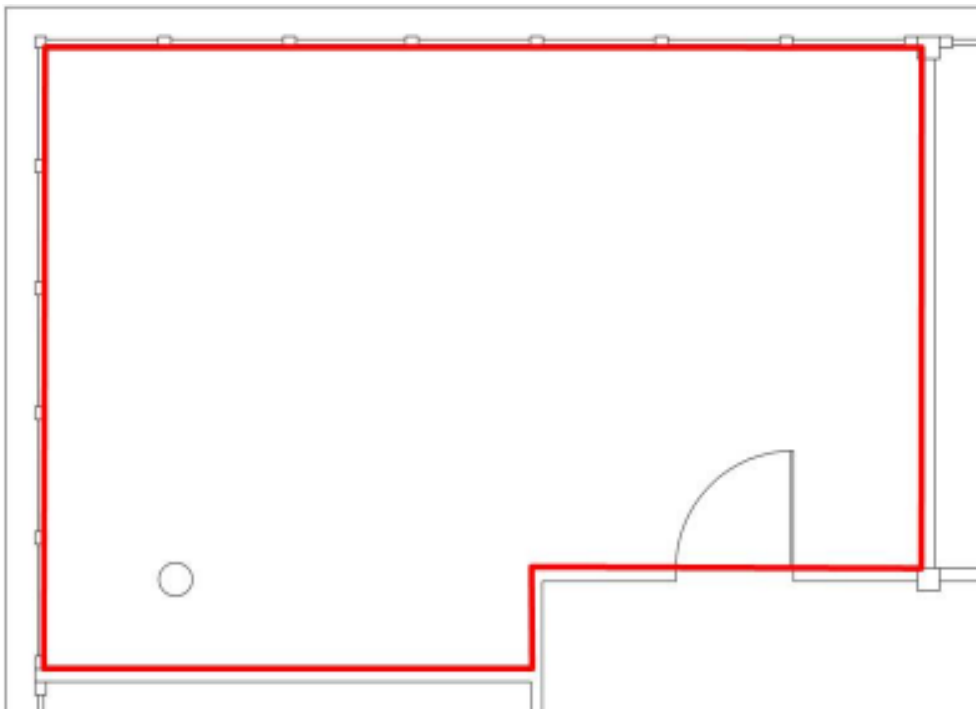


图 3

（二）增加室内空间组件

1、在入门的区域加建一块天花板吊顶，吊顶高度 0.2 米；；

2、在靠窗的区域加建天花横梁，横梁位置对正窗框，高度 0.2 米；

3、输入房间高度：2.8 米；

4、如图 4，CAD 所示的蓝色圆形处布置一根柱子；

5、如下图 5，给落地窗增加横向分格（使用立方体空间组件，水平放置）；

6、横条尺寸：5 厘米高，位于 80 厘米和 200 厘米的高度；

7、保存文件。

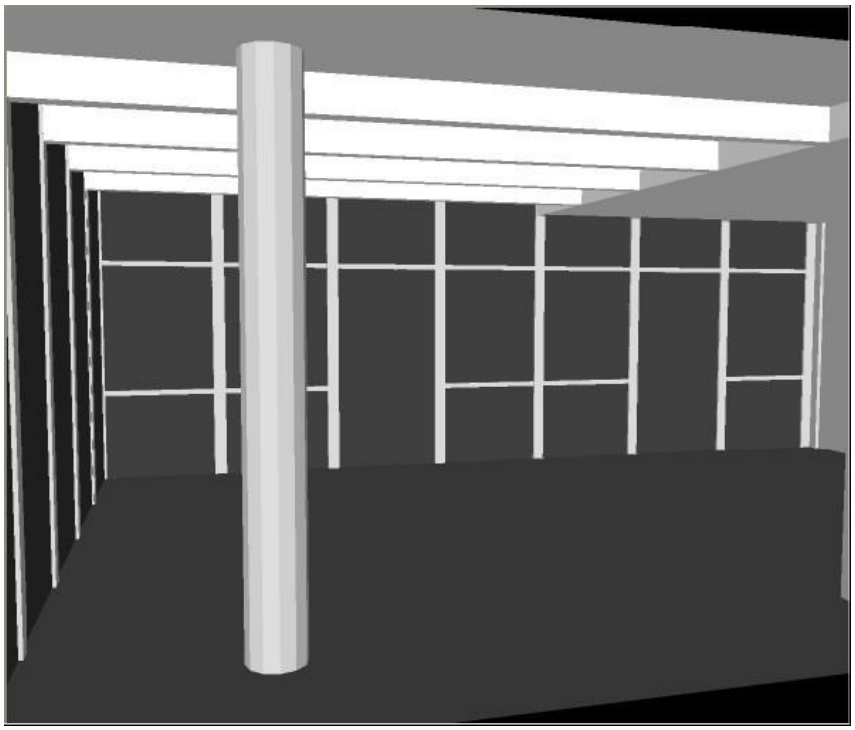


图 4

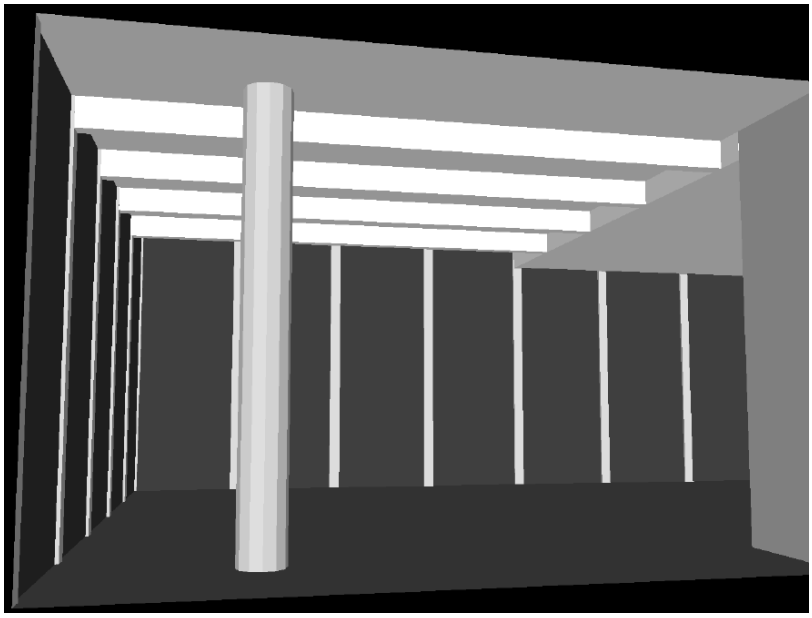


图 5

任务三　室内家具与物品

一、任务要求

室内家具与物品：在室内空间中添加家具与物品

二、任务实施

（一）在室内空间中添加家具

1、打开任务 3a 中的办公室文件，或打开“4a_室内家具与物品/Dx”文件夹中的《4a_0.dlx》；

2、按下图 6 所示，在房间内增加各个家具 ；

3、在平面图中调整书架的尺寸，并使用“沿着直线复制”功能，添加多个书架；

4、添加桌面电话、电脑时，直接将物品拖放至所需的桌面，物品会自动捕捉放置在表面；

5、保存文件为“任务 4a.dlx”；



图 6

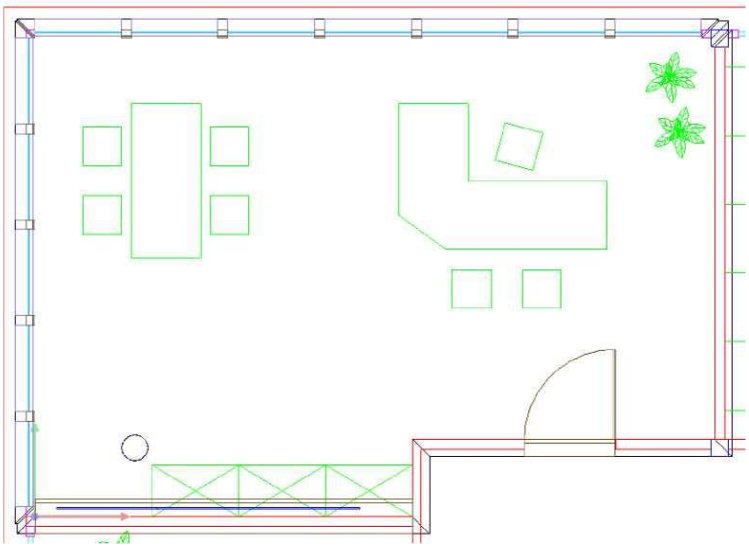


图 7

在室内空间中添加物品：在书架上天花板上制作一个吊顶灯槽

1、灯槽长度：与书架处墙身宽度相同（4.35m），

2、灯槽尺寸：宽 0.2m，高 0.2m，前沿挡板高 0.1m，板厚 0.04m；

3、操作方法

方法 1：使用“空间组件”“平面天花板”，建立底板、挡板。

方法 2：使用“标准组件”“立方体”，利用“去除”功能，切掉内部空间及前方开口。

方法 3：使用“标准组件”“挤压体”，直接绘制灯槽剖面、定义高度，再旋转到位。

4、将方法 2 的底板、挡板一并选中（利用 shift）,使用“合并”功能，将其合并为一个家具;

5、在选项卡中调整“原点”设置，以便日后使用（建议将原点设置于最顶部）;

6、使用“导出今保存对象”，将家具保存为 sat 格式的文件；

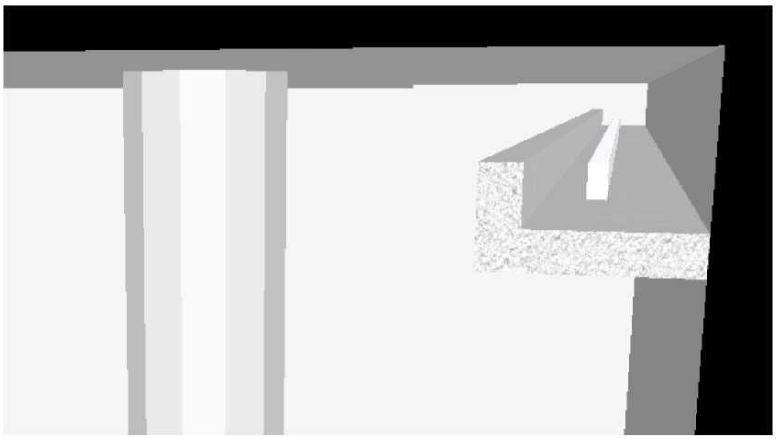


图 8

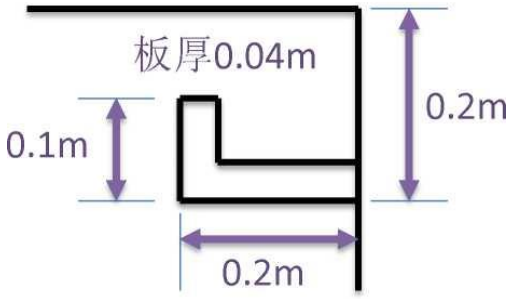


图 9

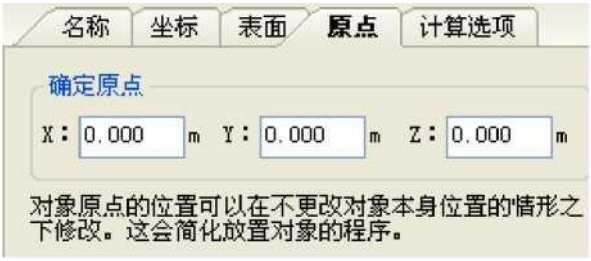


图 10

任务四　颜色与材质

一、任务要求

室内颜色与材质

二、任务实施

（一）室内房间墙面、家具赋予材质

1、打开任务 4a 中的办公室文件，或打开“5a_室内颜色与材质/Dx”文件夹中的《5a_0.dlx》；

2、按下图所示，为房间内各墙面、家具赋予材质；

3、拖动材质到需要赋予的表面，注：如只需赋其中一个面，请按住“Shift”键；

4、给地板赋予木质或镶嵌地板表面；

5、给墙面赋予墙纸表面，注：柱子也会跟着墙改变，可以用 SHIFT 键处理单个表面；

6、给门贴上材质，如需改变开门方向，可以在表面属性里修改材质属性为镜像的；

7、保存文件为“任务 5a.dlx”。



图 11

（二）室内房间窗户指定材质

1、菜单：文件→导入→材质，在《5a_室内颜色与材质\Pictures Participant》文件夹找到窗的材质“window_fixed.jpg”和“window_to_open.jpg” ，

按下图贴上窗玻璃；

2、调整材质的尺寸与方向，与窗的大小相同。

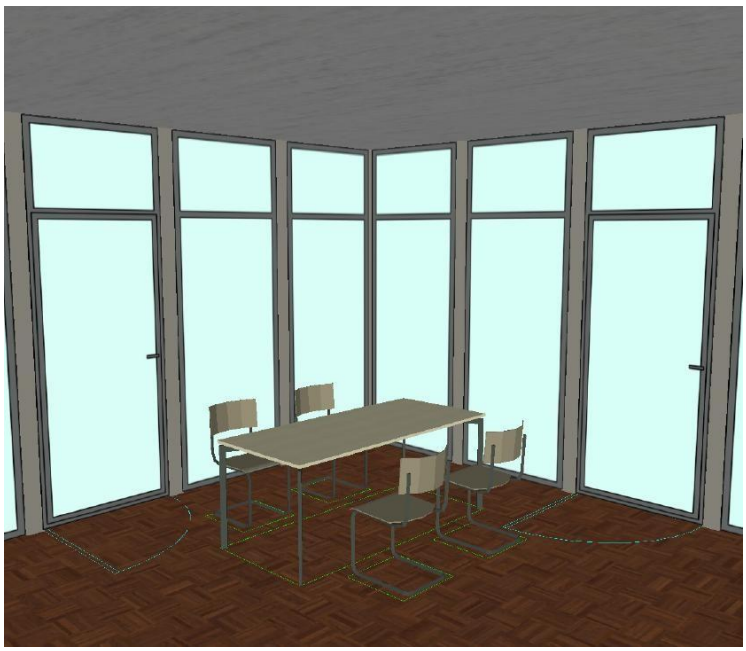


图 12

（三）制作画板并贴画

1、用立方体组件，制作一块画板，尺寸自定；

2、将画板移至墙面合适的位置；

3、菜单：文件→导入→材质，在《5a_室内颜色与材质\Pictures Participant》文件夹找到油画，按下图贴上画板【注意使用 SHIFT 键】;

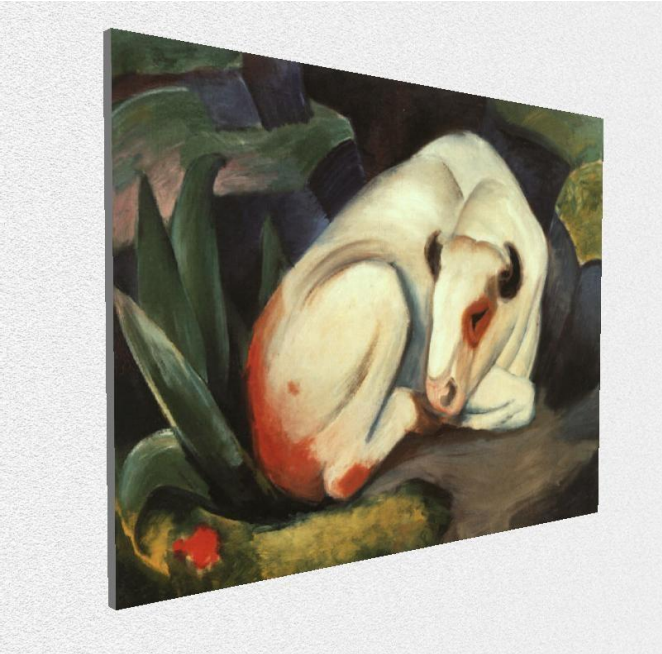


图 13

4、调整材质的尺寸与方向，与画板的大小相同；
5、同样，可以在办公桌的电脑显示屏上，贴你喜欢的图案【注意旋转角度、尺寸】。
6、用“去除”功能，布尔运算制作如图所示的画框，尺寸自定；
7、调整材质的尺寸与方向，可以调整纹理的方向。

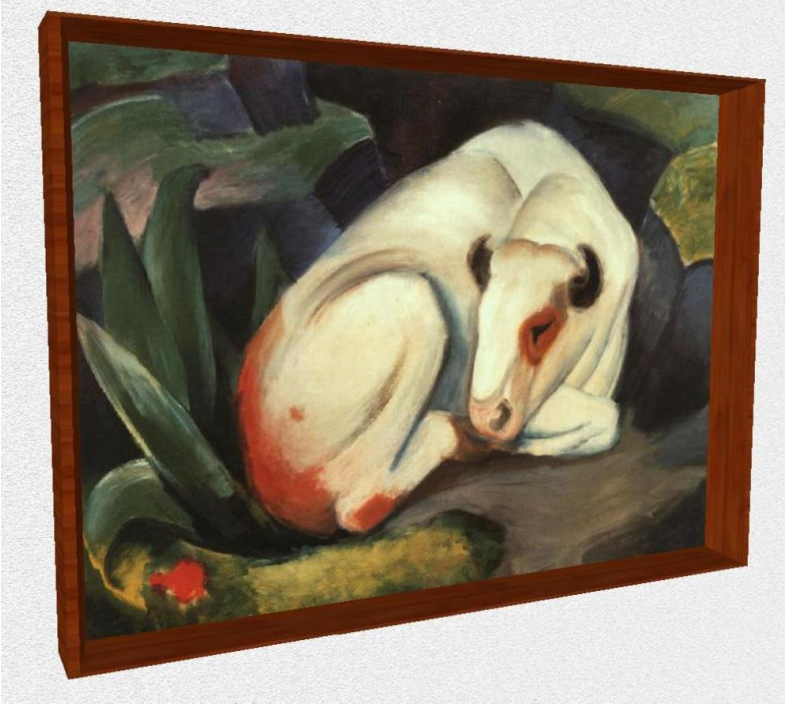


图 14

任务五　灯具选择与放置

一、任务要求

室内灯具选择与放置

二、任务实施

（一）在室内空间中选择灯具

1、打开任务 5a 中的办公室文件，或打开“Dx”文件夹中的《6a_0.dlx》；

2、按下图所示，为房间布置不同的灯具；

3、“单一灯具”布置办公桌和会议桌灯盘，并旋转摆放方向；

4、“单一灯具”布置白板射灯，右击灯具→照射点→按 C0-G0 排列，设置灯具的照射点；

5、“直线排列”布置窗边射灯和书架射灯， 在“旋转角度”中设置整排灯具的照射方向；

6、“单一灯具”和“沿着线复制”布置侧墙及植物射灯，逐个设置灯具照射点；【注：有些厂家插件的灯具可使用“可转动灯具部分”选项】

7、保存文件为“任务 6a.dlx”。



图 15

（二）学习区域排列和圆形排列

1、按下图所示，为房间布置不同的灯具；

2、“直线排列”布置照明讲台的射灯；【注意：在立面图中调整灯具高度】

3、“直线排列”布置照明黑板的洗墙灯，在“旋转角度”中设置整排灯具的照射方向；

4、“区域排列”布置学生座位上空的悬吊灯盘，在“旋转角度”中设置整排灯具的旋转方向， 以及每个灯具的旋转方向；【注意：在侧视图中检查角度的旋转是否正确】

5、“圆形排列”布置讲台前方的两个扇形排列射灯；【注意：起、止角度的设置】

6、保存文件。

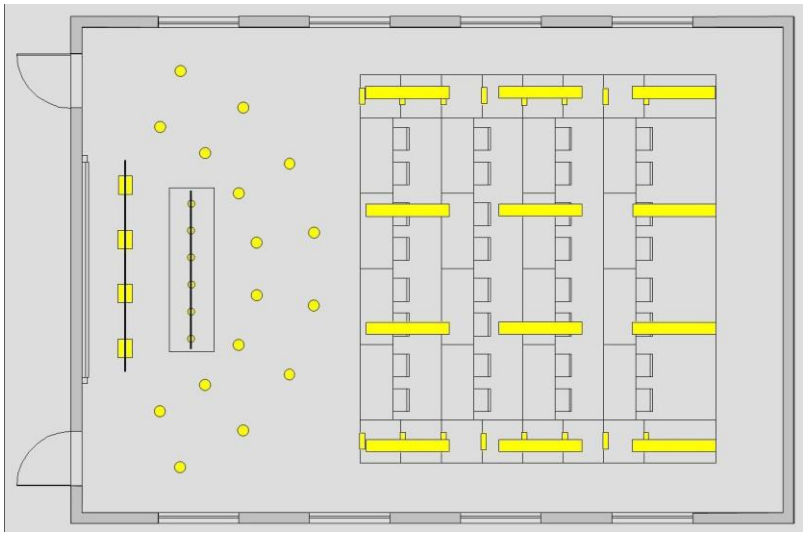


图 16



图 17

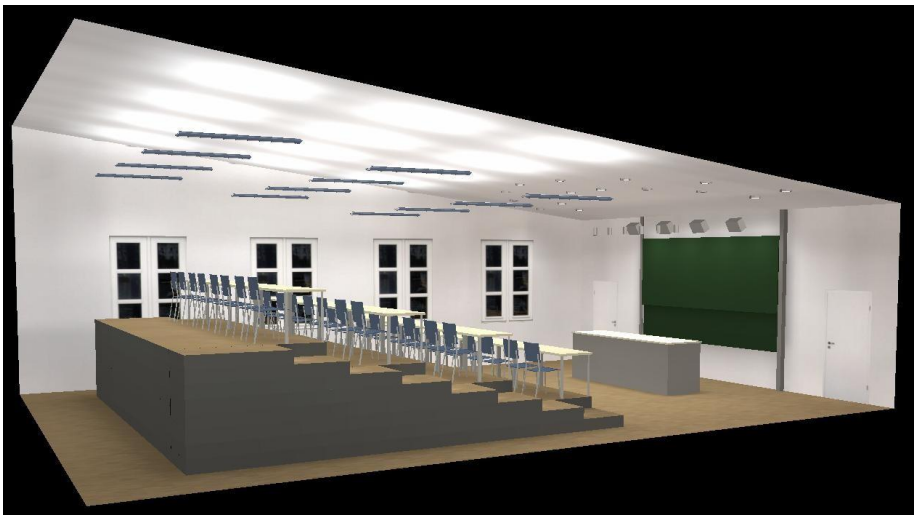


图 18

任务六　灯光场景

一、任务要求

室内灯光场景

二、任务实施

（一）在室内空间中选择灯光

1、打开 6a 中完成灯具布置的存盘文件，或打开“Dx”文件夹中《8a_0.dlx》；

2、各组灯具分配到各个控制群；【注意：一个灯不要进两个控制群。】

控制群 1：窗

控制群 2：白板

控制群 3：书架

控制群 4：壁柜

控制群 5：植物

控制群 6：办公桌

控制群 7：会议桌

3、创建三个灯光场景：工作、会议、休闲；各场景中控制群的调光“模糊值”如下：

工作场景		会议场景		休闲场景	
窗	100%	窗	100%	窗	80%
白板	0	白板	80%	白板	0
书架	100%	书架	50%	书架	80%
壁柜	50%	壁柜	50%	壁柜	80%
植物	80%	植物	0	植物	40%
办公桌	80%	办公桌	10%	办公桌	0
会议桌	30%	会议桌	50%	会议桌	0

计算，查看各场 4、计算，查看各场景效果；

5、保存文件。



图 19

（二）阶梯教室灯光场景

1、打开“Dx”文件夹中的《8a_Z1_0.dlx》；

2、各组灯具分配到各个控制群；【注意：一个灯不要进两个控制群。】

控制群 1：靠左窗一列吊灯

控制群 2：靠右窗一列吊灯

控制群 3：中间两列吊灯

控制群 4：台阶灯

控制群 5：讲台射灯

控制群 6：黑板灯

控制群 7：内圈射灯

控制群 8：外圈射灯

创建三个灯光场景：工作、会议、休闲；各场景中控制群的调光“模糊值”如下：

投影场景		**讲课场景**		**欢迎场景**	
左窗吊灯	10%	左窗吊灯	80%	左窗吊灯	80%
右窗吊灯	10%	右窗吊灯	80%	右窗吊灯	80%
中间吊灯	10%	中间吊灯	80%	中间吊灯	0
台阶灯	100%	台阶灯	0	台阶灯	100%
讲台射灯	0	讲台射灯	80%	讲台射灯	60%
黑板灯	0	黑板灯	100%	黑板灯	0
内圈射灯	0	内圈射灯	0	内圈射灯	60%
外圈射灯	50%	外圈射灯	0	外圈射灯	60%

4、计算，查看各场景效果；

5、保存文件。



图 20

任务七　引入日光及计算结果输出

一、任务要求

引入日光及计算、打印输出

二、任务实施

（一）在室内空间中选择灯光

1、打开 8a 额外任务已完成的《8a_Z1_0.dlx》;

2、各组灯具已分配到各个控制群;

控制群 1：靠左窗一列吊灯

控制群 2：靠右窗一列吊灯

控制群 3：中间两列吊灯

控制群 4：台阶灯

控制群 5：讲台射灯

控制群 6：黑板灯

控制群 7：内圈射灯

控制群 8：外圈射灯

3、新建灯光场景：白天讲课;【注意："白昼光因子"的设置：勾上"顾及日光"，去掉"自然光比率"】



图 21

4、设置地点、北向、时间等;

5、场景中个控制群的调光"模糊值"自行设置，达到照明效果的同时，兼顾节能;

6、计算，查看各场景效果与照度;

7、保存文件。



图 22

（二）会议室日光场景

1、打开“Dx”文件夹中的《9_0.dlx》;；

2、新建灯光场景：日光场景——只看日光，不考虑灯光。【“白昼光因子”的设置：勾上“顾及日光”，勾上“自然光比率”】



图 23

3、设置地点、北向、时间等；

4、计算，查看各场景效果；

5、保存文件。

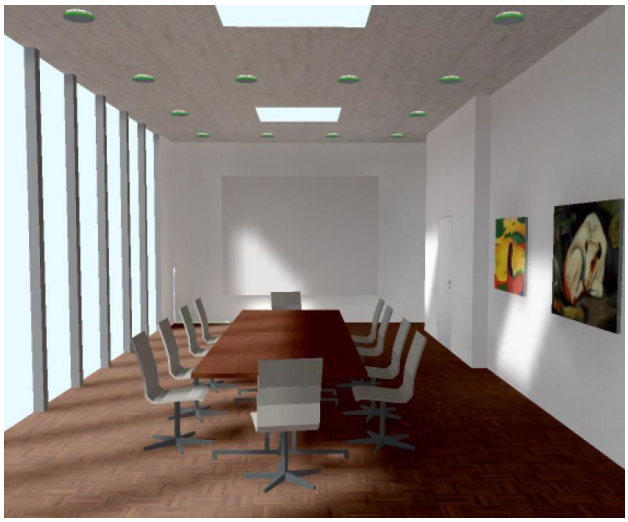


图 24

【项目小结】

本项目介绍了室内照明设计的分类及照明设计趋势等，同时通过利用 DIALux 软件进行室内空间照明设计，完成了室内空间建模、室内家具与物品置入，室内颜色与材质设置，室内灯具选择与放置，灯光场景设定，引入日光，并输出计算结果。

思考与练习九

1、简述观演空间光环境的实施策略。
2、简述功能性人工照明设计的主要任务。
3、简述室内光环境设计的依据。
4、简述室内照明设计中灯具选择的依据。
5、简述室内光环境设计的未来趋势。
6、简述氛围性人工照明设计的主要任务。
7、在同样的光照条件下，简述影响人眼对环境中亮度的感知的因素。
8、简述灯具控制光线的原理和方式。
9、简述漫射照明特点及方式。
10、论述住宅中常用的灯具类型及其特点和适用范围。
11、论述自然光设计的意义。

项目七　照明产品设计案例

【知识目标】

1、了解国内外著名品牌照明产品；

2、掌握 LED 工作台灯专题案例；

【技能目标】

1、能查找收集国内外著名品牌照明产品；

2、会用三维模型软件设计 LED 工作台灯。

【任务导入与项目分析】

人类从来都不会放弃对光明的追求，灯就是光明的使者。原始人类钻木取火，松木为灯，现代社会，科技飞速发展，人类的光明事业变得更加的多姿多彩。黑夜里，灯是曼妙的精灵，透过丰富的光影层次，带给我们无限的甜美与温馨；白天，灯具又幻化为装点空间的神奇画笔，或端庄，或活泼，装扮着我们五彩缤纷的生活。



图 8-1　意大利知名灯饰品牌 FLOS 的灯具设计

任务一　国内外著名品牌照明产品

国际上有许多擅长于做设计研发的灯具品牌，时尚之都意大利就聚集着 flos、artemide、foscarini 等国际知名灯具品牌。

Artemide

被称为灯王的意大利灯具品牌 Artemide 成立于 1960 年，是全球最大的灯具生产厂商之一。Artemide 的灯具多呈现出极简主义的特点，关注人们在生活中和光接触的每个细节，提倡“自由”是生命的核心价值，而“设计”则是展现

独立个体自由度的最佳工具。Artemide 将自己的产品及品牌概念形象的描绘为：“人类之光”(HUMAN LIGHT)，富有智慧的光，它可以在人们的日常生活中与人们和谐沟通，这也是 Artemide 的核心设计理念。

在近 60 年的时间里，Artemide 生产的灯具享誉世界，代表作品包括：Tizio（提斯尤）、Tolomeo（托洛梅奥）、Melampo（梅兰珀）、Logico（罗西克）等。

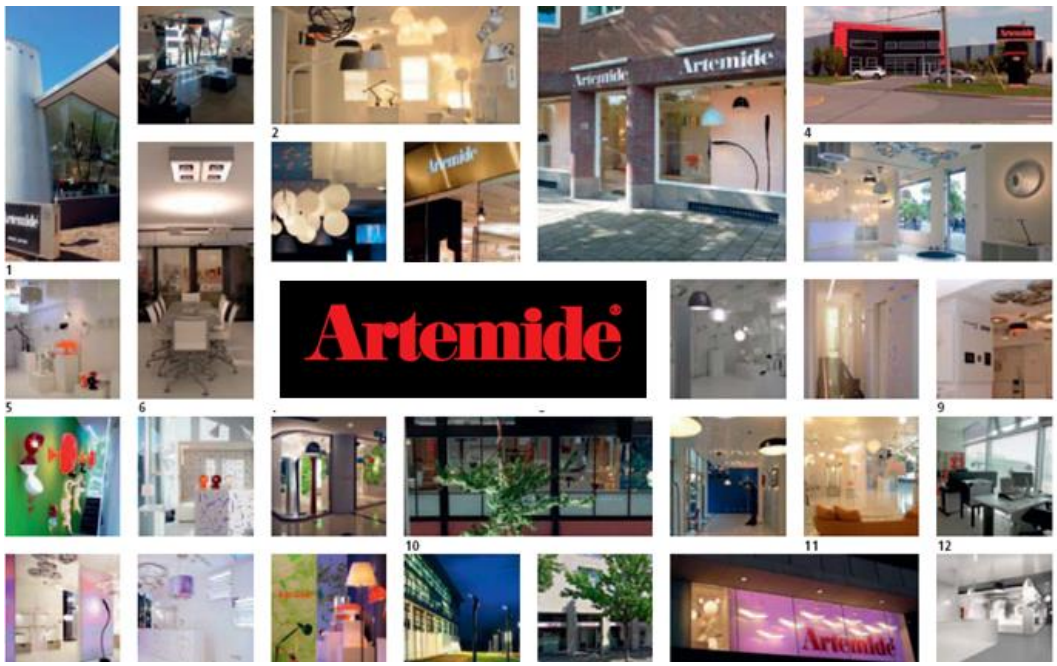


图 8-2 Artemide 网站首页



图 8-3　Tizio 台灯，设计师：Richard Sapper （里查德•萨帕 ）

Richard Sapper 设计的 Tizio 台灯获得 1979 年的“金圆规”设计大奖，同时也获得纽约现代艺术博物馆的永久收藏。

“在我工作或阅读时，希望光线只投射在面前的书页上，而四周仍保持着幽静和朦胧”，这是设计师设计 Tizio 的初衷，也正是这一构思引导他设计出这款闻名世界的双臂台灯。平衡力学的巧妙运用，使得 Tizio 呈现出多角度的平衡美感。

在它诞生将近 40 年后的今天，Tizio 仍然是“意大利制造”的崇拜物。Tizio 除了具有丰富的象征意义外（有人觉得它象一些水鸟，有人觉得它是一个微型油泵），它的非凡功能也让人惊叹。它有四种运动的可能性：底座平行的转动，第一和第二接头处的垂直转动，灯罩的垂直转动。在任何地方，Tizio 因有一个衡重系统而能永远保持平衡。铝材部件和连接活塞也是导电器，能够通过放在圆柱体底座中的变压器为节能的卤素小灯泡供电，这样就无需任何电线。

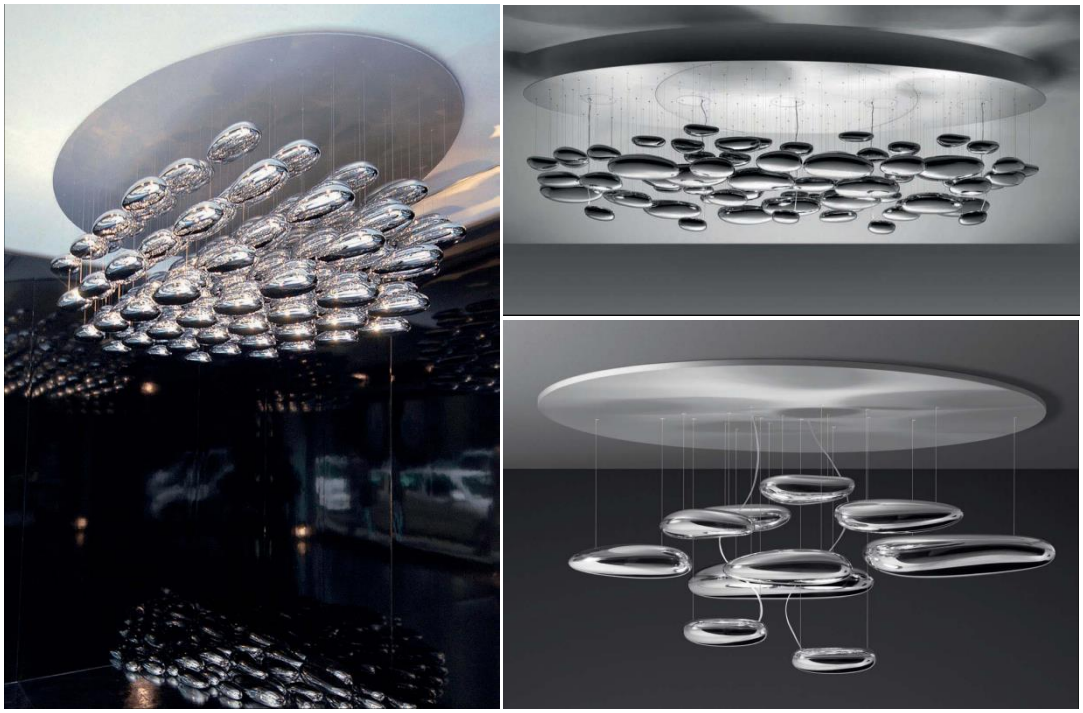


图 8-4　Mercury 吊灯

Ross Lovegrove 设计，于 2008 年米兰设计展发表的新品。透过静态的设计，呈现出流动的有机形态，现代感的铝盘似衍生出鹅卵石般大小的水银珠滴，波光流转的浮动于空中，有魔术般的错觉。表现创作一年高瞻远瞩，是非常未来感的一盏灯，再次展现大师擅长有机形态的功力，以轻量、最少材质制作。整盏灯不让人感到生硬冰冷，反而更有生命力，非常适合极简内敛、低调奢华的空间。

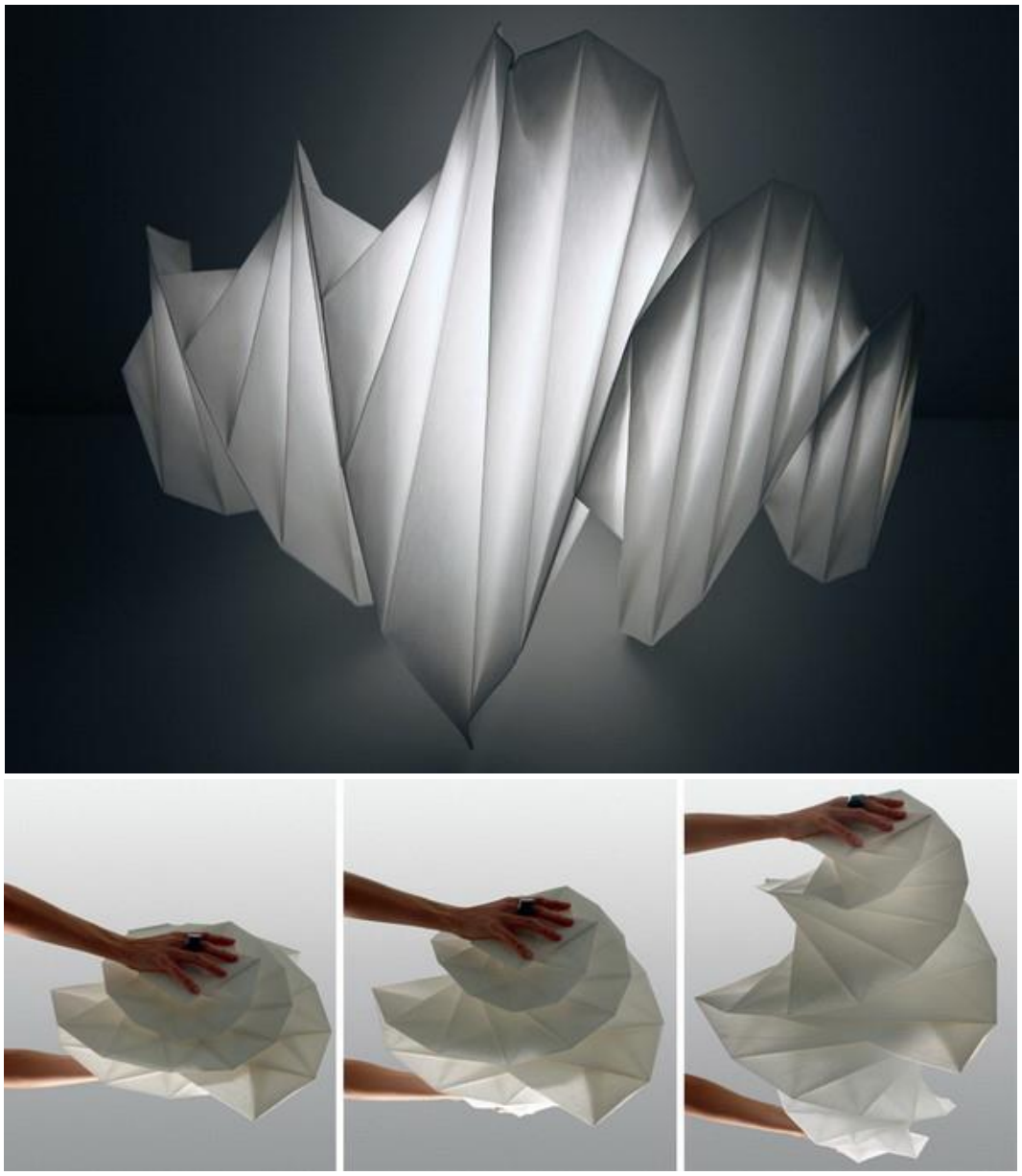


图 8-5　“in-ei”灯具　日本著名时装设计师三宅一生设计



图 8-7 Artemide 旗下设计大师群

日本著名时装设计师三宅一生为意大利灯具品牌 artemide 设计的“in-ei”灯具在 2012 年米兰设计周上展出。这是一款可折叠的灯具，设计师运用了可持续的设计理念。灯具是用特殊的织物材料制作，这些材料是利用可回收利用的 PET 瓶制造的，能有效的节省能源，不仅如此，还可以将碳排放量降低到 80%。

在日语中“in-ei”的意思是“阴影”、“遮蔽”和“细微变化”的意思，这款灯具使用折叠的手法，用 2D 和 3D 的数学原理来确定灯罩的形态和光影范围，展开后就形成了一个大灯罩，通过丰富的层次变化形成有趣的光影效果。

Artemide 旗下拥有众多大师级的设计师，他们把灯具当成空间气氛转换的神奇开关，将纯粹的照明功能巧妙地转化为装饰的主角，进而创造出缤纷而多变的造型。

Ross Lovegrove（洛斯·拉古路夫），当代最著名和最具想象力的设计师之一，原德国青蛙设计公司设计师，曾担任路易威登、杜邦等品牌的设计顾问，空中客车、法国标致和奥林巴斯等知名公司均为其客户。

Ross Lovegrove 的设计灵感来自自然界及未来主义，其作品以揉合自然美态与超新科技的有机设计享负盛名。他充满未来感的产品设计，带动了有机美学的新潮流。流动的线条、耀目的色彩、尖端科技的质料，是 Lovegrove 产品的独特商标，他善于透过新颖的材质和新科技，在形态(form)、材质(materials)和技术(technology)上达到“自然”的平衡。他主张“有机本质(organic essentialism)”的概念，而这种美学和组成元素，也都是源于大自

然并再创造出带有未来科技风格的产品形态。目前，他的作品被美国纽约现代艺术博物馆、巴黎蓬披杜中心和巴黎设计博物馆等收藏。

Artemide 除了公司内部的设计师，还邀约时下知名的建筑、室内、装置设计大师以及艺术大咖进行跨界合作。



图 8-8 建筑设计大师：扎哈 哈迪德和她设计的灯具



图 1-9　Artemide 的灯具生产过程细节

FLOS

1962 年成立的 FLOS 以其特立独行的设计风格，深受人们的喜爱，其灯具行业的领导地位也一直为人惊叹。FLOS 主要生产现代风格的装饰灯具以及商业照明灯具。该公司建立初始时出品的灯具现在已经成为意大利灯具制造业的经典之作，这些作品包括 Achille Castiglioni 等大牌设计师设计的 Arco、Relemme、Toio 以及 Taccia 系列，至今这些系列仍在批量生产，这也证明了其完美的设计研发能力与制造工艺。FLOS 不断的延续自己的传统，并将其融入新产品的设计制造中，使得 Flos 灯具成为时尚设计与一流加工技术的代名词。该公司产品的超群之处在于其典雅的造型与优美的线条，在它的外观造型上可以看到现代风格与古典风格的融合。FLOS 的许多产品已经成为时尚与经典的典范，因此业界也将 Flos 的设计风格称为“贵族式风格”。

FLOS 的创立者 Arturo Eisenkei 并不是一位设计师的，而是一位灯具制造商。他在当时获得一项在塑料表面喷雾的新技术，于是与设计界著名的 Castiglioni 兄弟档设计师合作创立了 FLOS。

Castiglioni 兄弟档成了 FLOS 早年的当家设计师，抛物线造形的“ARCO”灯是 FLOS 于 1962 年生产的第一批灯具，由当家设计师 Castiglioni 兄弟设计。Achille Castiglioni 1918 年出生于米兰，学建筑出身，同样跨界建筑和产品两大设计领域，所以从他的很多家居产品设计上都能看到建筑观念的影子。Achille Castiglioni 曾经服务过的 ALESSI、FLOS、MOROSO 等家居制造商现在已经成为世界最为顶级的生产制造商，Achille Castiglioni 是陪伴着这些品牌成长起来的。Achille Castiglioni 的设计已经生产销售了几十年，成为经典。



图 8-10 设计大师 Achille

ARCO 灯（抛物线灯）是 FLOS 的经典之作。专为古迹建筑特别设计的 ARCO 在设计之初是为了代替餐厅吊灯。因为意大利有许多建筑都是古迹，屋主不能随意在墙壁或天花板上打洞装灯，于是 Castiglioni 设法让立灯“变高变大”，让灯身变成抛物线状，拉高立灯高度达 2.5 公尺，为稳固重心，大理石底盘基座总重量达 65 公斤。65 公斤的灯具，那一定很难移动吧？若这么想就错了，ARCO 设计的巧思就在此，其基座上有个小洞，刚好是整座灯具的平衡点，只要插入扫把或木条，两个人就可以轻松搬动灯具。



图 8-11　抛物线造形的“ARCO”灯



图 8-12 著名的 SNOOPY 台灯，Castiglioni 设计

Castiglioni1960 年为 Heisenkeil，Flos 设计了蚕茧吊灯系列。这些灯具最初源于设计师探索出来的一个专利材料，当时属于 Merano 的 Heisenkell 公司，后来经过 FLOS 公司的发展，研发出一种塑料制成的合成纤维替代材料。

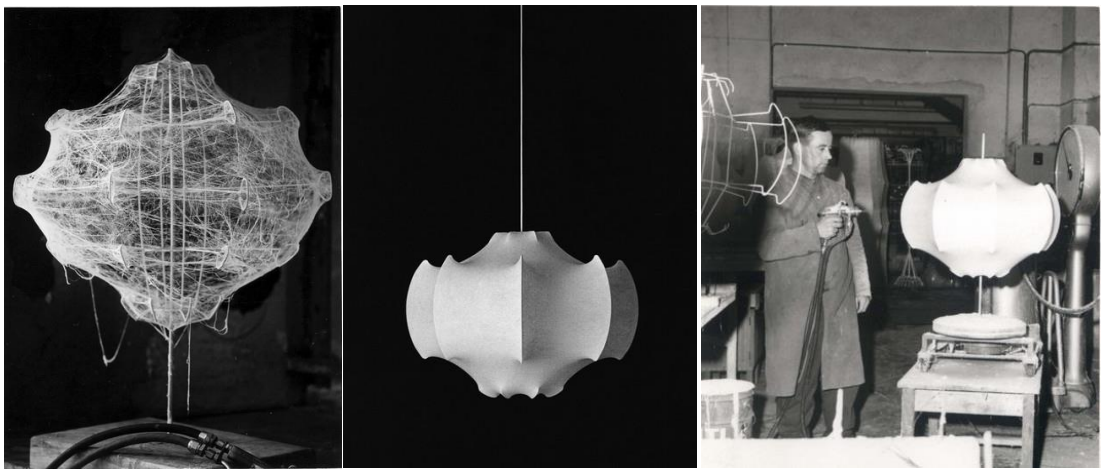


图 8-13 著名的蚕茧系列吊灯，Castiglioni 设计

FLOS 能在国际持续走红的原因，与它能持续网罗才华洋溢的设计师有关。1988 年，法国有鬼才设计师之称的 Philippe Stark 加入 FLOS，从第一支灯 Ará（牛角灯）到之后 ROSY ANGELIS（布丁灯）、Gun（枪灯）等，都获得了市场的好评。 Philippe Stark 是一个非凡的传奇人物，集流行明星、疯狂的发明家、浪漫的哲人于一身，或许算得上世界上最负盛名的设计师。他的作品随处可见：从纽约别致的旅馆到 FF4900 邮购商行，从法国总统的私人住宅到欧洲最大的废物处理中心，从全球各地的咖啡馆到家庭中价值数十万的座椅和灯具，甚至包括浴室中的牙刷。用色大胆的荷兰设计师 Marcel Wanders 以及设计师 Marc Newson 等陆续为 FLOS 创造出不少灯具，让 FLOS 能一直保持在灯界的领导地位。



图 8-14　Philippe Stark 设计的灯具

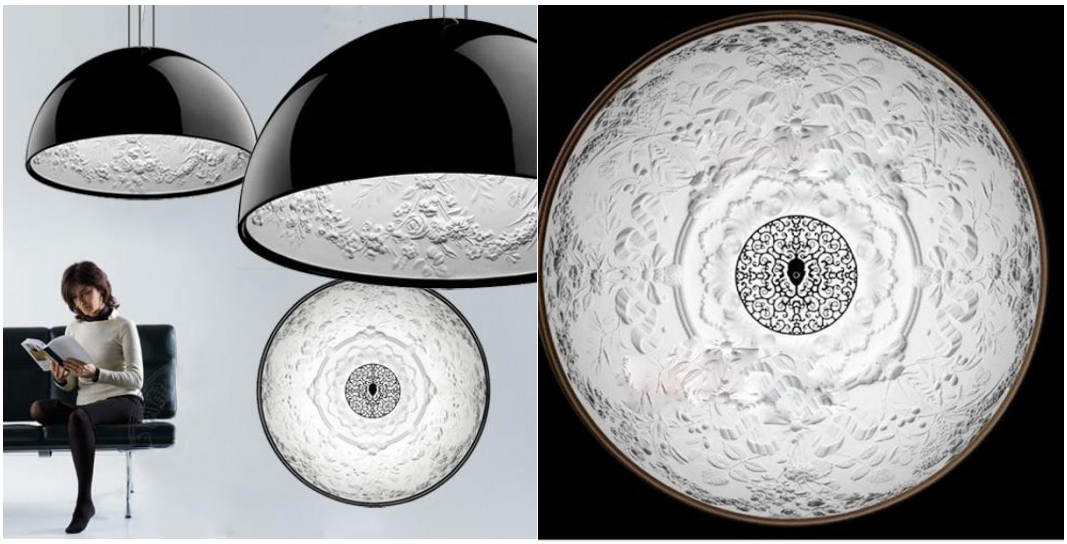


图 8-15　Sky garden 吊灯，Marcel Wanders 设计，Sky garden 吊灯的灵感来自于设计师 Marcel Wanders 的旧家，现代感十足的 Skygarden 吊灯内有石膏浮雕装饰，完美地融合了传统装饰与现代设计



图 8-16　FLOS 的经典灯具设计

Moooi

moooi 的名字来自于荷兰语的“美丽”（mooi），多加了一个字母“o”，意思是再多加一分美丽。最初创办 Moooi 的目的，是为富有创造力的设计师们提供一个具有逻辑性思考的地点，因为工业设计的作品必须经过制造商的技术协调与磨练，才能真正变成可生产的产品，所以，在设计师与制造商之间就需要做非常细致的沟通。于是，“moooi”这样一个探索个别设计与大量制造产品的实验所就应运而生。经过多年的发展，Moooi 品牌已经不仅仅是一个家居用品生产商，它已经成为一种风格的代表，引领着最具创造性的流行时尚。

“我们都是独立的，我们又是一个大家庭。”这是 Moooi 设计师的经典格言。Moooi 的每一位设计师，一直坚持着这种理念，通过个性的创造与世界进行不断的沟通和对话。在 moooi 的设计中，人始终是核心因素，设计师渴望在功能性之外，创造艺术氛围。人的性格、品位、喜好和感情，都完美地展现在每一件产品中。选择不同的产品，可以展示出每一个人内心的不同侧面，每一种选择都是一个全新的自己。不管何时，它都有自己的主张，让使用的人除了享受它的功能性之外，也同时在消费一个观念，一种艺术。

灯光是营造家居气氛的魔术师，也是室内最具魅力的调情师，不同的灯，营造着不同的氛围，却能带来同样的浪漫。一个温馨惬意的家，来源于自身的品味和修养以及对生活的悟性与追求。把握和了解灯具的时效性、代表性的细节处理方式，moooi 的灯具能从各方面满足高雅情调生活的需求。



图 8-17　Raimond lamp，设计师：Raimond Puts　一个由数学模型组成的完美球体，微小的 LED 光源散发出如繁星闪烁般的柔和的光芒

moooi 的创办人是马塞尔·万德斯 (Marcel Wanders)。



图 8-18　设计师马塞尔·万德斯

马塞尔·万德斯 1963 年出生于荷兰，原本为艺术背景，1995 年决定成为一名工业设计师。1996 年 Marcel Wanders 因为为 Drog Design 设计的作品"Knotted Chair"开始为人们所熟识。

马塞尔·万德斯 (Marcel Wanders) 的设计其实不算“创新”，他不会设计出一个你完全看不懂的怪物。他比喻自己的设计风格是将“设计原型”为蓝图，在原型上变化出惊喜，产生让人会心一笑的 X 元素。马塞尔·万德斯的设计实用、漂亮且风格多变，多次获得国际设计奖项，并在纽约现代艺术博物馆等各大设计展会上频频亮相。

这个在自己的网站说“设计已死”(design is dead) 的设计大明星说：“所有该设计的东西已经设计出来了，当今的设计师很难变出个全新的东西来。我认为最近新的设计就只有 iPod 了。况且新的东西有什么好？设计师最重要是要设计出人们能认同，能跟人们沟通的东西来。”

“我要从你们的头脑中盗窃你潜在的意识，为你编织出一个故事、幻想，就因为我使用的是你们已经认得的东西，所以你们的反应将更强烈！”





图 8-19　马塞尔·万德斯设计的灯具



图 8-20　灯具 Heracleum the Big O，设计师：by Bertjan Pot



图 8-21　灯具 Prop Light Round，设计师：Bertjan Pot



图 8-22　灯具 Paper Patchwork，设计师：Studio Job

Qis Design

来自台湾，隶属于明基友达集团旗下的生活设计品牌 QisDesign，自 2009 年诞生以来仅用短短的几年时间，相继推出一系列跨界整合尖端科技与美学设计、令人目眩神迷的 LED 精品灯饰，不仅席卷 45 项各类国际设计大奖，更以华人品牌身份首度受邀参加法国巴黎家饰展、德国法兰克福灯饰展等重大国际展会，也让称霸灯饰业界多年的欧洲品牌俯首称臣。

Qis Design 结合尖端科技与美学设计，融合理性与感性，QisDesign 用想象力创造新的可能性，打破传统的界线，响应消费者内心深处对于美好生活的渴望，为消费者带来惊喜无限的感官盛宴。

Qis Design 来自设计各领域的菁英，由消费者研究、人机界面设计、机构材质研究、工业设计、视觉设计及模型制作等团队所组成。优异的产品设计实力，已获得多项国际设计大奖的肯定，包含德国 Red Dot、德国 iF 及日本 Good Design Award。



图 8-23　Coral 恋滟



图 8-24　The Crystal Light 晶艳

Coral（恋滟），设计灵感来自于海中珊瑚，由一朵朵如花绽放的单元体组

成，LED 光由花心透向花瓣边，营造坡光摇曳的梦幻光影。特殊导光设计，将 LED 光导像花瓣边缘，魔幻光影是传统灯泡无法做到的。荣获德国 red dot、日本 G-Mark 多项设计大奖。

The Crystal Light（晶艳），设净灵感来自于矿石结晶，每一单元体有正六边形的钻切构面，绽放如钻石般光芒。结合 LED 低温多彩和磁力相吸原理，让用户可自由串接堆栈灯体，如乐高积木般有趣。遥控器控制两种灯效模式：彩虹模式与单彩模式。该荣获德国 red dot 设计大奖。



图 8-25 BE Light

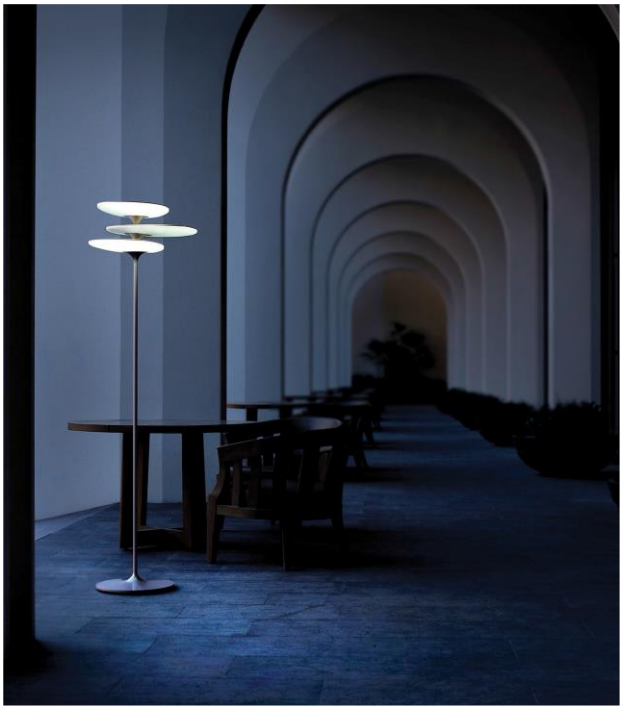


图 8-26 Coral Reef 环礁

BE Light 的设计灵感来自于折纸艺术，将 2D 转化为 3D 立体的工艺设计。可回收铝为材质，银色款金属发丝处理，黑色款雾面喷漆处理，防刮抗锈环保。桌灯款荣获德国 red dot、iF、日本 G-Mark 设计大奖。立灯款荣获德国 iF 设计大奖。

Coral Reef 环礁，设计灵感来自于海洋中层层迭迭的珊瑚环礁，打造 LED 均匀柔光环片。桌灯款金属质感，手工打造金属脚座，呈现工艺之美。触控金属脚座可四段调亮度。立灯款左右旋转三层环片，自由选择亮灯环数。桌灯款荣获德国 red dot 设计大奖、立灯款荣获德国 red dot 与 iF 设计大奖。

Flamenca 花舞 以佛朗明哥舞裙为设计灵感，Flamenca 在璀璨花榭舞影之间，流露绚丽光彩。LED 照明结合触控科技，轻触银色触控盘即可调整光效。上下双色透明压克力与律动线条设计，创造赏心悦目视觉飨宴。

Aurelia 海月，以海月水母为设计灵感，圆润透明灯体，如海月水母悠游。LED 照明结合触控科技，桌灯款可触控切换三段调光：全亮、情境与小夜灯。吊灯款可切换开关两段式调光。

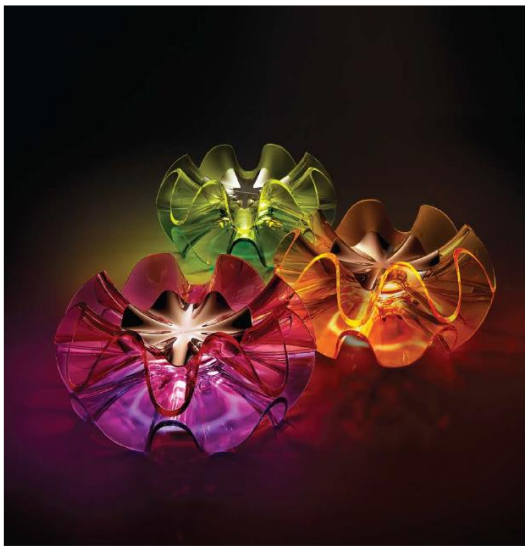


图 8-27　Flamenca 花舞



图 8-28　Aurelia 海月

任务二　LED 工作台灯专题案例

第一阶段——产品策划与定位

一 项目介绍

1.项目背景：

在设计项目设计的初期，需要详细的分析并掌握项目的背景。该项目是受广东省中山市某灯具企业委托，在规定时间内设计一款符合市场需求的 LED 工作台灯设计，要求围绕公司的企业文化及产品开发思路，符合公司的生产及制作工艺，充分运用 LED 技术，在造型时尚美观的基础上，最大化的满足工作照明需求。



8-29 LED 技术分析

2.项目产品预计上市时间

在灯具设计的初期，同企业负责人进行深入沟通后，要确定产品预计上市的时间。需要结合考虑灯具外观设计的周期，结构设计和光源设计需要的时间，以及灯具手板制作、模具设计及修改、样品生产及测试的时间，这样才能在预计的时间里有条不紊的规划设计流程，在企业要求的时间内提交设计方案。一般灯具外观设计需要 20 天，后期结构设计至样品生产确认需要 40 天，因此产品从策划到上市至少需要两个月的周期。

3.产品定位

将此次的台灯设计定位在中高端档次。适用于学生群体、热爱看书和学习的工作人士，亦可以作为礼品送给长辈或者朋友。还包括长时间使用电脑的人士，该类群体对灯具的功能要求较高，期望该类 LED 灯具对比普通的台灯能减少眼睛酸痛，提高学习的效率，并保护视力。所以学生、教师和电脑玩家应该是主要考

虑的对象范围。



8-30 消费群体分析

4.产品上市后的状态

需要预期考虑产品上市后的状态，对销售渠道有一定的认识，因此设计师需要加强与市场人员的沟通。通过分析后得知产品主要针对国内市场主要是大、中小型超市及网上销售渠道。国外市场主要通过环球资源网和阿里巴巴等渠道需找国外的经销商。

5.产品整体尺寸及基本要点

该产品的各部分参数及基本要点主要有：

底盘直径 200mm 灯头 370mm 灯杆 400mm

包装尺寸 500mm*125mm*260mm

净重 不超过 0.7KG

材料：主要材料选用 ABS、铝材、PC 导光板

（注：实际设计尺寸允许一定的出入，但不能偏差太多）

6.造型设计及要求

以人性化的设计理念作为灯具设计的出发点，一切从工作照明的角度出发考虑造型的设计。主要体现在灯杆、底盘、调节结构和开关的造型设计，可适

当添加一些辅助功能。如在灯杆正前方可设置电子触摸调光功能，并配有声音提示。灯头可以 340 度调整照明高度。可配有万年历和时间显示屏。要求整体造型时尚，局部细节设计精美、产品使用操作简单，在不影响整体外观的基础上，允许多功能、多用途，同时考虑节能与环保。

二　LED 台灯分析

1.LED 照明技术的优点

LED 工作台灯对比普通有如下优点：耗电量低、使用寿命长、高亮度、低热温、坚固耐用、环保。所以 LED 工作台灯得设计应从绿色照明的理念出发，通过科学的照明设计，采用效率高、寿命长、安全和稳定性的照明部件（电光源、灯用电器附件、灯具、配线器以及调光控制设备和控光器件），改善人们工作、学习、生活条件和质量，创造一个高效、舒适、安全、经济、有益的环境并充分体现情感需求的照明设计。LED 光源采用内嵌式面设计，有效避免眼睛和光源直视，即使是仰视一定的角度，也能有效的杜绝炫光和瞬盲，缓解眼睛疲劳。



8-31 LED 照明技术分析

2.人群定位探讨

对该 LED 台灯的消费群体在产品定位的基础上进行细分，主要有学生群体爱好阅读的成功人士、电脑玩家、选送礼物购买者、对 LED 技术了解和信任的学习者、喜欢简洁具有质感设计的人士。

3.LED 台灯风格分析

在设计初期，需对当今 LED 台灯风格的一线资料进行充分掌握，所以前期的调研工作和调研方法主要有：网上调查，从灯具电商网站上对热销产品进行归类，并对相关数据进行统计分析；从每年 4 月份和 11 月份的香港春秋两季灯饰展，每年 5 月份的中山古镇灯饰博览会等重要展会查询灯饰风格；灯饰企业家和销售人员的问卷调查；中山古镇灯饰广场专卖店的实地调研。通过调查总结，LED 台灯设计的风格主要是形态简洁、操作简单、能灵活转动、满足度角度照明需求、而且便于折叠。

4.LED 台灯设计趋势

未来 LED 台灯设计呈现简少主义的设计趋势，主要体现在将照明科技和工业设计有效的结合。在造型上极为简练，将多余的外形全部简化，剩下最简单的形态。在材料上寻求突破性的实验创新，并运用最新 LED 科技的技术发光原理，营造时尚而温馨的家居环境照明氛围。如以色列设计师 Nir-Meiri 以 LED 为光源，善于运用特殊的材料如沙砾、海藻等，这些灯具设计作品具有温馨的家居环境氛围。同时获得 2011 年 IF 奖和 2011 年台湾精品奖的灯具将灯臂和灯底座融为一体，色彩上采用大方的红色，做到了极简。



8-32 以色列设计师 Nir-Meiri 的灯具设计



8-33 未来 LED 灯具设计趋势

5.市场主流 LED 工作台灯分析

目前市场上主要有下面三款台灯受到业界的普遍关注。嫁接苹果手机造型的台灯，该台灯体现出对时尚元素的元素，将通信产品的形态语言嫁接在灯具底座和灯罩上，具备一定的时尚感，消费者反映良好。小二郎健康 LED 护眼台灯，提炼动画人物概念运用在台灯上，特别吸引儿童类的消费群体。雪莱特台灯采用灵活的转轴设计，两扇能折叠的 LED 灯片突出了设计的亮点，在市场上也是热卖的产品。所以通过整体分析，这三款产品都有自己个性化的造型语言，在功能照明上各具特色，视觉上通过金属和塑料的搭配体现出时尚感。



8-34 市场主流 led 灯具

三 设计方法及造型设计分析

该分析过程主要集中在台灯设计方法造型元素上，通过收集近 20 年来国内外著名的台灯设计作品，然后从造型元素、色彩工艺、结构设计、材料设计及设计方法上进行整体分析，分析结果对 LED 台灯设计起到指导性作用。

1.造型风格分析

台灯的造型风格和语言受到多方面的制约或影响，如灯具功能、结构材料、消费文化和地域文化、人机工程学等。在造型特色具有代表性的有：英国工业设计师 Ross Lovegrove 的台灯设计作品运用有机美学形态，充满未来感，因该设计师以揉合、自然美态和超新科技的有机设计享负盛名；意大利设计师奇特里奥的台灯设计则体现出简单而纯粹的几何线条；另外根据鸭子形态而来的台灯具有灵活的转动部件则体现出仿生形态设计语言。



8-35 LED 台灯造型风格分析

2.色彩工艺分析

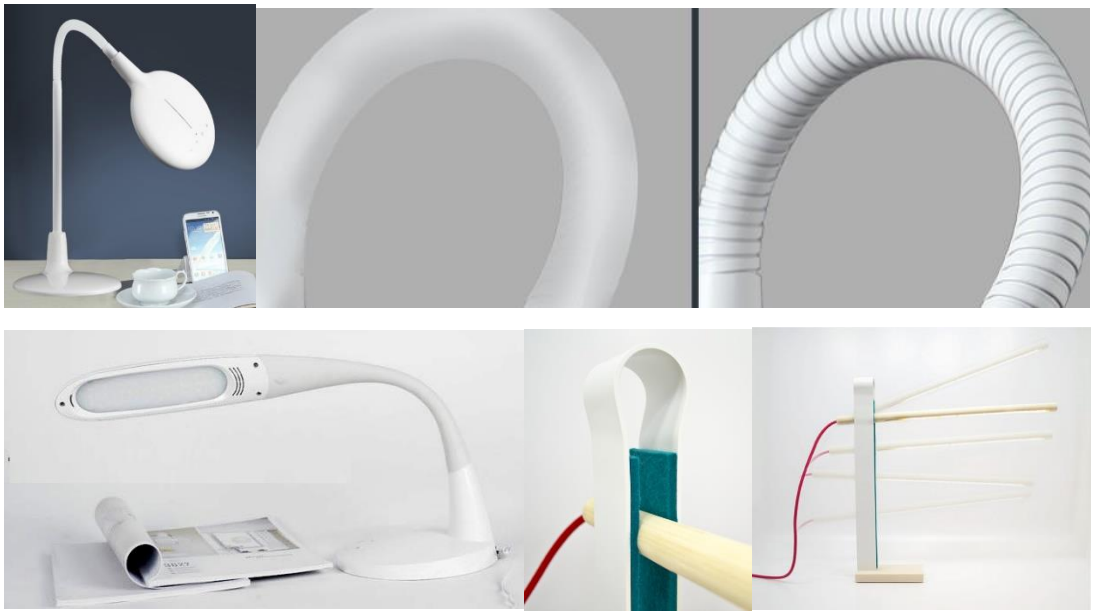
台灯主要由金属和塑料材质组成，铝材、不锈钢、铜件、铝镁合金是常用金属，铝材经过电镀产生亮面光泽、经过拉丝形成特殊纹理，经阳极氧化可产生不同色彩，铜件本身具有一定的质感和光泽，金属台灯主打色彩是原色银、纯净白、静雾黑，或者表面光亮的电镀。塑料台灯由于注塑材料色彩选择性多，因此塑料台灯的色彩更为丰富。



8-36 LED 灯具色彩工艺

3. 特殊材料运用

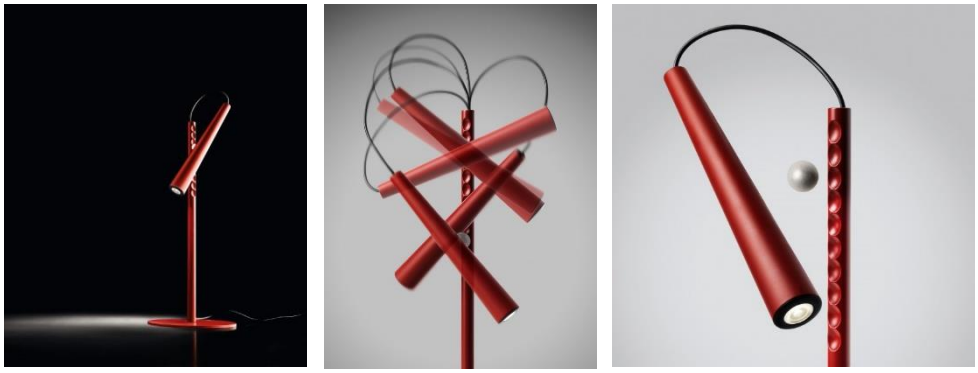
为保证灯具多角度旋转，在台灯设计中经常运用铝合金和硅胶弯管，该类材料可灵活自由弯曲，操作起来非常便捷，而且可以与灯臂和灯底座形成很好的形态衔接。其他的材料如毛毡的使用，利用其本身具备摩擦力的特点，可使灯管具有稳定性和可调性，使用者能随便调节光源的角度和高度。



8-37 灯具材料运用

4. 转轴结构设计

旋转结构设计是灯具设计重点考虑的因素，往往能体现灯具产品最大的特征。如下图所示的台灯利用磁铁的磁性工作原理，带有磁性的钢球能灵活移动灯具的照明高度和角度，起到特殊的转轴作用。



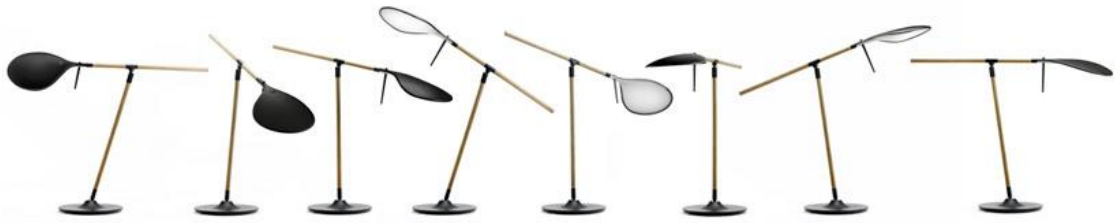
8-38 磁铁工作原理台灯

采用四轴联动结构的灯具，稳定性极强而且不失灵活性。



8-39 四轴联动结构台灯

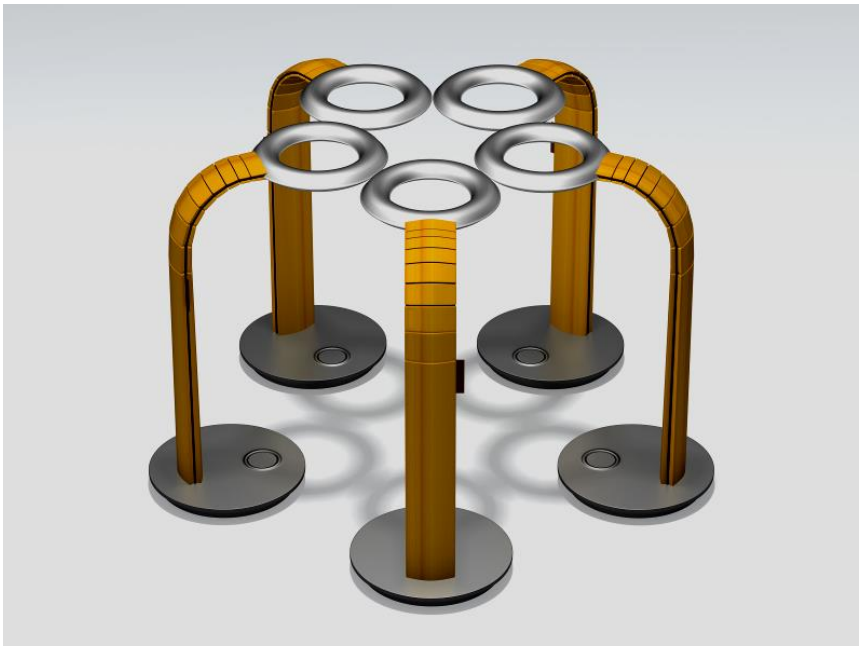
该灯具的灯臂和底座的转轴设计能保证灯具最大限度的活动。



8-40 自由旋转结构灯具

下图所示台灯由扁平的弯管材料连接圆形的底座和光源部分，功能统一、个

性十足且具有较高的审美价值。



8-41 弯管台灯

5.注重产品功能、强调互动体验

灯具产品注重照明功能，而且强调使用过程中与用户的交互行为，有趣的体验能增加产品的价值。如飞利浦.斯塔克设计的台灯运用其一贯的幽默感的设计手法，该台灯通过帽子的遮挡能创造特殊的照明体验，产品能为 IPOD 等电子产品充电，体现了一定的实用功能。





8-42 台灯设计——飞利浦.斯塔克

6.形态创新

在灯具产品的形态创新中，需要区分产品的核心功能和辅助功能，同时紧密围绕产品的主题进行创造。美国著名工业设计师 Yves Behar 为 Hermiller 公司

设计的叶子台灯，在产品形态上实现了独特创新。该台灯细长的造型如一片优美直立的叶片，可延伸并旋转 180 度，为另一片水平叶片提供支持，当水平叶片折叠靠近直立叶片时，光线将逐渐趋于柔和。



8-43 Hermiller 公司叶子台灯

为突出灯具的用户控制功能，所以将控制区域做了独特的划分，液晶触摸按键进行面积上的夸张处理，凸显无与伦比的触控技术，同时也强化了产品的体验功能，以此吸引消费者的青睐。

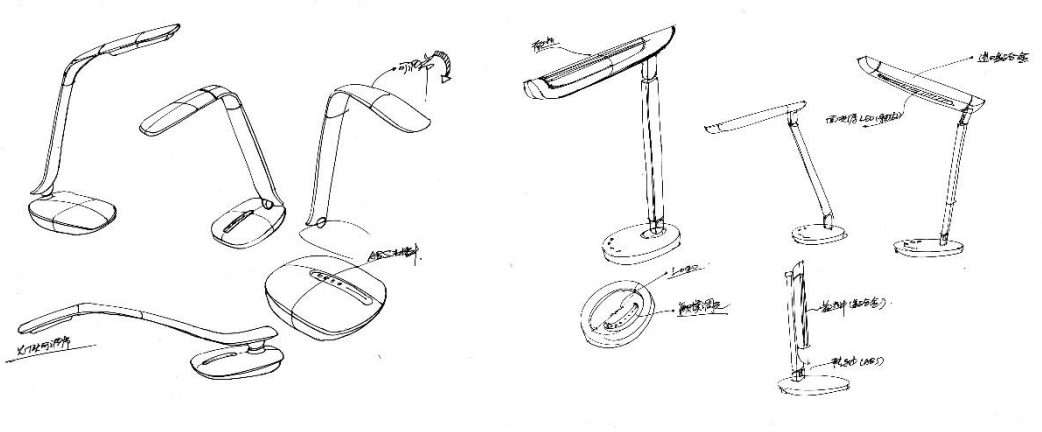


8-44 液晶触控屏幕台灯

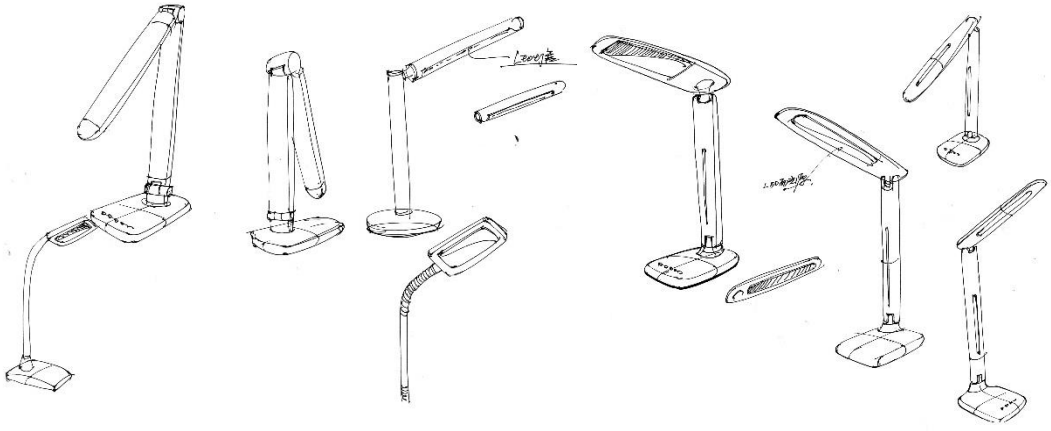
第二阶段 设计方案构思

一 概念草图设计

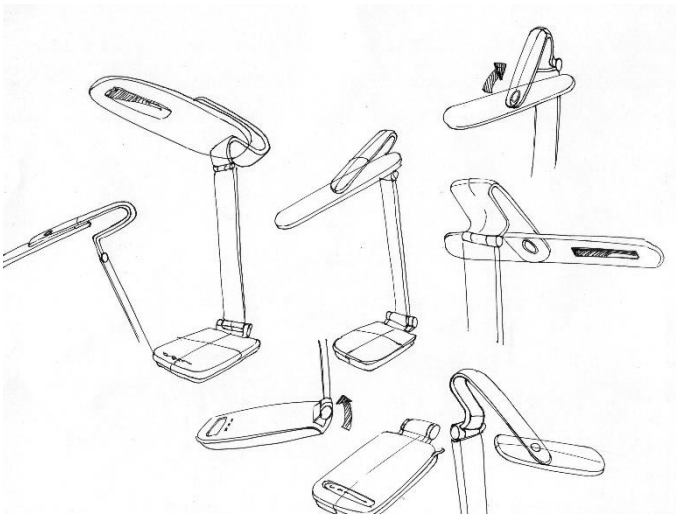
选用一种创造性思维方法进行构思，这里主要采用头脑风暴法进行草图设计与讨论，也成为“畅谈会法”，设计团队以会议形式对灯具方案进行咨询或讨论，始终保持自由，融洽，轻松的气氛，与会者无拘无束地发表自己对台灯创意的见解，不受任何框架的限制。团队其他成员则从发言中得到启示，进而产生联想，提出新的或补充的意见，这样产生了许多充满新意的台灯方案，最后对这些方案进行整理和分析。下面 5 组概念设计草图充分考虑产品的折叠性，在光源选择上以片光源为主，形态倾向简洁、材料节省且容易开模。



8-45 台灯概念草图设计（一）



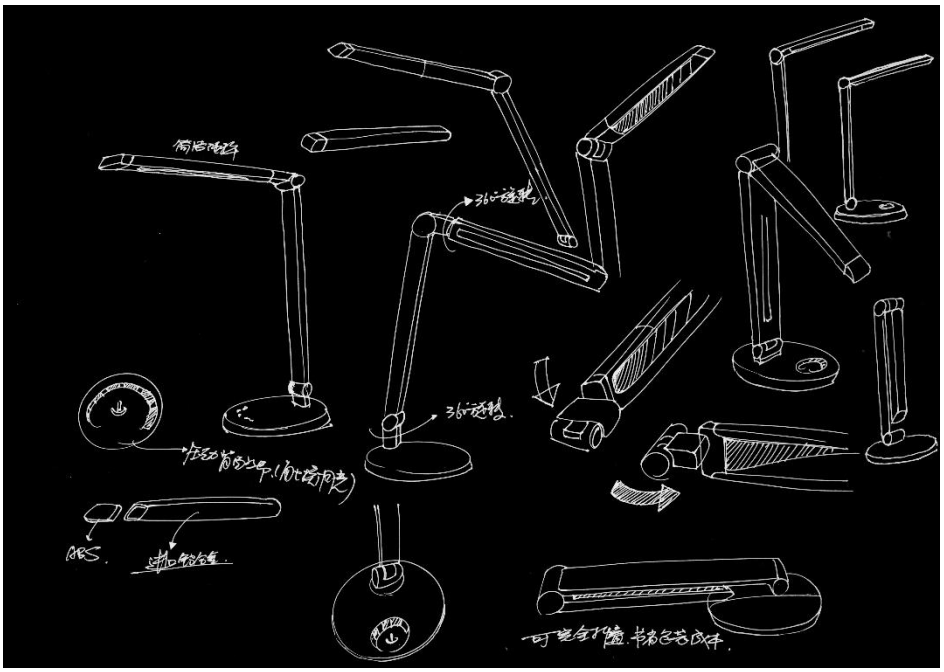
8-46 台灯概念草图设计（二）



8-47 台灯概念草图设计五

二 设计方案优化

在方案优化阶段，设计师与企业负责人进行积极沟通，详细分析每款设计方案的优缺点，并与市场上热卖灯具进行比较，同时仔细研究企业产品线开发思路和销售渠道，最后选择一种构件简单、几何线条的方块造型。该造型风格形式朴素、实用耐看，适合于大众消费人群，在未来市场具有持续性售卖的特点，不会随着时代久远而受淘汰，因而规避了潜在的市场风险。



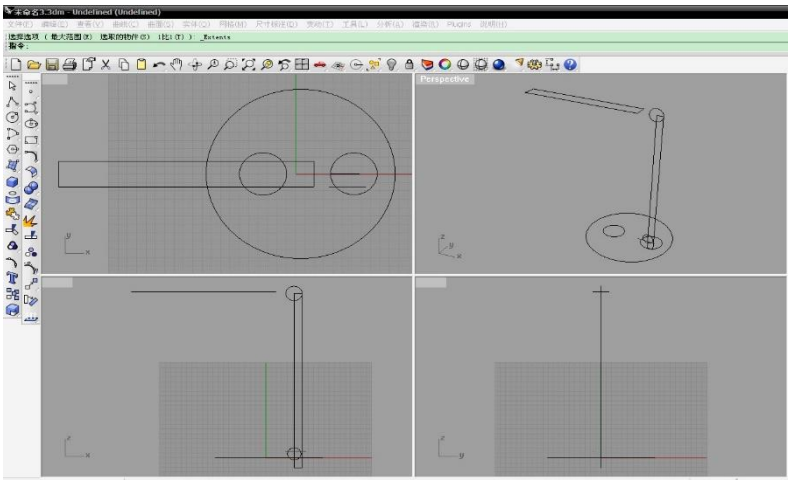
8-48 台灯优化方案草图

第三阶段 三维模型设计

三维模型构建除了需要掌握扎实的建模技巧外，更需要设计师具备三维空间的思考能力，创意推敲与设计分析的能力。由于细节的深入和结构的调整，通常三维模型和二维草图会有一定的出入，有经验的设计师会很好地解决这个潜在问题。建模前期需认真考虑灯具的分模方式和模具的装配，以及灯具需要用几个部件来完成，然后按照产品的实际尺寸和比例进行绘制。

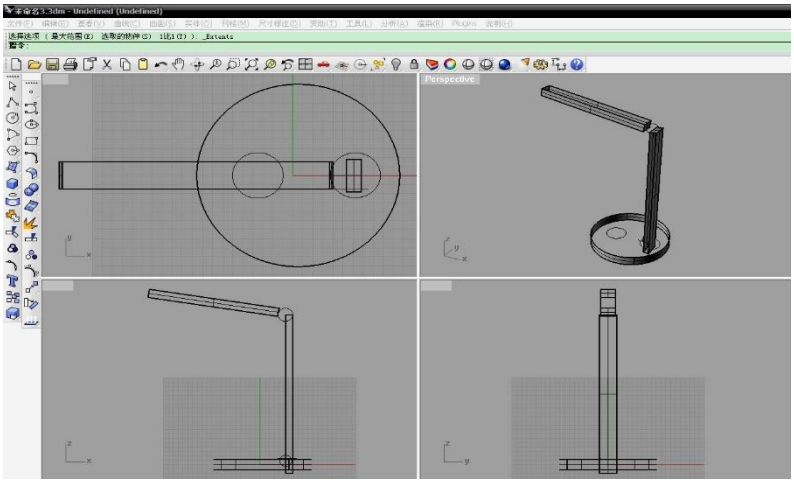
该章节通过产品轮廓线和结构线的绘制、形体块面的绘制、倒角制作、连接件和开关制作、模型分层设计等步骤完成台灯三维模型设计，具体内容步骤如下：

01 执行“矩形”和“圆”命令，以坐标原点为基准绘制。



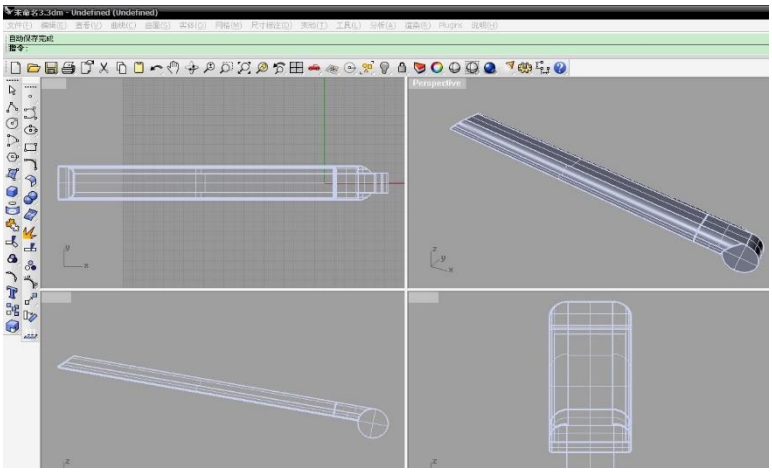
8-49 轮廓线和结构线的绘制

02 执行“直线挤出”命令，结合线挤出，然后选择全部图形执行“将平面洞加盖”命令。



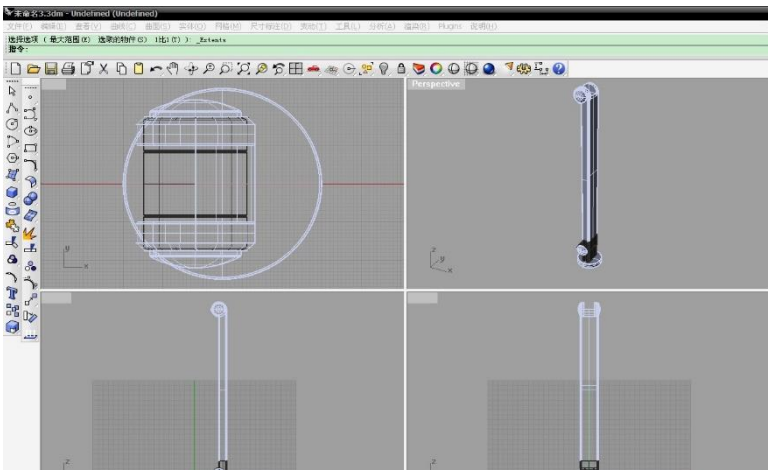
8-50 形体块面的绘制

03 执行“不等距边缘圆角”命令，把灯罩建模出来。



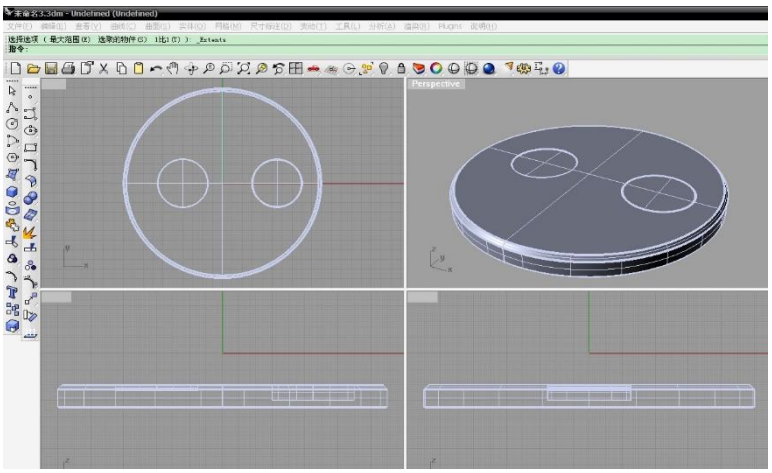
8-51 倒角制作步骤一

04 执行“不等距边缘圆角”命令，把灯柱建模出来。



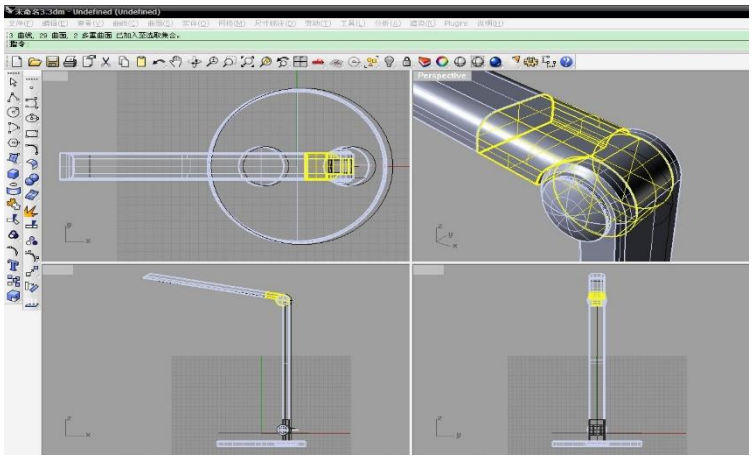
8-52 倒角制作步骤二

05 执行“不等距边缘圆角”命令，把底座建模出来。



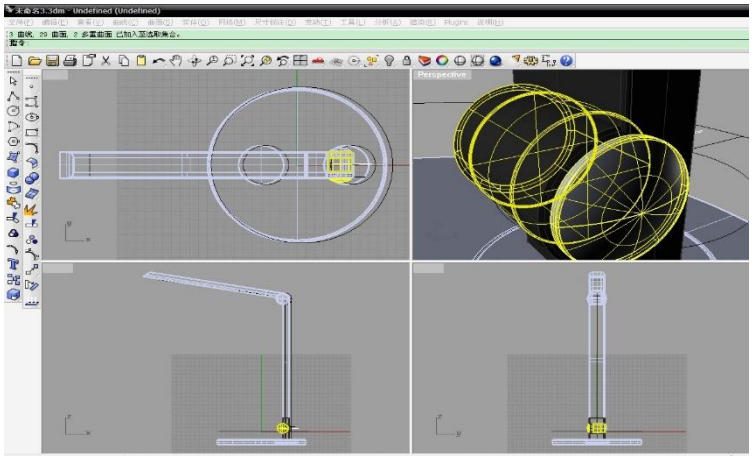
8-53 倒角制作步骤三

06 将灯柱和灯罩的连接件进行三维设计。



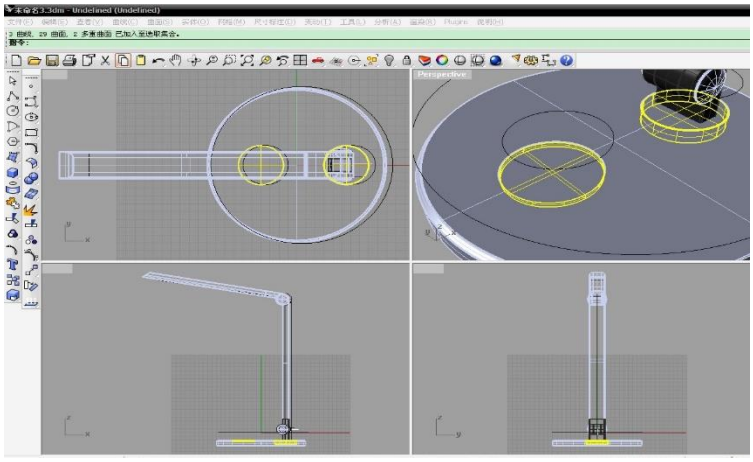
8-54 连接件和开关制作步骤一

07 将灯柱与底座的连接件进行三维设计。



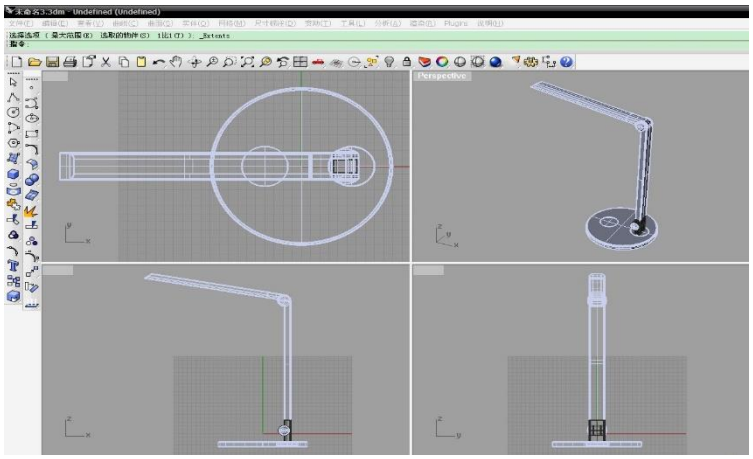
8-55 连接件和开关制作步骤二

08 将底座的开关进行三维设计。



8-56 连接件和开关制作步骤三

09 完成最终的模型



8-57 连接件和开关制作步骤四

10 按照灯具的不同材料选择不同的图层（此步骤利于产品后期的渲染，以及同结构工程人员进行清晰和有效的沟通）

第四阶段 结构与工艺设计

一 灯臂结构与工艺

台灯的灯臂采用 ABS 压塑成型，ABS 抗冲击性和耐热性好，易加工、制品尺寸稳定、表面光泽性好,，后期组装成型容易。

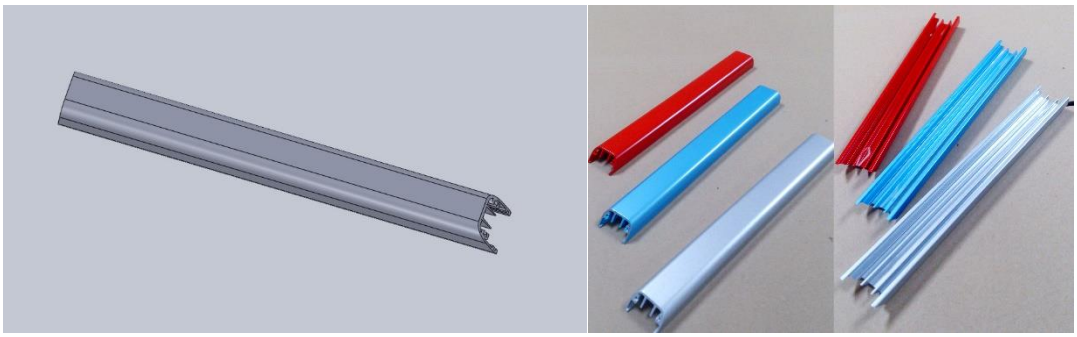


8-58 灯臂结构和后期成型效果图

二 灯杆结构与工艺

灯杆材料的选择主要考虑灯光源长时间发热的问题，如选用传统的塑料容易损坏和老化，选用金属铝材经镀铬处理后不易划伤、掉色，而且具有极佳的散热效果。此处铝材工艺流程主要是车削成型切割，然后经过精雕加工，抛光处理，

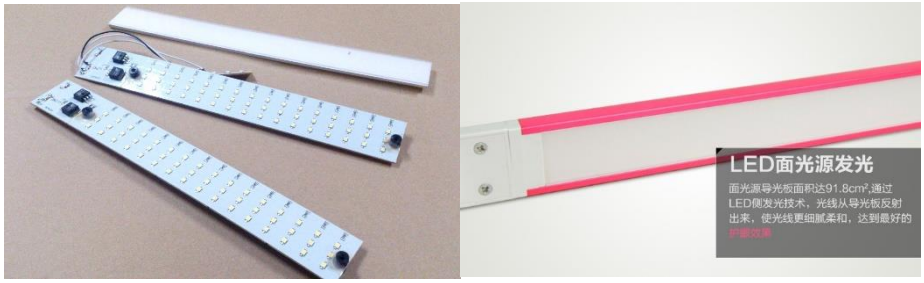
表面喷砂和表面阳极氧化等工艺完成。



8-59 灯杆结构和后期成型效果图

三 台灯光源设计

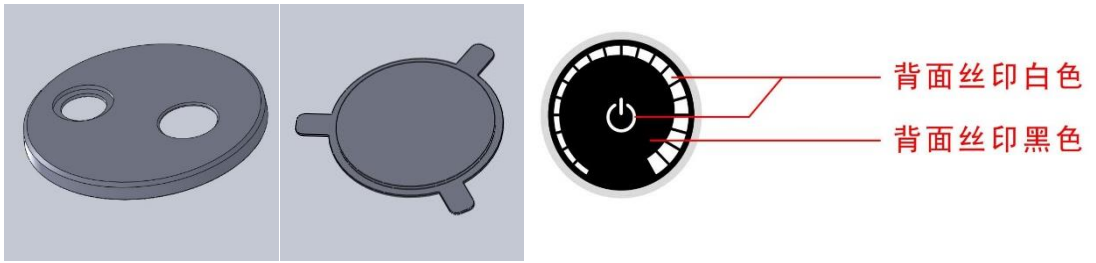
台灯光源设计考虑消费者长时间的工作和学习，灯光的照明强度与舒适度是主要决定因素，选用 48 颗 LED 灯珠组成的面光源发光模块，光线成线型分布，色温 6500K 的冷白光经 PC 扩散柔光板导光，达到舒适的极佳照明效果。



8-60 LED 灯珠布置效果图

四 台灯底座及按键结构与工艺

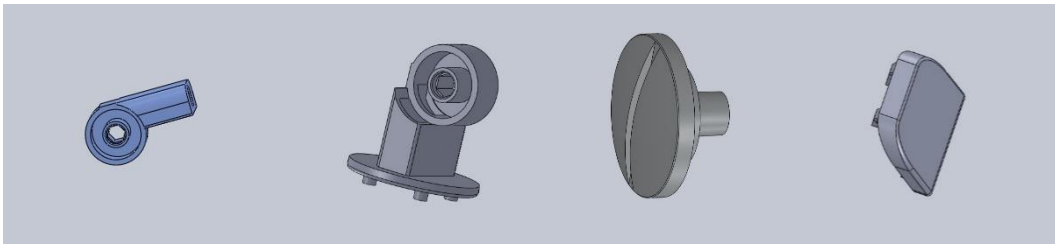
底座主要考虑灯具的牢固性和稳定性、按键的灵敏性。底座表面采用 ABS 压塑成型，表面喷砂处理，底座内部添加配重铁增加重量。按键则采用透明 PC 材料背面根据设计要求丝印相应的图标符号。



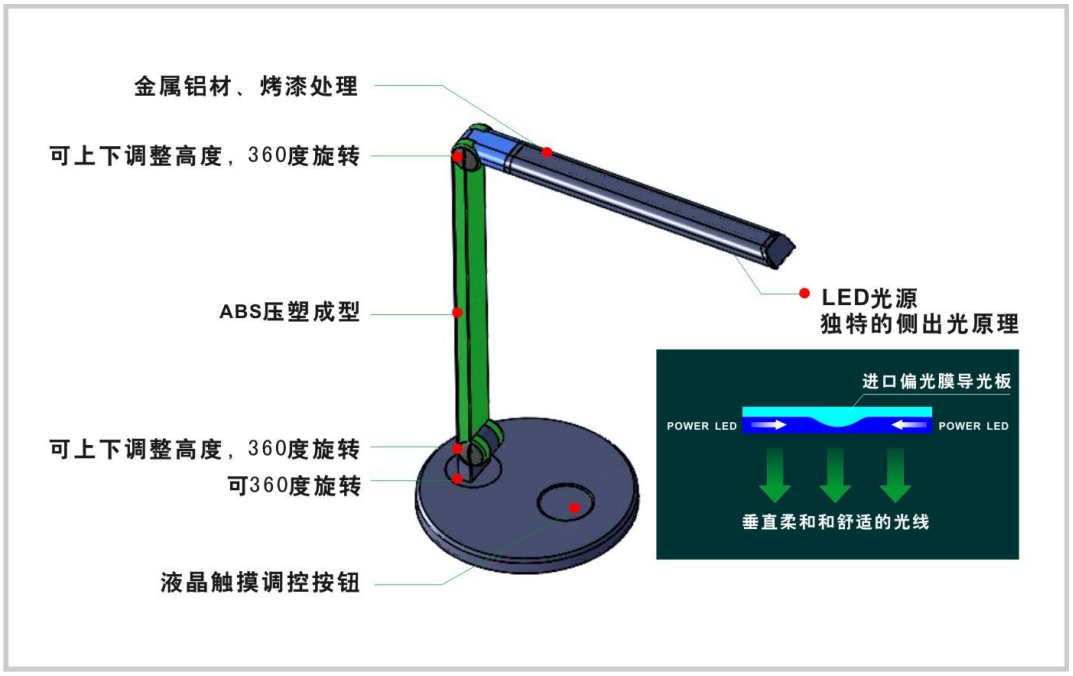
8-61 LED 底座结构及按键工艺图

五 其他部件结构与工艺

考虑台灯在工作中频繁的转动灯臂和灯杆，连接件的设计要注意阻力系数，保证长久使用过程中会保持完好的体验效果，材料选择 ABS 压塑成型，锁扣采铸铁材料。



8-62 连接件结构图



8-63 台灯整体工艺图

第五阶段 平面策划设计

一 功能特点提炼

1.无与伦比的触控设计

首先需要提炼和强化的是台灯的无极触控技术，这是体现台灯特质的一个亮点。前期步骤是设计师和摄影师进行沟通，布置特定的环境和场景，选择适当的光线和拍摄的视点。拍摄好图片后用 PS 软件进行后期的处理，配合文字进行进

一步的深化表达。



8-64 台灯局部摄影图一

文案部分：

触控开关的设计，感应灵敏，带给消费者更多的产品使用体验。无级别调节亮度，调节起来更加得心应手，从环境光到工作照明光，提供更多的选择性。

2.旋转功能设计

旋转功能设计也是台灯的重要卖点，可将台灯旋转到不同的角度，通过不同的视角及局部特写来表现，然后配合红色的转动符号辅助说明，这样能将旋转特点体现的非常清晰。



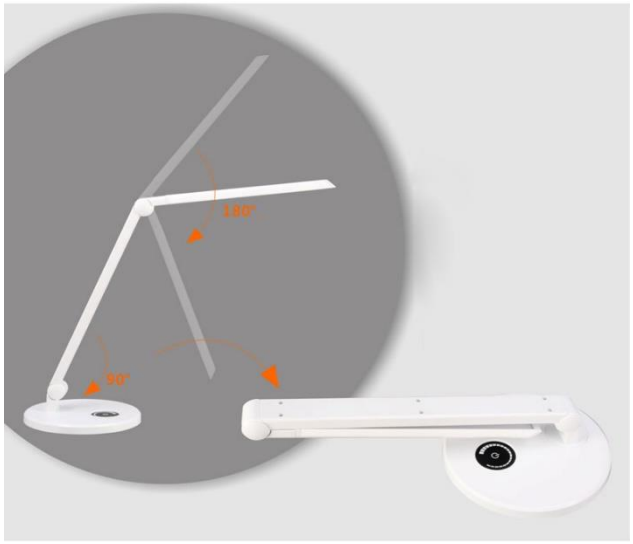
8-66 台灯局部摄影图二

文案部分：

从人机工程学的角度考虑，设计了多处可活动的旋转功能，使消费者能便捷的掌控照明的高度和角度。

3. 折叠功能设计

渲染几张旋转台灯灯臂的效果图，然后将几张图组合在一块，并标注可旋转的方向和角度，同时拍摄一张产品完全折叠后的状态。



8-67 台灯折叠功能摄影图

文案部分：

折叠功能的设计节省了大量的包装成本及运输成本，从而最终减轻消费者的

负担。

二 台灯色彩提炼

色彩设计中，通过分析近两年主流家电产品、家具、灯具、服装及汽车等产品的色彩、分析产品与家居环境之间的相互关系，对消费趋势和定位人群的喜好进行预测，从而得出橙色、蓝色、红色、白色、银色和玫瑰色六种色调方案。多样化的色彩提供消费者更多选择的空间，同时利于产品集中销售。

1. 橙色调

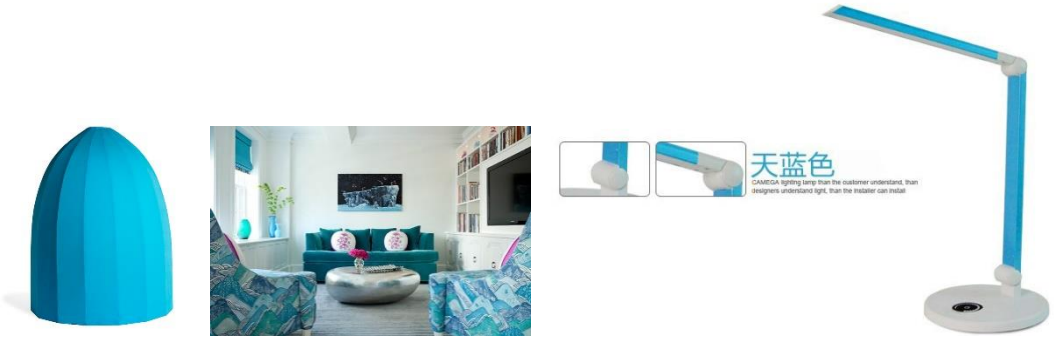
橙色是一种明快、热烈、温暖而欢快的色彩，在工业产品中运用的非常普遍，如下图所示的橙色灯具和椅子充满了活力与华丽的特征，橙白搭配运用在台灯上传达了一种健康而温暖的形象。



8-68 台灯橙色配色方案

2. 蓝色调

蓝色是一种秀丽、清新、忧郁而豁达的冷色调色彩同时也预示着灵感和灵性。在啤酒包装、消费电子产品和紧凑型汽车中经常可见到蓝色的运用，天蓝色调的台灯让室内空间多了一层沉稳和宁静的气息。



8-69 台灯蓝色配色方案

3. 红色调

红色调鲜艳夺目，非常醒目，在视觉上给人一种迫近感和扩张感，容易引发兴奋、激动、紧张的情绪。红色的性格强烈、外露，饱含着一种力量和冲动，其中内涵是积极的、前进向上的，为活泼好动的人所喜爱。如热情而欢乐的可口可乐包装、象征激情与速度的法拉利跑车，孟菲斯代表人物索特萨斯的“反机器的机器”——红色情人节打印机。红色的台灯使生活和工作环境充满热烈而奔放的气息。



8-70 台灯红色配色方案

4. 银色调

这里将白色到黑色的所有无色色彩成为银色调。银色象征洞察力与理性，沉稳而高贵，在家电产品中使用的频率越来越高，受到很多消费者的青睐。同时银色是沉稳之色，代表高尚、尊贵、纯洁与永恒，更重要的是银色是时尚色调，中间色的一种，极其容易搭配，如日本无印良品崇尚极简的银色。银色调中的白色台灯朴素而不失大气，简略而不失时尚、金属感十足。



8-71 台灯白色配色方案

三 整体文案设计

整体文案中需要给产品提炼一个大方而高贵的名字，应果断舍弃企业以英文字母加上阿拉伯数字的传统命名方式，因其不能反映产品的特质，导致识别度不高，不利于后期的宣传推广。此处可吸收国内外汽车品牌的品名策划，如比较成功的有：福特毅虎、保时捷卡宴、丰田皇冠、JEEP 自由光、长城哈弗和东风景逸等。结合该灯具的特点取名“悦动”台灯，突出简洁、智能、便捷和高效的创新卖点。在产品设计描述中可从创意构思点、功能与形态、细节与质感及环保主题等方面做综合的描述，同时配上英文说明，向海外市场推广。具体文案如下：

品名：【悦动】台灯

创新点：简洁、智能、便捷、高效

产品设计描述：

悦动台灯力求在形、色、质等方面体现出家居日用产品的独到特性，简洁的几何美、素雅的钛金白底盘配上不同色系的灯杆、哑光的高质感赋予灯具独具匠心的外观。

“悦”既能代表喜悦之悦，又能代表阅读之阅，在设计过程中强调消费者的使用体验，六档调光方式的全触摸按钮，智能、便捷、高效，让用户尽情体验阅读之乐。

“动”则代表灵动和转动。特殊的机械转轴设计不仅使灯臂从 0-150 度能灵活转动，而且灯杆能完全折叠，节省后期的包装运输成本，体现环保的需求。

参考文献

（1）桂元龙，杨醇.产品形态设计.北京：北京理工大学出版社，2011.

（2）李农.景观照明设计与实例详解.北京：人民邮电出版社，2011.

（3）北京照明学会照明设计专业委员会.照明设计手册.2版.北京：中国电力出版社，2006.

（4）夏进军.产品形态设计.北京：北京理工大学出版社，2012.

（5）徐清涛.灯饰设计.北京：高等教育出版社.2010.

参考网站：

http://usa.flos.com/

http://www.artemide.com/home/index.action

http://www.qisdesign.com.cn/

http://www.red-dot.sg/zh

http://ifworlddesignguide.com/

http://go.cndesign.com/news/detail_888.html

https://www.moooi.com/



光学真空镀膜技术

主　编　石　澎　马　平
副主编　鲍刚华　沈燕君

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

近些年，随着手机、汽车、安防监控等光学镜头终端市场的规模化、持续性扩张，对光学薄膜的需求也越来越多，光学真空镀膜技能型人才供不应求的局面日益凸显。本书以弱化理论、侧重实践与技能为原则，按照工序将光学真空镀膜技术分为光学镀膜基础与膜系设计、光学薄膜制备技术、光学薄膜检测技术三部分，对应光学薄膜制备的三个核心流程。基于工作过程和典型工作任务设置单元和内容，使书中内容与职业岗位要求相匹配。

本书可作为高职、中职院校光学相关专业的课程教材，也可供相关领域的工程技术人员参考学习。

上架指导 电子技术

策划编辑◎付承桂
封面设计◎马若濛

ISBN 978-7-111-69356-7

9 787111 693567 >

定价：46.00元

E 视界
传播电类内容 提升专业知识

科技电眼
关注电类行业动向 聚焦前沿科技

摘要

光学镀膜是指在真空状态下，将材料以蒸发沉积的方式在光学零件表面上镀制一层(或多层)薄膜的工艺过程，是光学镜片制造的关键环节。其主要作用是根据光学系统的要求调控镜片在不同光谱波段的光能量透过以及偏振等性能，镀膜后的光学镜片是光学系统发挥性能的根本保障。本教材根据光学镀膜的三个主要环节：光学薄膜的膜系设计、光学薄膜镀制以及光学薄膜检测，将内容整合为三个相应的学习项目，包括：光学镀膜基础、光学薄膜制备技术以及光学薄膜检测技术，每个项目中又将相关的知识点分配到几个典型工作任务中。根据需要，配备了一些有针对性的实训任务，为实训环节的教学提供一定的参考。

《光学镀膜技术》可用作高职高专光电制造类专业的教材，也可作为相关工程技术人员的参考资料。

目 录

项目 1 光学镀膜基础 1
任务 1.1 光学薄膜理论基础 1
1.1.1 平面电磁波在单一界面上的反射和折射 1
1.1.2 菲涅尔公式 3
1.1.3 光学薄膜特性的理论计算 11
任务 1.2 光学薄膜设计 18
1.2.1 增透膜设计 18
1.2.2 高反膜的设计 23
1.2.3 其他类型光学薄膜设计 25
实训 1.2 光学增透膜设计 27
任务 1.3 光学薄膜材料 33
1.3.1 金属薄膜材料 33
1.3.2 介质和半导体薄膜材料 37
1.3.3 金属膜与介质膜的比较 42
项目 2 光学薄膜制备技术 43
任务 2.1 真空及真空设备 43
2.1.1 真空技术知识及主要术语定义 43
2.1.2 真空的获得所需设备 52
2.1.3 真空的测量 63
实训 2.1 镀膜机真空系统抽真空 67
任务 2.2 热蒸发镀膜工艺 70
2.2.1 热蒸发镀膜机理介绍 70
2.2.2 热蒸发镀膜工艺分类 82

2.2.3 离子束辅助工艺介绍 94
2.2.4 影响热蒸发镀膜质量的工艺参数 96
实训 2.2 电子束蒸发制备高反射薄膜 109
任务 2.3 溅射镀膜工艺 112
2.3.1 溅射镀膜机理介绍 112
2.3.2 溅射镀膜工艺分类 113
2.3.3 影响溅射镀膜质量的工艺参数 151
2.3 实训 离子束溅射制备高反射薄膜 155
项目 3 光学薄膜检测技术 157
任务 3.1 光学薄膜反射率和透过率测量 157
3.1.1 光谱分析测试系统原理 157
3.1.2 薄膜透过率测量 161
3.1.3 薄膜反射率测量 161
3.1.4 影响测量精度的因素 163
任务 3.2 光学薄膜厚度的测量 164
3.2.1 干涉法测量薄膜厚度 164
3.2.2 轮廓法测量薄膜厚度 166
3.2.3 其他测量方法 166
任务 3.3 光学薄膜激光损伤阈值测量 166
3.3.1 光学薄膜损伤测量标准及判定 166
3.3.2 几类激光损伤阈值测量方法介绍 167
3.3.3 激光损伤测试装置 167
3.3.4 1-on-1 损伤测试标准过程 168
任务 3.4 光学薄膜其他参数测量 170
3.4.1 薄膜的吸收和散射测量 170
3.4.2.薄膜材料折射率测量 174
实训 3.4 椭偏光法测量薄膜的厚度和折射率 177
3.4.3 薄膜散射测量 179

3.4.4 薄膜折射率测量 182

项目 1 光学镀膜基础

任务 1.1 光学薄膜理论基础

1.1.1 平面电磁波在单一界面上的反射和折射

通常光学多层膜涉及到很多界面，我们首先讨论最简单的单一界面的情况，然后将之扩展到多层薄膜、很多界面的复杂情况。

1) 反射定律和折射定律

下面讨论光在两种不同介质的分界面上所发生的反射和折射现象。为方便起见，假定两种介质都是各向同性的均匀介质。位于图 1.1.1-1 所示的 x-z 平面（入射平面）内的一束单色线偏振的平行光以角度入射在分界面上。和各为两个介质的光学导纳。入射波在界面上分解为一个反射波和一个折射或透射波。设和分别为入射波、反射波和透射波单位矢量的方向余弦，则入射波的位相因子为

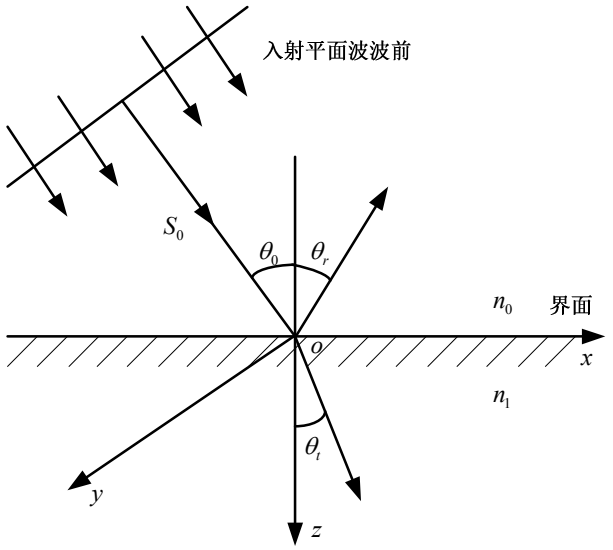


图 1.1.1-1 平面波的反射和折射

$$\exp\left\{i\left[\omega_i t-\frac{2\pi N_0}{\lambda}\left(x\sin\theta_0+z\cos\theta_0\right)\right]\right\}$$

反射波的位相因子为

$$\exp\left\{i\left[\omega_r t-\frac{2\pi N_0}{\lambda}\left(x\alpha_r+x\beta_r+x\gamma_r\right)\right]\right\}$$

透射波的位相因子为

$$\exp\left\{i\left[\omega_t t-\frac{2\pi N_0}{\lambda}\left(x\alpha_t+x\beta_t+x\gamma_t\right)\right]\right\}$$

根据边界条件，在 z=0 处 E 和 H 的切向分量是连续的

$$E_t^{\mathrm{i}}+E_t^{\mathrm{r}}=E_t^{\mathrm{t}}$$

$$H_t^{\mathrm{i}}+H_t^{\mathrm{r}}=H_t^{\mathrm{t}}$$

若在任何时刻 ,对与边界上的任意一点，上式始终成立，则 。它表示从一种介质到另一种介质，波的频率是不变的。同时若满足边界条件还必须使上述三个位相因子表达式中对应的的系数相等，即

$$N_0\alpha_i=N_0\alpha_r=N_0\alpha_t \qquad (1.1.1\text{-}1)$$

$$N_0\beta_i=N_0\beta_r=N_0\beta_t \qquad (1.1.1\text{-}2)$$

从图 1.1.1-1 可见

$$\alpha_i=\sin\theta_0,\quad \alpha_r=\sin\theta_r,\quad \alpha_t=\sin\theta_t$$

则式（1.1.1-2）

$$\beta_{\mathrm{i}}=\beta_r=\beta_t=0$$

$$N_0\beta_i=N_0\beta_r=N_0\beta_t=0$$

这表示在反射、折射时，光束固定在入射平面（XZ 平面）内。

由式（1.1.1-2）得，$N_0\alpha_i=N_0\alpha_r$，因而

$$\theta_0 = \theta_{\mathrm{r}} \qquad (1.1.1\text{-}3)$$

上式表示光从两个介质的分界面上反射时，入射角等于反射角，此即反射定律。

从式（1.1.1-3）又有

$$N_0 \sin\theta_0 = N_1 \sin\theta_t \qquad (1.1.1\text{-}4)$$

若用 θ_1 代替 θ_t，则上式更加对称

$$N_0 \sin\theta_0 = N_1 \sin\theta_1$$

式（1.1.1-4）称为斯涅耳折射定律，它对透明的或吸收的介质都同样适用。

1.1.2 菲涅尔公式

我们可以进一步讨论反射波和透射波振幅的大小以及反射相位的变化。为了避免混淆，我们必须首先规定电场矢量的正方向。最容易处理的是垂直入射的情况。在垂直入射时，我们选择如图 1.1.2-1 所示的符号规则。通常取 z 轴垂直于界面，正方向沿着入射波方向。 x 和 y 轴位于界面内。规定入射波、反射波和透射波的电矢量的正方向相同（例如都从纸面向外）。对于电场我们选择最简单的约定，但是由于这些矢量形成右手系，所以也就包含了对磁场矢量的隐含约定。

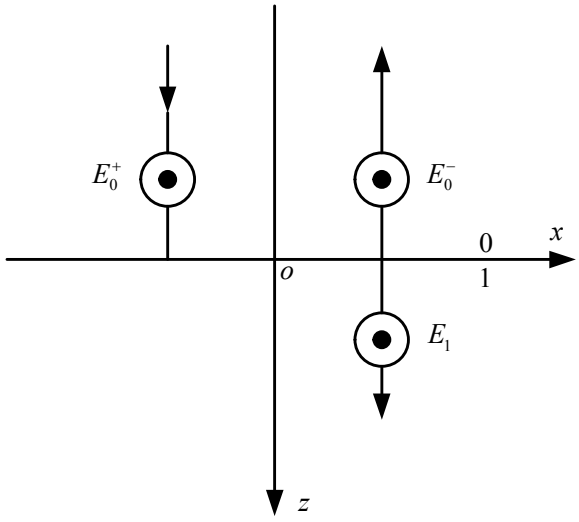


图 1.1.2-2 垂直入射时所取的电矢量的正方向

因为波是垂直入射的，所以E和H两者平行于界面，并且在界面两边它们都是连续的。由于在第二介质中显然没有反射波，故

$$H_1 = H_t, E_1 = E_t$$

由式$\frac{N\sqrt{\varepsilon_0/\mu_0}}{\mu_r}(S_0 \times E) = H$得

$$H_1 = N_1(S_0 \times E_1) \qquad (1.1.2\text{-}5)$$

在入射介质中，有正方向行进和负方向行进的两种波。用符号E_0^+, E_0^- H_0^+ H_0^-,分别表示E和H在第一介质中的各个分量，它们之间有下列关系：

$$\left.\begin{aligned} H_0^+ &= N_0(S_0 \times E_0^+) \\ H_0^- &= N_0(-S_0 \times E_0^-) \end{aligned}\right\} \qquad (1.1.2\text{-}6)$$

应用边界条件

$$\left.\begin{aligned} E_1 = E_1^{+} = E_0^{+} = E_0^{-} \qquad & (在z=0) \\ H_1 = H_1^{+} = H_0^{+} = H_0^{-} \qquad & (在z=0) \end{aligned}\right\} \tag{1.1.2-7}$$

将式（1.1.2-7）得第二式和（1-6）式代入式（1-5），得

$$N_1\left(S_0 \times E_1\right) = N_0\left(S_0 \times E_0^{+} - S_0 \times E_0^{-}\right)$$

即

$$N_1 E_1 = N_0\left(E_0^{+} - E_0^{-}\right)$$

故有

$$E_0^{-} = \frac{N_0 - N_1}{N_0 + N_1} E_0^{+}$$

$$\left.\begin{aligned} r &= \frac{E_0^{-}}{E_0^{+}} = \frac{N_0 - N_1}{N_0 + N_1} \\ t &= \frac{E_1}{E_0^{+}} = \frac{2N_0}{\left(N_0 + N_1\right)} \end{aligned}\right\} \tag{1.1.2-8}$$

r，t称为振幅反射系数和透射系数，或称菲涅尔反射系数和透射系数。从波印廷矢量平均值的表示式中可知，强度反射率R为

$$R = rr^{*} = \left(\frac{N_0 - N_1}{N_0 + N_1}\right)\left(\frac{N_0 - N_1}{N_0 + N_1}\right)^{*} \tag{1.1.2-9}$$

上面讨论的是垂直入射的情况，但其结果不难推广到倾斜入射的情况。这时我们需分别对p^{-}偏振和s^{-}偏振规定电矢量的正方向，符号如图 1.1.2-3 所示，这和垂直入射时所取的约定规则是一致的。

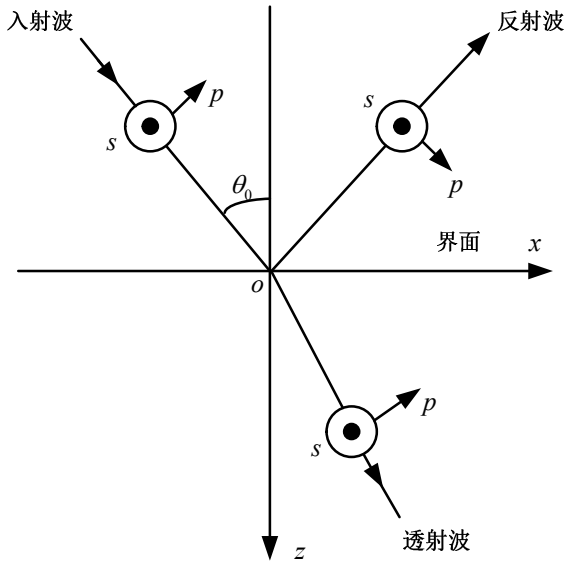


图 1.1.2-3 倾斜入射时所取的电矢量的方向

只要引进有效导纳η，用和η_0和η_1代替式（1.1.2-8）和（1.1.2-9）中的N_0和N_1，便可求得倾斜入射时的反射率。类似于式（$\frac{N\sqrt{\varepsilon_0/\mu_0}}{\mu_r}(S_0\times E)=H$），$\eta$可定义为磁场强度的切向分量与电场强度的切向分量之比

$$\eta = H_t^+ \Big/ \left(S_0 \times E_t^+\right)$$

$$\eta = -H_t^- \Big/ \left(S_0 \times E_t^-\right)$$

η不仅与入射角有关，而且依赖于E和H相对于入射平面的方位。可以证明，任何特定方位都可以归纳为两个标准方位的组合：

E在入射面内，这个波称为TM波（横磁波）或称p^-偏振波；

E垂直于入射面，这个波称为TE波（横电波）或称s^-偏振波。

下面分别讨论TM波和TE波的反射系数和透射系数。

TM波（p^-偏振）：H垂直于入射面，故H与界面平行，因此

$$H = H_t$$

而 E 与界面成 θ 倾角，故

$$E_t = E\cos\theta$$

因为

$$H = H_t = N\left(S_0 \times E\right) = N\left(S_0 \times E_t/\cos\theta\right) = \frac{N}{\cos\theta}\left(r_0 \times E_t\right)$$

r_0 为垂直于界面的单位波矢量。由 η 的定义，有

$$\eta_p = N/\cos\theta$$

TE 波（s^- 偏振）：E 与界面平行，而 H 成一 θ 倾角。用与上面相似的证明得到

$$\eta_s = N\cos\theta$$

现在菲涅尔反射系数可以写成

$$r_p = \left(\frac{E_0^-}{E_0^+}\right)_p = \frac{E_{0t}^-/\cos\theta_0}{E_{0t}^+/\cos\theta_0} = \frac{E_{0t}^-}{E_{0t}^+} = \frac{\eta_{0p} - \eta_{1p}}{\eta_{0p} + \eta_{1p}} = \frac{N_0\cos\theta_1 - N_1\cos\theta_0}{N_0\cos\theta_1 + N_1\cos\theta_0} \quad (1.1.2\text{-}10)$$

$$r_s = \left(\frac{E_0^-}{E_0^+}\right)_s = \frac{E_{0t}^-}{E_{0t}^+} = \frac{\eta_{0s} - \eta_{1s}}{\eta_{0s} + \eta_{1s}} = \frac{N_0\cos\theta_0 - N_1\cos\theta_1}{N_0\cos\theta_0 + N_1\cos\theta_1} \quad (1.1.2\text{-}11)$$

同样，透射系数可以写成

$$t_p = \left(\frac{E_1}{E_0^+}\right)_p = \frac{E_{1t}^-/\cos\theta_1}{E_{0t}^+/\cos\theta_0} = \frac{2\eta_{0p}}{\eta_{0p} + \eta_{1p}} \cdot \frac{\cos\theta_0}{\cos\theta_t} = \frac{2N_0\cos\theta_0}{N_0\cos\theta_1 + N_1\cos\theta_0} \quad (1.1.2\text{-}12)$$

$$t_s = \left(\frac{E_1}{E_0^+}\right)_s = \frac{E_{1t}}{E_{0t}^+} = \frac{2\eta_{0s}}{\eta_{0s} + \eta_{1s}} = \frac{2N_0\cos\theta_0}{N_0\cos\theta_0 + N_1\cos\theta_1} \quad (1.1.2\text{-}13)$$

强度反射率是

$$R=\left(\frac{\eta_0-\eta_1}{\eta_0+\eta_1}\right)^2=\begin{cases}(\dfrac{N_0\cos\theta_1-N_1\cos\theta_0}{N_0\cos\theta_1+N_1\cos\theta_0})^2\\(\dfrac{N_0\cos\theta_0-N_1\cos\theta_1}{N_0\cos\theta_0+N_1\cos\theta_1})^2\end{cases}\qquad\text{（1.1.2-14）}$$

正如前面所述，由于透射光束和入射光束的截面积不同，所以透射率定义为透射光强度的垂直分量与入射光强度垂直分量之比。故透射率为

$$T=\frac{N_1\cos\theta_1}{N_0\cos\theta_0}|t|^2=\begin{cases}\dfrac{4N_0N_1\cos\theta_0\cos\theta_1}{\left(N_0\cos\theta_1+N_1\cos\theta_0\right)^2}\\\dfrac{4N_0N_1\cos\theta_0\cos\theta_1}{\left(N_0\cos\theta_0+N_1\cos\theta_1\right)^2}\end{cases}\qquad\text{（1.1.2-15）}$$

式（1.1.2-10）至（1.1.2-13）就是菲涅尔公式，是薄膜光学中最基本的公式之一。因为光在薄膜中的行为，实际上是光波在分层介质的诸界面上的菲涅尔系数相互叠加的结果，所以可借助这些系数分析多层膜的特性。

第二介质是吸收介质的情况

上面讨论了两种介质都是非吸收介质的情况，但即使第二介质是吸收介质，菲涅尔公式也是有效的。与上述情况不同的只是这种介质的折射率 N_1 为复数， $N_1=n_1-ik_i$ 。由折射定律

$$n_0\sin\theta_0=\left(n_1-ik_1\right)\sin\theta_1$$

得

$$\sin\theta_0=\frac{n_0\sin\theta_0}{\left(n_1-ik_1\right)}\qquad\text{（1.1.2-16）}$$

可见 θ_1 为复数，并且除了 $\theta_0=\theta_1=0$ ，即垂直入射的特殊情况外， θ_1 不再代表折射角。在 $\theta_0=\theta_1=0$ 这种特殊情况下，菲涅尔反射系数的表达式有如下简单的形式：

$$r_p=r_s=\frac{n_0-n_1+ik_1}{n_0+n_1-ik_1}\qquad\text{（1.1.2-17）}$$

反射率则为

$$R_p = R_s = \frac{\left(n_0 - n_1\right)^2 + k_1^2}{\left(n_0 + n_1\right)^2 + k_1^2} \qquad (1.1.2\text{-}18)$$

当光束倾斜入射时，情况要复杂得多。这时菲涅尔反射系数为

我们必须记住 $N_1 \cos\theta_1$ 值是一个复数值

$$N_1 \cos\theta_1 = \left(n_1^2 - k_1^2 - n_0^2 \sin^2\theta_0 - 2in_1k_1\right)^{1/2}$$

它必须在第四象限。如令

$$N_1 \cos\theta_1 \equiv u_1 + iv_1$$

则必须有 $u_1 > 0, v_1 <$ 。这可以容易地得到证明。在吸收介质中传播的波可以写成如下形式：

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{01} \exp\left\{ i\left[\omega t - \frac{2\pi N_1}{\lambda}\left(x\sin\theta_1 + z\cos\theta_1\right)\right]\right\} \\ &= E_{01} \exp\left(\frac{2\pi}{\lambda} z v_1\right) \exp\left\{ i\left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}\left(xN_1\sin\theta_1 + zu_1\right)\right]\right\} \end{aligned}$$

只有当 $v_1 < 0$，才表示电场强度沿着 z 方向按指数衰减。同时由于 $n_1 > 0, k_1 <$ ，而且通常 $k_1 > n_1$，所以 $\left(n_1^2 - k_1^2 - n_0^2 \sin^2\theta_0 - 2in_1k_1\right)$ 必须在第三象限，而它的平方根则在第二或第四象限。因为 $v_1 < 0$，所以 u_1 必须大于零。

于是菲涅尔反射系数可以改写成如下形式

$$r_s = \frac{n_0\cos\theta_0 - \left(u_1 + iv_1\right)}{n_0\cos\theta_0 + \left(u_1 + iv_1\right)} \qquad (1.1.2-19)$$

$$r_p = \frac{n_0\left(u_1 + iv_1\right) - \left[\left(u_1 + iv_1\right)^2 + n_0^2\sin^2\theta_0\right]\cos\theta_0}{n_0\left(u_1 + iv_1\right) + \left[\left(u_1 + iv_1\right)^2 + n_0^2\sin^2\theta_0\right]\cos\theta_0} \qquad (1.1.2-20)$$

对在吸收介质中传播的波，菲涅尔透射系数没有实际意义，因为波的衰

减取决于他在介质中的行进路程。复数 $r_p = |r_p| e^{i\varphi_p}$ 和 $r_s = |r_s| e^{i\varphi_s}$ 的幅角是反射波的位相变化，反射率由模的平方确定。

全反射

全反射是值得专门叙述一下的。在这里，在这里，虽然第二介质是透明介质，我们仍然要利用复数折射角的概念。全反射反射在光从光密媒质传播到光疏媒质，即 $n_0 > n_1$ 的时候，而且要入射角 θ_0 超过上式所给定的临界角 $\overline{\theta_0}$（全反射角）

$$\sin\overline{\theta_0} = n_1/n_0$$

由斯涅尔定律得

$$\sin\theta_1 = \frac{n_0}{n_1}\sin\theta_0$$

当 $\theta_0 = \overline{\theta_0}$ 时，$\sin\theta_1 = 1$，即 $\theta_1 = 90^\circ$，因而光沿着和界面相切的方向射出。现在我们要讨论的是当入射角超过临界角时反射位相的变化。在 $\theta_0 > \overline{\theta_0}$ 的情况下

$$n_1\cos\theta_1 = \pm n_1\left(1-\sin^2\theta_1\right)^{1/2} = \pm i n_1\left(n_0{}^2\sin^2\theta_0/n_1{}^2 - 1\right)^{1/2}$$

令 $n_1\cos\theta_1 \equiv iv_1$，只有 $v_1 < 0$ 才符合物理模型。

写出光波在第二介质中的位相因子

$$\exp\left\{i\left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}\left(iv_1 z + x\sin\theta_1 n_1\right)\right]\right\} = \exp\left(\frac{2\pi z}{\lambda}v_1\right)\exp\left[i\left(\omega t - \frac{2\pi n_1}{\lambda}x\sin\theta_1\right)\right]$$

可见 v_1 取负值才表示电场在第二介质中是一按指数衰减的衰减场。同时上式也说明全反射条件下，在第二介质中电场的等幅面和等位相面是不一致的。等幅面垂直于 z 轴，而等位相面垂直于 x 轴。

为了把菲涅尔公式（1.1.2-19）和（1.1.2-20）应用到全反射情况，只需

作如下修改，即使 $xu_1=0$， $iv_1=n_1\cos\theta_1$，于是有

$$r_s=\frac{n_0\cos\theta_0-iv_1}{n_0\cos\theta_0+iv_1}\equiv\left|r_s\right|e^{i\varphi_s} \qquad (1.1.2-21)$$

$$r_p=\frac{in_0v_1-n_1^2\cos\theta_0}{in_0v_1+n_1^2\cos\theta_0}=\frac{n_0v_1+in_1^2\cos\theta_0}{n_0v_1-in_1^2\cos\theta_0}\equiv\left|r_p\right|e^{i\varphi_p} \qquad (1.1.2-22)$$

在全反射情况下，反射光将发生位相变化。式（1.1.2-21）（1.1.2-22）中，$\left|r_s\right|=\left|r_p\right|=1$。两式都具有 $\tilde{z}\left(\tilde{z}^*\right)^{-1}$ 这种形式，因此 α 是 $\tilde{z}$ 的幅角（即 $\tilde{z}=ae^{i\alpha}$，其中 a 和 α 都是实数），则

$$e^{i\alpha}=\tilde{z}\left(\tilde{z}^*\right)^{-1}=e^{2i\alpha}$$

即

$$\tan\frac{\varphi}{2}=\tan\alpha$$

因此

$$\tan\frac{1}{2}\varphi_s=\frac{-\upsilon_1}{n_0\cos\theta_0}=\frac{\left(\sin^2\theta_0-n_1^2/n_0^2\right)^{1/2}}{\cos\theta_0} \qquad (1.1.2-23)$$

$$\tan\frac{1}{2}\varphi_p=\frac{n_1^2\cos\theta_0}{n_0\upsilon_1}=\frac{n_1^2/n_0^2\bullet\cos\theta_0}{\left(\sin^2\theta_0-n_1^2/n_0^2\right)^{1/2}} \qquad (1.1.2-24)$$

由此可见，两个分量受到不同的位相跃变，因此线偏振光经全反射后通常也变成椭圆偏振光。

对相对位相差 $\Delta=\varphi_s-\varphi_p$，有

$$\tan\frac{\Delta}{2}=\frac{\tan\varphi_s/2-\tan\varphi_p/2}{1+\tan\varphi_s/2\bullet\tan\varphi_p/2}=\frac{\sin^2\theta_0}{\cos\theta_0\left(\sin^2\theta_0-n_1^2/n_0^2\right)^{1/2}} \qquad （1.1.2-25）$$

1.1.3 光学薄膜特性的理论计算

单层介质薄膜的反射率

在上一节中我们曾讨论了平面电磁波在单一界面上的反射和折射。在界面上应用边界条件可以写出

$$\eta_1E_1=\eta_0E_0^+-\eta_0E_0^-=H_0 \qquad （1.1.3-26）$$

$$E_1 = E_0^+ + E_0^- = E_0 \qquad (1.1.3\text{-}27)$$

因为应用边界条件写出的 p^- 分量和 s^- 分量的等式形式是相同的，所以不再分别 p^- 分量和 s^- 分量的情形。同时除了另作说明外，E 和 H 都是指电场或磁场的切向分量，不再指明下标 t。

在光学上，处于两个均匀媒质之间的均匀介质膜的性质特别重要，因此我们将比较详细地来研究这一情况。我们假定，所有媒质都是非磁性的（$\mu_r = 1$）。

如图 1.1.4 所示，单层薄膜的两个界面在数学上可以用一个等效的界面来表示。膜层和基底组合的导纳是 Y，由式（1.1.2-26）和（1.1.2-27），可以知道

$$Y = H_0 / E_0$$

式中，$Y = H_0/E_0$，$E_0 = E_0^+ + E_0^-$。

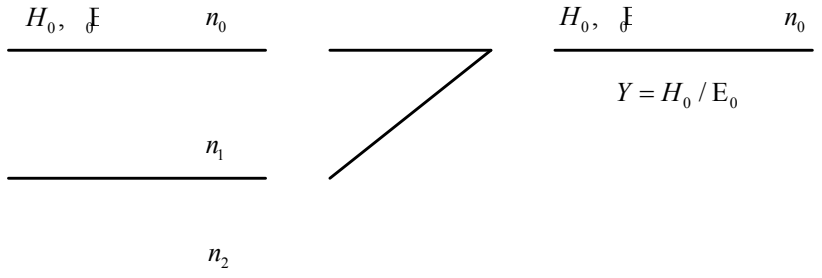


图 1.1.3-4 单层薄膜的等效界面

于是如同单一界面的情形，单层膜的反射系数可表示为

$$r = (\eta_0 - Y)/(\eta_0 + Y)$$

只要确定了组合导纳 Y，就可以方便地计算单层膜的反射和透射特性。因此问题就归纳为求取入射界面上 H_0 和 E_0 的比值。上面我们推到组合导纳 Y 的

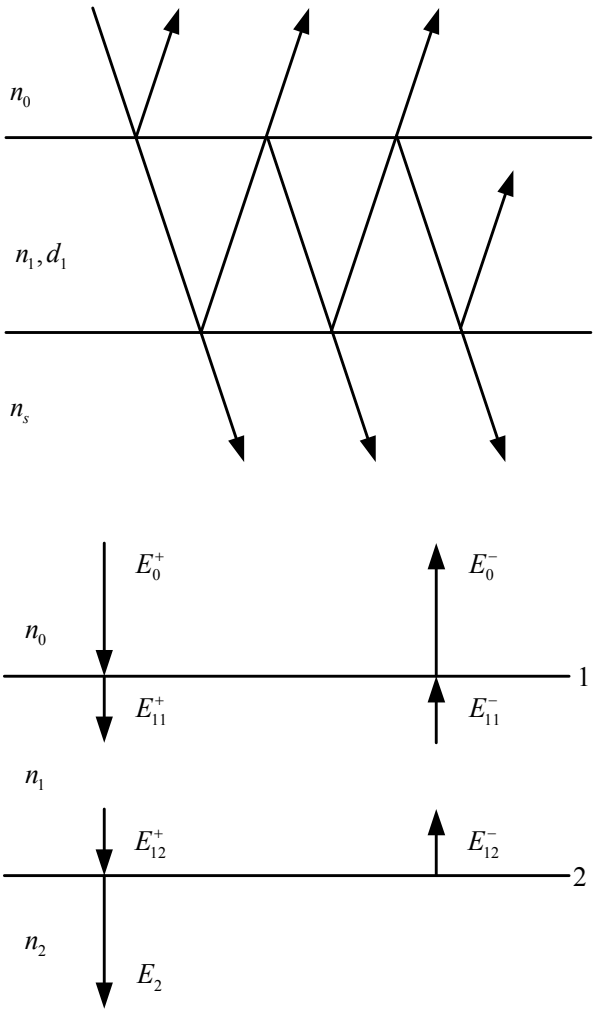


图 1. 1. 3-5 单层膜的电场

如图 1.1.3-5 所示，薄膜上下界面上都有无数次反射，为便于处理，我们归并所有同方向的波，正方向取＋号，负方向取－号。E_{11}^+ 和 E_{12}^+ 是指在界面1和2 上的 E_1^+，符号 E_{11}^-，E_{12}^-，E_{12}^- 和 H_{12}^+ 等具有同样的意义。

现在在界面1，应用 E 和 H 的切向分量界面两侧连续的边界条件写出：

$$E_0 = E_0^+ + E_0^- = E_{11}^+ + E_{11}^-$$

$$H_0 = H_0^+ + H_0^- = \eta_1 E_{11}^+ - \eta_1 E_{11}^-$$

对于另一界面2上具有相同坐标的点，只要改变波的位相因子，就可确定它们在同一瞬时的状况。正向行进的波的位相因子应乘以$e^{-i\delta_1}$，而负向行进的波的位相因子应乘以$e^{i\delta_1}$。其中

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \cos\theta_1$$

即

$$E_{12}^{+} = E_{11}^{+} e^{-i\delta_1}, E_{12}^{-} = E_{11}^{-} e^{i\delta_1}$$

所以

$$E_0 = E_{12}^{+} e^{i\delta_1} + E_{12}^{-} e^{-i\delta_1}$$

$$H_0 = \eta_1 e^{i\delta_1} E_{12}^{+} - \eta_1 e^{-i\delta_1} E_{12}^{-}$$

这可用矩阵的形式写成

$$\begin{bmatrix} E_0 \\ H_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{i\delta_1} & e^{-i\delta_1} \\ \eta_1 e^{i\delta_1} & -\eta_1 e^{-i\delta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{12}^{+} \\ E_{12}^{-} \end{bmatrix} \qquad (1.1.3\text{-}28)$$

在基片中没有负向行进的波，于是在界面2应用边界条件可以写成

$$E_2 = E_{12}^{+} + E_{12}^{-}$$

$$H_2 = \eta_1 E_{12}^{+} - \eta_1 E_{12}^{-}$$

因此

$$E_{12}^{+} = \frac{1}{2} E_2 + \frac{1}{2\eta_1} H_2$$

$$E_{12}^{-} = \frac{1}{2} E_2 - \frac{1}{2\eta_1} H_2$$

写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} E_{12}^{+} \\ E_{12}^{-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2\eta_1} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2\eta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_2 \\ H_2 \end{bmatrix}$$

将此式代入式（1.1.3-28），得

$$\begin{bmatrix} E_0 \\ H_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{i\delta_1} & e^{-i\delta_1} \\ \eta_1 e^{i\delta_1} & -\eta_1 e^{-i\delta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2\eta_1} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2\eta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_2 \\ H_2 \end{bmatrix} \qquad (1.1.3\text{-}29)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\delta_1 & \frac{i}{\eta_1}\sin\delta_1 \\ i\eta_1 \sin\delta_1 & \cos\delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_2 \\ H_2 \end{bmatrix}$$

因为E和H的切向分量在界面两侧是连续的，而且由于在基片中仅有一正向行进的波，所以式（1.1.3-29）就把入射界面的E和H的切向分量与透过最后界面的E和H的切向分量联系起来。又因为

$$H_0 = YE_0$$
$$H_2 = \eta_2 E_2$$

于是式（1.1.3-29）可以写成

$$E_0 \begin{bmatrix} 1 \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta_1 & \frac{i}{\eta_1}\sin\delta_1 \\ i\eta_1 \sin\delta_1 & \cos\delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} E_2$$

令

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta_1 & \frac{i}{\eta_1}\sin\delta_1 \\ i\eta_1 \sin\delta_1 & \cos\delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \qquad (1.1.3\text{-}30)$$

$$\text{矩阵} \begin{bmatrix} \cos\delta_1 & \frac{i}{\eta_1}\sin\delta_1 \\ i\eta_1 \sin\delta_1 & \cos\delta_1 \end{bmatrix}$$

称为薄膜的特征矩阵。它包含了薄膜的全部有用的参数。其中$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \cos\theta_1$；对$p^-$分量，$\eta_1 = n_1/\cos\theta_1$，而对$s^-$分量，$\eta_1 = n_1\cos\theta_1$。后面我们将会看到，在分析薄膜特性时，这一矩阵式非常有用的。

矩阵$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix}$定义为基片和薄膜组合的特征矩阵。显然，由

$$Y = C/B \tag{1.1.3-31}$$

得

$$Y = \frac{\eta_2 \cos\delta_1 + i\eta_1 \cos\delta_1}{\cos\delta_1 + i\left(\eta_2/\eta_1\right)\sin\delta_1} \tag{1.1.3-32}$$

故振幅反射系数为

$$r = \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} = \frac{\left(\eta_0 - \eta_2\right)\cos\delta_1 + i\left(\eta_0\eta_2/\eta_1 - \eta_1\right)\sin\delta_1}{\left(\eta_0 + \eta_2\right)\cos\delta_1 + i\left(\eta_0\eta_2/\eta_1 + \eta_1\right)\sin\delta_1}$$

能量反射率为

$$R = rr^* = \frac{\left(\eta_0 - \eta_2\right)^2\cos^2\delta_1 + \left(\eta_0\eta_2/\eta_1 - \eta_1\right)^2\sin^2\delta_1}{\left(\eta_0 + \eta_2\right)^2\cos^2\delta_1 + \left(\eta_0\eta_2/\eta_1 + \eta_1\right)^2\sin^2\delta_1} \tag{1.1.3-33}$$

由$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix}$矩阵的表达式可以知道，当薄膜的有效光学厚度为$1/4$波长的整数倍时，即

$$nd\cos\theta = m\frac{\lambda_0}{4}$$

或其位相厚度为$\frac{\pi}{2}$的整数倍，即

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0}\bullet nd\cos\theta = m\frac{\pi}{2}$$

$$\left(m = 1,\quad 2,\cdots\right)$$

在参考波长处会出现一系列的极值。

对于厚度为$\lambda_0/4$奇数倍，即$m = 1,\quad 3,\cdots$的情形，有

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \pm i/\eta_1 \\ \pm i\eta_1 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 \\ \eta_s \end{bmatrix}$$

$Y = C/B = \eta_1^{\,2}/\eta_s$，这通常称为四分之一波长法则。

$$R_{ext} = \left[\left(\eta_0 - \eta_1^{\,2}/\eta_s\right)\Big/\left(\eta_0 + \eta_1^{\,2}/\eta_s\right)\right]^2$$

而对于厚度为 $\lambda_0/4$ 偶数倍，即 $m=2,\ 4,\cdots$ 的情形，

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pm 1 & 0 \\ 0 & \pm 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_s \end{bmatrix}$$

$$Y = C/B = \eta_s$$

$$R_{ext} = \left[(\eta_0 - \eta_s)/(\eta_0 + \eta_s) \right]^2$$

在参考波长 λ_0 处，它对于膜系的反射或透射特性没有任何影响，因此被称为“虚设层”。当然在其他波长上，薄膜的特征矩阵不再是单位矩阵，对膜系的特性是具有影响的。因而半波长厚度的虚设层通常用于平滑膜系的分光特性。当厚度为 $1/4$ 波长的奇数倍时，反射率是极大还是极小，视薄膜的折射率是大于还是小于基片的折射率而定。当膜的光学厚度取 $\lambda_0/2$ 的整数倍时，反射率也是极值，且视它们的折射率而定，只是情况恰巧相反。这些结果表示在图 1.1.3-6 上。

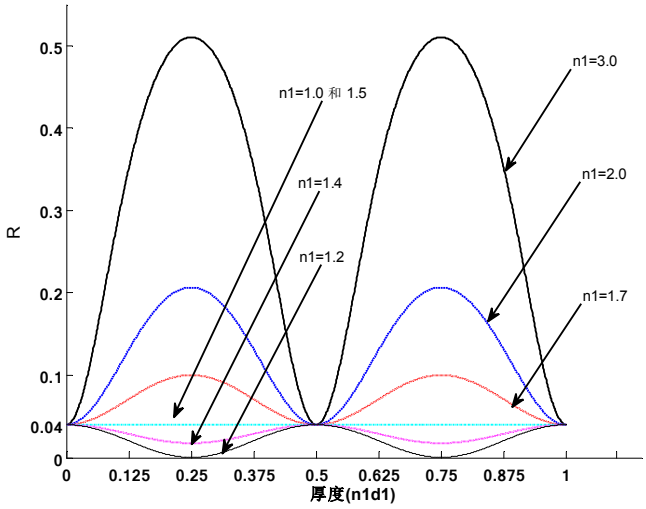


图 1.1.3-6 单层介质膜的反射率随其光学厚度的变化关系

膜的折射率为 $n_1, n_0 =$ 1.0 $n_2 =$ 入射角 $\theta_0 = 0$

由于1/4波长厚度的薄膜在多层膜设计中用得非常广泛，因而有一些简便的速写符号。

任务 1.2 光学薄膜设计

1.2.1 增透膜设计

20 世纪 30 年代发现的增透膜促进了薄膜光学的早期发展。对于推动光学技术发展来说，在所有的光学薄膜中，增透膜起着最重要的作用。直至今天，就其生产的总量来说，它仍然超过所有其他类型的薄膜。因此，研究增透膜的设计和制备技术，对于生产实践有着重要的意义。

1.2.1.1 单层增透膜

对于最简单的增透膜，使在玻璃表面上镀一层低折射率的薄膜，如图 1.2.1-1 所示，

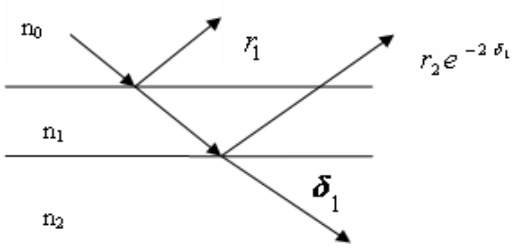


图 1.2.1-1 单层减反射膜矢量图

在界面 1 和 2 上的振幅反射系数r_1和r_2为

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}, r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \qquad (1.2.1\text{-}1)$$

从矢量图上可以看到，合振幅矢量随着r_1和r_2之间的夹角$2\delta_1$而变化，合矢量端点的轨迹为一圆周。当膜层的光学厚度为某一波长的 1/4 时，则两个矢量的方向完全相反，合矢量成为最小

$$r=\left|r_1-r_2\right|,\quad R=r^2 \qquad (1.2.1\text{-}2)$$

这时如果矢量的模相等，即$\left|r_1\right|=\left|r_2\right|$，则对该波长而言，两个矢量将完全抵消，出现零反射率。

欲使$\left|r_1\right|=\left|r_2\right|$，必须使

$$\frac{n_0-n_1}{n_0+n_1}=\frac{n_1-n_2}{n_1+n_2} \qquad (1.2.1\text{-}3)$$

即$n_1=\sqrt{n_0n_2}$，如$n_0=1$，则$n_1=\sqrt{n_2}$。

因此，理想的单层增透膜的条件是，膜层的光学厚度为1/4波长，其折射率为入射介质和基片折射率的乘积的平方根。

单层增透膜的出现，在历史上是一个重大的进展。直至今天仍广泛地用来满足一些简单的用途。但是它存在两个主要的缺陷，首先，对大多数应用来说，剩余反射还显得太高;此外，从未镀膜表面反射的光线，在色彩上仍保持中性，而从镀膜表面反射的光线破坏了色的平衡。作为变焦距镜头、超广角镜头和大相对孔径等复杂的透镜系统中的增透镀层，是不能符合要求的。

基本上有两个途径可以提高单层膜的性能，即或者采用变折射率的所谓非均匀膜，它的折射率随着厚度的增加呈连续的变化，或者采用几种折射率不同的均匀膜构成增透膜，即所谓多层增透膜。

在玻璃表面上，可用化学蚀刻方法制备折射率连续变化的耐久的增透膜。在波长从0.35μm到2.5μ m范围内，能有效地消除玻璃表面的反射，使反射率从8%左右(两个表面)减少到小于0.5%。这种方法是利用了碱性硼硅酸盐中的相分离现象，采用合理的热处理条件，碱性硼硅酸盐相应地分离成两个玻璃相。在一个相中，二氧化硅浓度高达96%左右，即不溶解的浓二氧化硅相；在另一个相中，氧化硼浓度较高，即可溶解的低二氧化硅相。这个可溶解的相，用许多材料(包括大多数无机酸)能够很容易地溶解，留下二氧化硅含量高的相作为多孔骨架的表面薄膜。由于这种薄膜的多孔性和毛细孔尺

寸小(半径小于 4.0nm)，所以其有效折射率比凝聚的二氧化硅薄膜的折射率低得多。这种多孔薄膜的折射率梯度，在利用相分离方法和化学蚀刻方法时是容易控制的。利用这种独特的技术制备的
微孔性薄膜，不仅在宽光谱范围内有低的反射率，而且具有惊人的耐久力。这种薄膜在太阳能的应用中是有价值的，在高能量应用(如激光)中也颇有潜力。

2.2.1.2 双层增透膜

对于高透射要求增透膜来说，使用任何一种基片以及常见的中红外薄膜材料，均很难达到接近 100%透射率的要求。为此，我们可以在基片上镀一层 $\lambda_0/4$ 厚的、折射率为 n_2 的薄膜，这时对于波长 λ_0 来说，薄膜和基片组合的系统可以用以折射率为 $Y=n_2^2/n_g$ 的假想基片来等价。显然，当 $n_2>n_g$ 时，有 $Y>n_g$。也就是说，在玻璃基片上先镀一层高折射率的 $\lambda_0/4$ 厚的膜层后，基片的折射率好像从 n_g 提高到 n_2^2/n_g，然后再镀上 $\lambda_0/4$ 厚的低折射率膜层就能起到更好的增透效果。

从上面的讨论可以知道，在限定两层膜的厚度都是 $\lambda_0/4$ 的前提下，欲使波长 λ_0 的反射光减至零，它们的折射率应满足如下关系

$$n_1=\sqrt{Yn_0}=\sqrt{(n_2^2/n_g)n_0} \qquad (1.2.1\text{-}4)$$

或

$$n_2=n_1\sqrt{n_g/n_0} \qquad (1.2.1\text{-}5)$$

如果外层膜确定用折射率为 1.38 的氟化镁，则内层膜的折射率取决于基片材料。当 n_g =1.52 时，有 n_2 =1.70；当 n_g =1.60 时，有 n_2 =1.75。由于能作镀层用的材料是有限的，因而选择折射率的余地也不大。这时我们也可以先确定能够实现的两层膜的折射率，然后通过调整膜层厚度实现零反射。确定膜层厚度的一个方便可行的方法是矢量法。

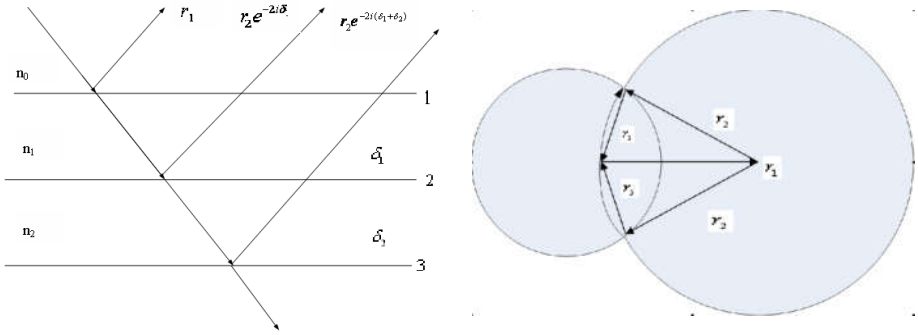


图 1.2.1-2 矢量法确定双层增透膜厚度的图解

图 1.2.1-2 所示，n_0 和 n_g 分别为入射介质和基片的折射率。n_1 和 n_2 为折射率已确定的低折射率和高折射率材料的膜层，δ_1 和 δ_2 便是特定的膜层位相厚度，以使波长 λ_0 的反射光能减至零。已知各界面上的振幅反射系数分别为

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad （通常 r_1 < 0）$$

$$r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad （r_2 < 0）$$

$$r_3 = \frac{n_2 - n_g}{n_2 + n_g} \quad （r_3 > 0）$$

只有当矢量模 r_1，r_2，r_3 以及其幅角组成封闭三角形，才能使合矢量为零。因此只需以 r_1 的始点和终点为圆心，分别以 r_2 和 r_3 为半径作两个圆，两个圆的交点就是满足合矢量为零这一条件的 r_2 和 r_3 头尾相接的点，然后从矢量图上即可量得 $2\delta_1$ 和 $2\delta_2$ 的值。

根据以上设计思想，求解 δ_1 和 δ_2，别可以确定双层增透膜系。

对于双层见反膜系，若不考虑膜层的吸收，设计的双层增透膜在参考波长处的透射率可达 100%。

双层增透膜的减反射性能比单层增透膜要优越得多。但它并没有克服单

层增透膜的上述两个主要缺陷，尤其是对于冕牌玻璃更是如此。

2.2.1.3 多层增透膜

正如上面所说的，双层增透膜的特性比单层膜要优越得多。但是，在许多应用例子里，即使是一个理想的双层膜，还是会形成过大的反射率或不适宜的光谱带宽度。因此在这些例子中都要用三层或者更多层的增透膜。许多多层增透膜是由 1/4 波长层或半波长层构成的，可以看作是 $\lambda_0/4$-$\lambda_0/2$ W 形膜和 $\lambda_0/4$-$\lambda_0/4$ V 形膜的改进形式。

$\lambda_0/4$-$\lambda_0/2$ W 型膜在低反射区的中央有一个反射率的凸峰，它相应于单层减反射膜的反射率极小值。为了降低这个反射率的凸峰，又要保持半波长层的光滑光谱特性的作用，可以将半波长层分成折射率稍稍不同的两个 1/4 波长层。例如对于下图所示的一个结构

$$1.0 \mid 1.38 \mid 1.90 \mid 1.52$$
$$\qquad\quad \frac{\lambda_0}{4} \quad \frac{\lambda_0}{2}$$

可以改变成

$$1.0 \mid 1.38 \mid 2.0 \mid 1.90 \mid 1.52$$
$$\qquad\quad \frac{\lambda_0}{4} \quad \frac{\lambda_0}{4} \quad \frac{\lambda_0}{4}$$

于是在参考波长 λ_0 处的反射率由 1.26%减少至 0.38%，当然，低反射区的宽度也显著地减小了。

为了增加低反射区的宽度，可以在基底上附加一层低折射率的半波长层。也可以在双层 V 形膜的基础上构造多层增透膜，例如在 $\lambda_0/4$-$\lambda_0/4$ V 形膜的中间插入半波长的光滑层，可以得到典型的 $\lambda_0/4$-$\lambda_0/2$-$\lambda_0/4$ 三层增透膜结构。

总的说来，多层组合的各个参数对反射特性的影响可归纳为:调节间隔层的厚度，即变化$|\pi-\theta|$曲线的位置和形状，可以使反射率极小值移到不同的波数位置上。改变第一层或第二层的厚度，可以使 R_1 曲线相对于 R_2 作水平移动，其结果就是改变低反射光谱的宽度以及反射率 R；利用不同的折射率值 n_1 和 n_3，可以使 R_1 和 R_2 曲线作相对的垂直移动。

1.2.2 高反膜的设计

对于光学仪器中的反射镜来说，单纯金属膜的特性已能满足常用要求，在某些应用中，若要求的反射率高于金属膜所能达到的数值，则可在金属膜上加镀额外的介质层，以提高他们的反射率，文献[28]报道了金属增强型中红外高反膜。但为了得到更高抗激光损伤阈值的薄膜，介质增强型金属膜很难达到要求，这就需要镀制全介质高反膜，由于这种介质高反膜具有最大的反射率和最小的吸收系数，因而光学薄膜的制备中得到了广泛应用。全介质高反膜的设计方法如下：

在折射率为n_g的基片上镀以光学厚度为$\lambda_0/4$的高折射率（n_1）的膜层后由于空气/膜层和膜层/基片界面的反射光同位相，使反射率大大增加。对于中心波长λ_0单层膜和基片组合的导纳为n_1^2/n_g，垂直入射的反射率为

$$R=(\frac{n_0-n_l^{\ 2}/n_g}{n_0+n_l^{\ 2}/n_g})^2 \tag{1.2.2-6}$$

用高、低折射率交替的，每层$\lambda_0/4$厚的介质多层膜能够得到更高的反射率。这是因为从膜系所有界面上反射的光束，当它们回到前表面时具有相同位相，从而产生相长干涉。对这样一组介质膜系，在理论上可望得到接近于100%的反射率。

如果n_H和n_L是高、低折射率层的折射率，并使介质膜系两边的最外层为高折射率层，其每层的厚度均为$\lambda_0/4$，则对于中心波长λ_0有

$$Y=(\frac{n_H}{n_L})^{2S}\frac{n_H^{\ 2}}{n_g} \tag{1.2.2-7}$$

式中，n_g是基片的折射率，2S+1 是多层膜的层数，因而，在空气中垂直入射时，中心波长λ0的反射率，也即极大值的反射率为

$$R=\left[\frac{1-(n_H/n_L)^{2S}(n_H^{\ 2}/n_g)}{1+(n_H/n_L)^{2S}(n_H^{\ 2}/n_g)}\right]^2 \tag{1.2.2-8}$$

n_H/n_L的值越大或层数越多，则反射率越高，如果

$$(n_H / n_L)^{2S}(n_H{}^2 / n_g) \gg 1 \qquad (1.2.2\text{-}9)$$

则

$$R \approx 1 - 4(n_L / n_H)^{2S}(n_g{}^2 / n_H)$$

$$T \approx 4(n_L / n_H)^{2S}(n_g{}^2 / n_H) \qquad (1.2.2\text{-}9)$$

这说明当膜系的反射率很高的，额外加镀两层将使膜系的透射率缩小 $(n_L / n_H)^2$ 倍。理论上只要增加膜系的层数，反射率可无限地接近 100%。实际上由于膜层中的吸收，散射损失，当膜系达到一定的层数时，继续加镀两层并不能提高其反射率，相反由于吸收、散射损失的增加，而使反射率下降。因此，膜系中的吸收和散射损耗限制了介质膜系的最大层数，在设计膜系时要综合考虑吸收和散射带来的影响。

对于高反膜的设计，一般应用多层规整膜系就能满足实际要求。图 2.1 为设计的膜系 G/（HL）^{n}H/AIR 的理论反射率曲线，平均理论反射率可以达 99.99%以上。

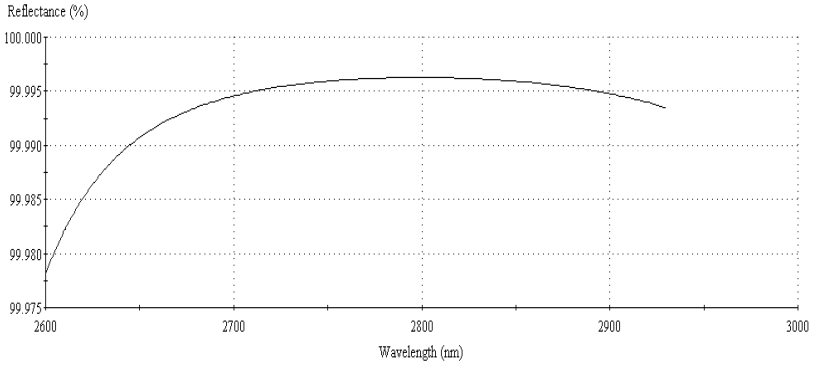


图 1.2.2-3 膜系 G/（HL）^{n}H/AIR 的理论反射率及吸收率曲线

（未考虑消光系数）

但实际镀制的薄膜，尤其是常规热蒸发下制备的光学薄膜会存在一定的吸收，消光系数不可忽略，因此在薄膜设计为了得到更优膜系，需要引入薄膜消光系。引入消光系数后设计的膜 G/（HL）^{n}H/AIR 反射率及吸收率曲线如图 1.2.2-4 所示，可见实际反射率有所下降。

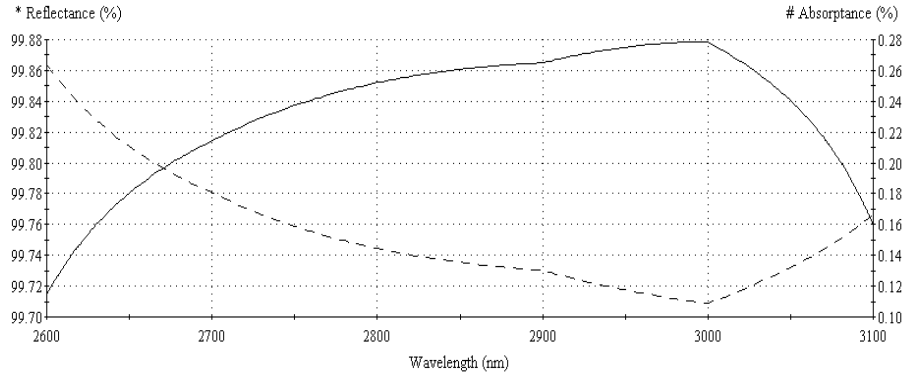


图 11.2.2-4 膜系 G/（HL）^{14}H/AIR 的理论反射率及吸收率曲线

（考虑消光系数）

1.2.3 其他类型光学薄膜设计

1、干涉滤光片

要求某一波长范围的光束高透射，而偏离这一波长区域的光束骤然变化为高反射(或称抑制)的干涉截止滤光片有着广泛的应用。通常我们把抑制短波区、透射长波区的滤光片称为长波通滤光片。相反，抑制长波区、透射短波区的截止滤光片称为短波通滤光片。

图 1.2.3-5 和 1.2.3--6 表示长波通和短波通滤光片的典型特性。滤光片的特性通常由下列参数确定：

（1)透射曲线开始上升(或下降)时的波长，以及此曲线上升(或下降)的许可斜率。

（2）高透射带的光谱宽度、平均透射率以及在此透射带内许可的最小透射率。

（3）反射带(或称抑制带)的光谱宽度以及在此范围内所许可的最大透射率。

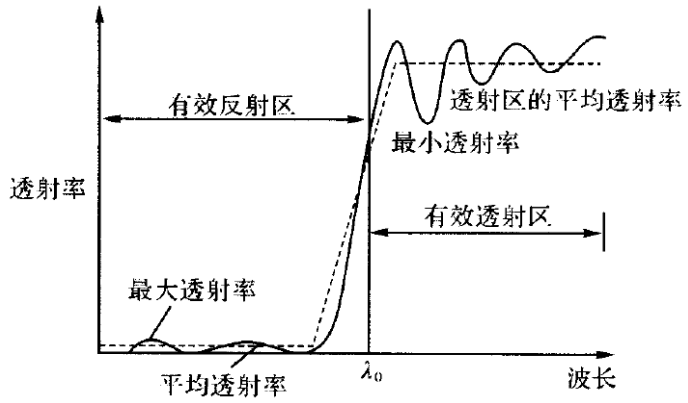


图 1.2.3-5 长波通滤光片的典型特性

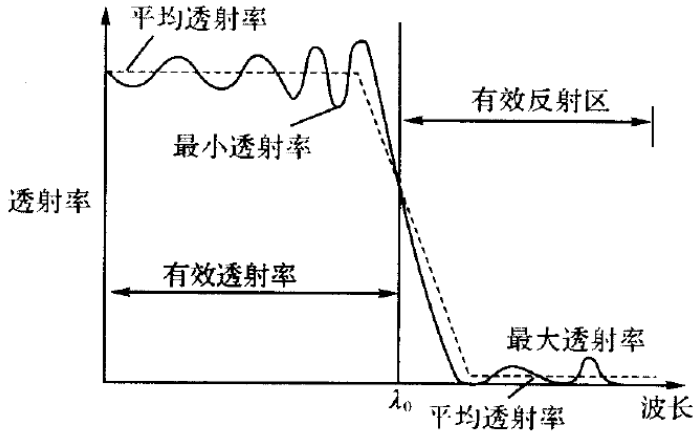


图 1.2.3--6 短波通滤光片的典型特性

2、分束镜

分束镜通常总是倾斜着使用，它能方便地把人射光分离成反射光和透射光两部分。如果反射光和透射光有不同的光谱成分，或者说有不同的颜色，这种分束镜通常称作为二向色镜。本节着重介绍的是中性分束镜，它把一束光分成光谱

成分相同的两束光，也即它在一定的波长区域内，如可见光区内，对各波长具有相同的透射率和反射率比，因而反射光和透射光呈中性。透射和反射比为 50/50 的中性分束镜最为常用。

常用的中性分束镜有两种结构，一种是把膜层镀在透明的平板上，如图 1.2.3--7(a)所示;另一种是把膜层镀在 45“的直角棱镜斜面上，再胶合一个同

样形状的棱镜，构成胶合立方体，如图 3-49(b)所示。平板分束镜，由于不可避免的象散，通常应用在中、低级光学装置上。对于性能要求较高的光学系统，可以采用棱镜分束镜。胶合立方体分束镜的优点是，在仪器中装调方便，而且由于膜层不是暴露在空气中，不易损坏和腐蚀，因而对膜层材料的机械、化学稳定性要求较低。但是胶合立方体分束镜的偏振效应较大也是显而易见的。

在一定的波长区域内的反射率几乎不变的薄膜或薄膜组合，都可以起中性分束的作用。常用的有金属分束镜和介质分束镜两类。

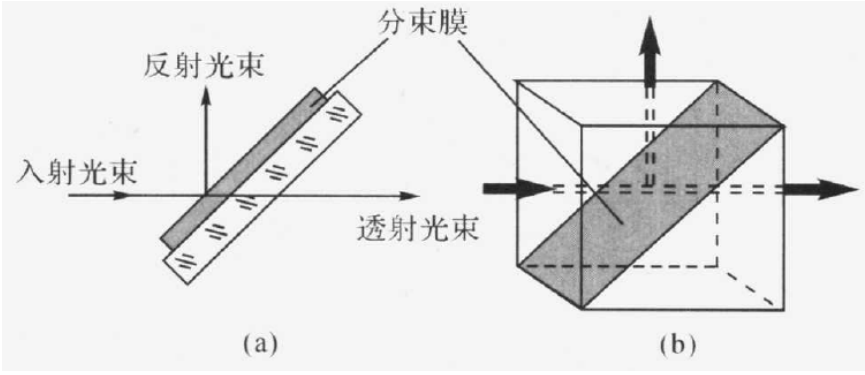


图 1.2.3--7 两种分束镜的结构

实训 1.2 光学增透膜设计

一、实训目的

1、 学习并初步掌握 Macleod 光学薄膜设计、分析软件的功能与使用方法。

2、 用常用材料设计远红外增透膜。

二、实训设备

计算机一台，Macleod 光学薄膜设计软件一套。

三、实训内容

1、选择材料，了解相应的光学常数（折射率等）；

2、按一定顺序和一定要求在介质上镀两层膜，观察在远红外范围内的

透射曲线，保存曲线；

3、对该膜层进行优化处理，得出经优化后的透射曲线与相应膜系，保存设计结果（曲线图形与膜系数据）；

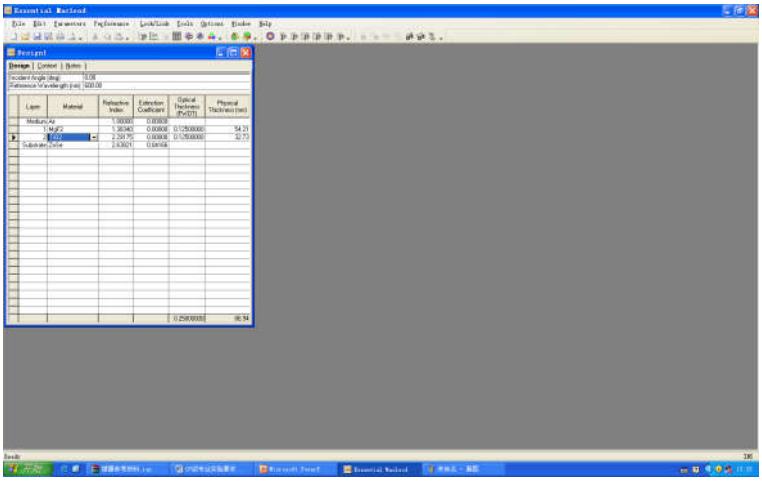
4、再用上述设计好的膜系创建一个膜堆。在基底两边都镀上前面设计的膜系，进行优化，得出经优化后的透射曲线，保存结果。

5、所有设计数据与曲线均以屏幕截图形式保存。图形也可用 origin 生成。

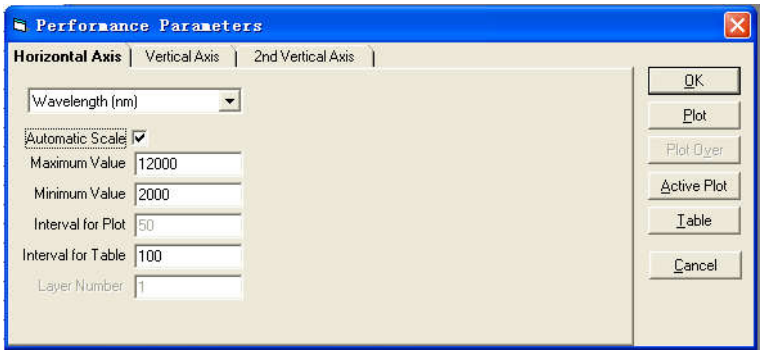
6、可根据个人的情况选作其他的内容。

四、软件使用说明

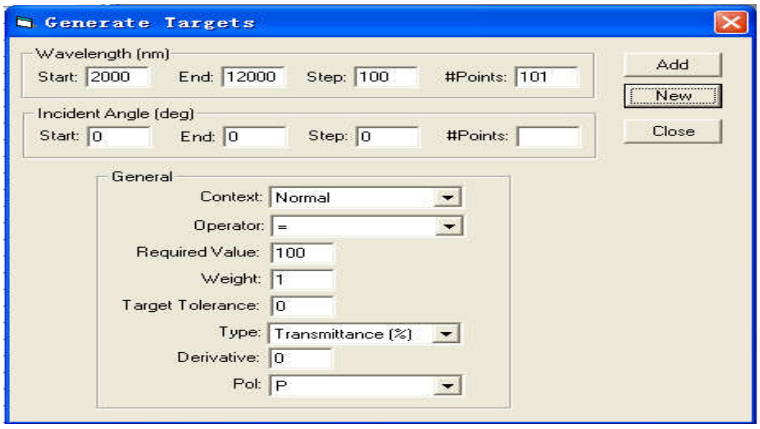
1.打开 Macleod 软件，点击 file—new—design，再点击 edit—insert layers，或者 delete layers，调整到介质有两个，如下图所示：



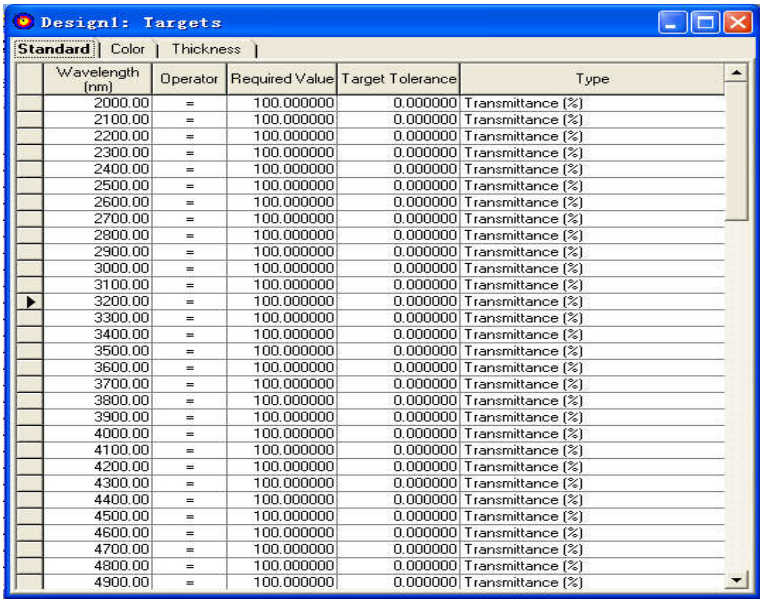
2.点击 paramaeter—performance，做出修改，如下图所示：



3. 点击 parameters — refinement — targets — edit — generate，进行数据修改，再点击 new，如下图所示：

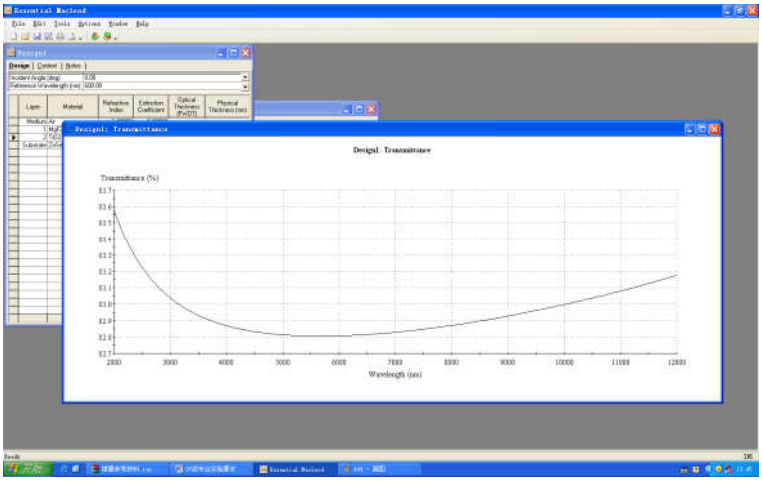


修改后 targets 文件为：

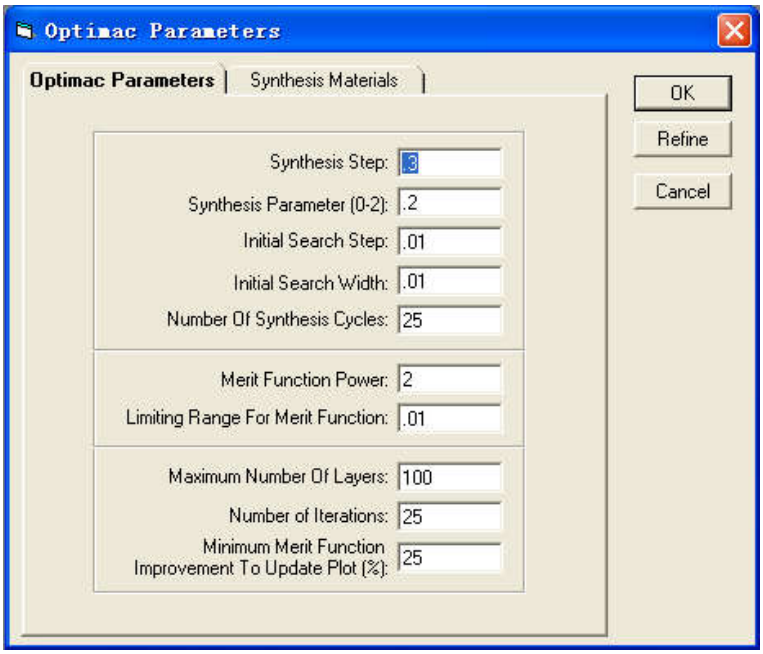


Wavelength (nm)	Operator	Required Value	Target Tolerance	Type
2000.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
2100.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
2200.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
2300.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
2400.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
2500.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
2600.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
2700.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
2800.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
2900.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
3000.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
3100.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
3200.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
3300.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
3400.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
3500.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
3600.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
3700.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
3800.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
3900.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
4000.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
4100.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
4200.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
4300.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
4400.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
4500.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
4600.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
4700.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
4800.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)
4900.00	=	100.000000	0.000000	Transmittance (%)

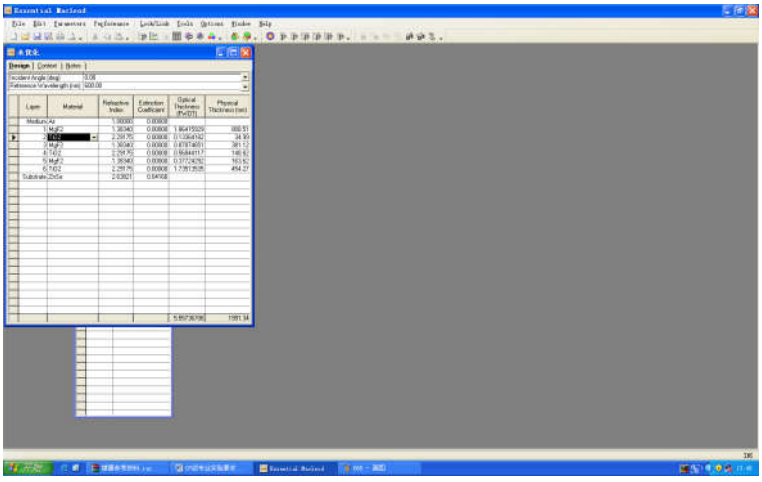
4.点击 performance—plot，生成图表：



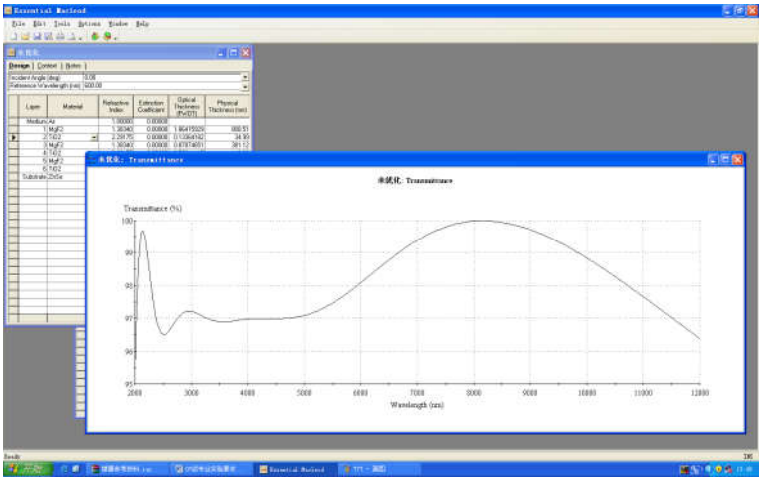
5.进行优化，parameter—refinement—optimac，如下图所示：



选择优化后最好数据：

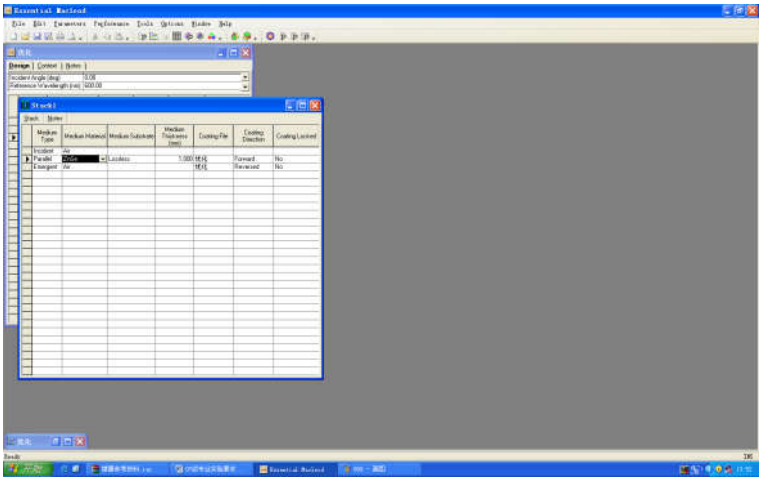


点击 performance—plot，生成图片：

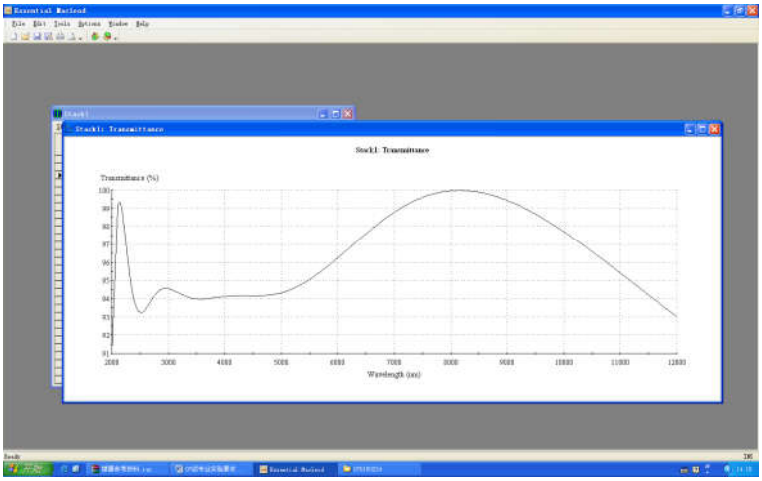


6.将所有数据进行保存

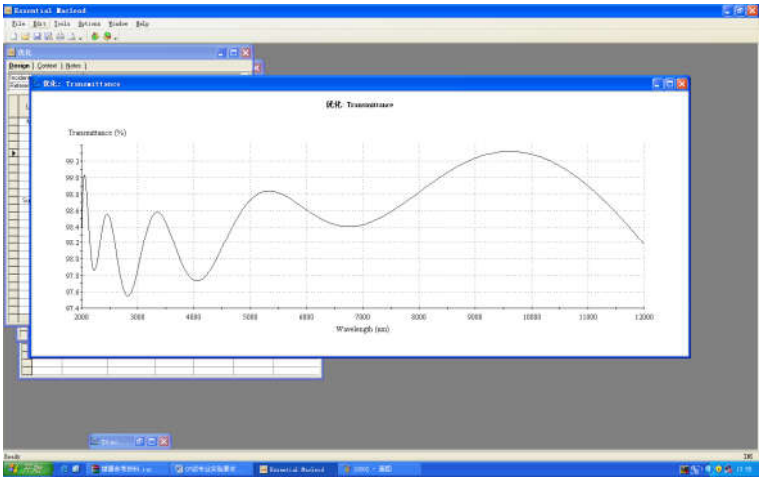
7.重新设计膜堆，点击 file—new—stack，在基地上镀上刚才设计好的膜系，具体表格如下：



8.重复步骤 2，3 和 4，生成图片：



9.膜堆优化，重复步骤 5，生成图形如下：



任务 1.3 光学薄膜材料

目前可供使用的光学薄膜材料虽已不下百余种，然而就其光学、机械和化学性质全面考虑，真正有用的材料却并不多。

1.3.1 金属薄膜材料

铝(Al)、银(Ag)、金(Au)等是应用很广的几种金属薄膜材料。它们具有反射率高、截止带宽、中性好和偏振效应小等优点。缺点是它们的吸收稍大，

机械强度较低。

不透明金属膜在空气中垂直入射时的反射率是：

$$R=\left(\frac{1-(n-ik)}{1+(n-ik)}\right)^2=\frac{(1-n)^2+k^2}{(1+n)^2+k^2} \qquad (1.3.1\text{-}1)$$

式中：n - ik 是金属膜的复折射率，n 和 k 分别称作折射率和消光系数。表 1.3.1-1 列出了几种常用金属膜的复折射率和由式(4-40)计算的反射率。假如透射率忽略不计，则金属膜的吸收率 A=1-R。迄今提供的金属膜的光学常数非常有限，故只能以大块材料的光学常数作参考。值得指出的是，薄膜中的折射率 n 和消光系数 k 分别低于和高于相同大块材料的折射率和消光系数。

表 1.3.1-1 常用金属薄膜的光学常数及反射率

Al				Ag				Au				Cu			
Λ/μm	n	k	R/%	Λ/μm	n	k	R/%	Λ/μm	n	k	R/%	Λ/μm	n	k	R/%
0.122	0.37	0.94	21.5	0.400	0.075	1.93	93.9	0.450	1.40	1.88	39.7	0.450	0.87	2.20	58.2
0.220	0.14	2.35	91.8	0.500	0.050	2.87	97.9	0.500	0.80	1.84	50.4	0.500	0.88	2.42	62.4
0.260	0.19	2.85	92.0	0.600	0.060	3.75	98.4	0.550	0.33	2.32	81.5	0.550	0.76	2.46	66.9
0.300	0.25	3.33	92.1	0.700	0.075	4.62	98.7	0.600	0.20	2.90	91.9	0.600	0.19	2.98	92.8
0.340	0.31	3.80	92.3	0.800	0.090	5.45	98.8	0.700	0.13	3.84	96.7	0.800	0.17	4.84	97.3
0.380	0.37	4.25	92.6	0.950	0.110	6.56	98.9	0.800	0.15	4.65	97.4	1.0	0.20	6.27	98.1
0.436	0.47	4.84	92.7	2.0	0.48	14.4	99.1	0.900	0.17	5.34	97.8	3.0	1.22	7.1	98.4
0.492	0.64	5.50	91.2	4.0	1.89	28.7	99.1	1.0	0.18	6.04	98.1	7.0	5.25	40.7	98.8
0.546	0.82	5.44	91.6	6.0	4.15	42.6	99.1	2.0	0.54	11.2	98.3	10.25	11.0	60.0	98.8
0.650	1.30	7.11	90.7	8.0	7.14	56.1	99.1	4.0	1.49	22.2	98.8				
0.700	1.55	7.00	88.8	10.0	10.69	69.0	99.1	6.0	3.00	33.0	98.9				
0.800	1.99	7.05	86.4	12.0	14.50	81.4	99.2	8.0	5.05	43.5	99.0				
0.950	1.75	8.50	91.2					10.0	7.41	53.4	99.0				
2.0	2.30	16.5	96.8					11.0	8.71	58.2	99.0				
4.0	5.97	30.0	97.5												
6.0	11.0	42.2	97.7												
8.0	17.0	55.0	98.0												
10.0	25.4	67.3	98.0												

光波在金属膜中的传播是呈指数衰减的，并可用朗伯定律来描述：

$$E = E_0 e^{-2\pi kd/\lambda} \qquad (1.3.1\text{-}2)$$

式中：E0 和 E 分别对应于人射光和厚度 d 处的光振幅，k 为金属膜的消光系数。因此，强度为

$$I = I_0 e^{-4\pi kd/\lambda} \qquad (1.3.1\text{-}3)$$

k 越大，透射光强衰减越快，所需的厚度越小。在红外区，• 由于 k 迅速增大，膜厚仍保持与可见光区相同或者甚至可以更薄。过大的厚度，金属膜的反射率非但不会提高，甚至反而下降，这是因为膜层颗粒度变粗导致散射增加。

金属膜的反射率与其测量方向有关，从空气侧测得的反射率比从玻璃侧测得的要高，而透射率则与测量方向无关。由于 T+R+A=1，所以基板侧的反射率降低意味着该侧的吸收必然增加。

表 1.3.1-2 列出了几种常用金属膜的光学、机械特性和制备工艺要素。

三种常用金属膜的特性和制备工艺

特　　性		Al	Ag	Au
反射率	紫外区	优	差	差
	可见区	中	优	差
	红外区	接近于 Ag	优	接近于 Ag
硬度		优	差	差
附着力		优	差	差
稳定性		中	差	优
制备工艺		高的真空度	高的真空度	高的真空度
		低基板温度	低基板温度	可高基板温度
		快蒸发	快蒸发	适当蒸发速率

可以看出，金属膜不仅吸收较大，而且膜层牢固性较差。为了缓解这些问题，常用的反射镜设计为 G | Al2O3+Ag+Al2O3+SiO2+TiO2 | A，其中两层 Al2O3 是作为增加 Ag 附着力的过渡层，第二层 Al2O3,和 SiO2 连同 Ag 的位相超前一起合成等效 1/4 波长厚度，其等效折射率为 nL , 1/4 波长 TiO2 层的折射

率为 nH。该膜系有两个作用。一是降低吸收。设 Ag 在可见光区的吸收为 3%，镀上 nL 和 nH 后，吸收降低了 n2L/n2H 倍，于是反射率提高到接近 99%。二是增加牢固率。SiO2 和 TiO2 同时作为保护膜使 Ag 强度显著提高。

1.3.2 介质和半导体薄膜材料

1、对材料的基本要求

对介质和半导体光学薄膜材料，以下几个方面的性质是很重要的，即透明度、折射率、机械牢固度和化学稳定性以及抗高能辐射。

（1）透明度

介质和半导体薄膜材料一般在一定的光谱区域是透明的。从能级图上看，介质材料的禁带很宽，价带中的束缚电子不能随意地通过禁带而到达导带，所以它们中的大部分在可见光区及近红外波段都是透明的。半导体材料相对于介质而言，它们的禁带宽度要窄得多，光激发后，价带中的价电子容易进入导带，所以它们的短波吸收限移向长波，一般它们在近红外区和红外区是透明的。

选择材料的原则总是使透明区有尽可能高的透明度，即尽可能小的消光系数。一般地说，高折射率材料在可见光区的消光系数比低折射率材料大 1~2 个数量级，因为高折射率材料的吸收波长 λc1 限更靠向长波。易分解的氧化物材料（TiO2 , Ta2O5 等）的消光系数比常用硫化物和氟化物（ZnS, MgF2 等）高是材料的化学计量和杂质引起的。就膜层结构来说，多晶薄膜的损耗最大，无定形为其次，单晶为最小。原因是多晶结构导致吸收散射增加。

（2）折射率

折射率是一个非常重要的参数，通常总希望折射率是确定的和可以重复的。薄膜的折射率主要依赖于下面几个因素。

材料种类：材料的折射率，是由它的价电子在电场作用下的性质决定的。材料的介电常数用 ε 表示，有

$$\varepsilon = 1 + 4\pi Na \qquad (1.3.2\text{-}4)$$

式中 N 和 a 分别为极化分子数和极化率。对各向同性材料，折射率即为

$$N = \sqrt{\varepsilon} \qquad (1.3.2\text{-}5)$$

若材料外层价电子很容易极化，则其折射率一定很高。随着元素原子量的增加，原子核中正电荷对外层电子的作用也被屏蔽得更厉害，结果表现为禁带宽度变窄而折射率增大。

对化合物，电子键结合的化合物要比离子键的折射率高。因为电子键化合物的离子性小，易于极化。同时折射率还随构成这些化合物元素的原子量或正离子价态的增大而提高，因为外层电子处于较松散的束缚状态，故离子性较弱。

据上所述，折射率大致按下列次序递增:卤化物，氧化物，硫化物和半导体材料。

波长：折射率因波长而异的现象称为色散，即 n=f(λ)。当折射率随波长增加而单调减小时称为正常色散；反之，称反常色散。正常色散位于透明区，而反常色散位于吸收带内。在电子论中把光的色散归结为材料原子中的电子在光波电场作用下发生迁移所致。因原子的偶极矩与原子中的电子的振动频率有关，后者取决于人射光波的频率 ω，故介电常数或折射率是入射光波频率的函数

$$\varepsilon = n^2 = \frac{4\pi N_0 e^2}{m_e(\omega_0^2 - \omega^2)} + 1 \qquad (1.3.2\text{-}6)$$

式中：N0 是单位体积材料的原子振子数，ω0 是电子固有频率，me 和 e 为电子质量和电荷量。在正常色散范围内，。越大，波长越短，则 n 越大。

表示折射率和波长的关系通常有三种色散方程，即

塞尔缪(Sellmeir)方程：$n^2 = A + \frac{B}{\lambda^2}$ 。

科契(Cauchy)方程：$n = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4$ 。

赫尔伯格(Herzberger)方程：$n = A + BL + CL^2 + D\lambda^2 + E\lambda^4$ 。

晶体结构：不同晶体结构能得到不同的折射率。例如 ZrO_2 室温下的无定形膜折射率约为 1. 67，300℃基板温度时为亚稳立方结构，折射率为 1. 94。TiO_2 膜的晶体结构随基板温度变化，可从无定形变到锐钛矿、金红石，在波长 550nm 的折射率从 1. 9 变到接近 2.6。

（3）机械牢固度和化学稳定性

为了获得牢固耐久的薄膜，对膜料有如下要求：膜料本身应具有良好的机械强度和化学性能；薄膜与基板、薄膜与薄膜之间要有良好的附着性；薄膜应力要尽可能小，而且其性质要相反(压应力和张应力)，以降低多层膜的积累应力。

应该指出的是，薄膜的机械性能和化学性能随着制备条件不同而存在着明显的差异。例如离子轰击及基片加热能使 ZnS 膜变得非常坚硬。所以在具体选择材料时，必须综合地考虑各种条件及其相互联系。此外，还要注意分析薄膜的具体应用条件，即胶合使用的场合不必过于追究机械和化学性能;用于潮湿空气中的薄膜，要求膜料的耐潮性能特别好;在海面应用的薄膜，主要考虑盐、碱对薄膜的作用;高温高寒环境下使用的薄膜，要注意分析温度对薄膜的影响;高能激光薄膜应着重考虑激光对薄膜的破坏，等等。

（4）抗高能辐射

激光、紫外辐射或高能粒子都可引起薄膜损伤，特别是在大功率激光系统中，薄膜受到激光的严重威胁。

激光对薄膜的破坏着重考虑两个方面：一是激光波长、激光脉冲宽度和重复频率；二是薄膜材料本身的特性，除了吸收外，还与薄膜结构、机械强度、附着力、应力、热稳定性、熔点、热导和热膨胀系数等密切相关。

对单层膜而言，阈值似乎随着薄膜材料的短波吸收限 λ_{c1} 增大而减小，随折射率和消光系数增加而降低，随牢固度增加而增大。对多层膜来说，损伤 A 值常介于其组成膜料的阈值之间，并与膜系结构、层数以及膜层之间的附着力、积累应力密切相关。

2、常用薄膜的性质

（1）氟化镁(MgF2)

氟化镁是薄膜制备中常用的材料之一，它在λ = 550nm 的折射率为1. 38，透明区为 0 .12~10μm。

氟化镁是所有低折射率的卤化物中最牢固的，特别是当基板温度 250℃左右时，非常坚硬耐久，因而在减反射膜中得到广泛应用。在多层膜中，它常与 ZnS , CeO2 或 Bi2O5 等组合。但是，由于 MgF2 膜具有很高的张应力(300~500MPa)，所以室温下或快速蒸发得到的 ZnS-MgF2 多层膜非常容易破裂。它与 CeO2 和 Bi2O5 的结合比 ZnS 好。

氟化镁蒸发时易于喷溅，其原因有：蒸发表面形成了一层熔点比 MgF2 更高的 MgO，材料蒸发次数越多，这种现象越严重；材料本身晶粒太细，除气预熔的气体来不及释放，所以选用一定晶态结构的块状材料是有利的。

氟化镁的聚集密度比较低，室温下可能低达 0.75 左右，在真空中测量的折射率是 1.32~1. 33，暴露于大气后，孔隙被折射率 1. 33 的水汽所填充，折射率上升到 1. 37。由于 MgF2 膜内气孔大小分布范围主要为 2~5 nm，所以吸潮过程比 NaA1F6 快得多。在基板温度高于 250℃时，膜层折射率接近大块材料之值，聚集密度接近于 1。

（2）硫化锌(ZnS)

硫化锌是用于可见光区和红外区的最重要的一种膜料。在可见光区，它常与低折射率的氟化物组合；在红外区，与高折射率的半导体材料组合。它的透明区域为 0. 38~14μm。在可见光区的折射率为 2.3~2.6，而在红外区的折射率大约是 2.2。

蒸发 ZnS 时，它会分解成 Zn 和 S，但是在凝结过程中，Zn 和 S 又重新化合，所以仍能得到化学计量上近似一致的膜层。这种淀积机理能很好地解释 ZnS 的凝结系数随基板温度上升而下降的现象。在常规的蒸发速率下，当基板温度为 300℃以上时，ZnS 就可能停止凝结。由于 ZnS 淀积时在基板表面上以元素状态形成薄膜，所以即使在室温下淀积，其聚集密度亦相当高。ZnS 薄膜呈现压应力，也与这种生长机理相关。

直接用电阻加热蒸发 ZnS 常可出现两种现象：一是出现刺激性很强的 H2S；二是剩余的 ZnS 块料分解出 Zn 并发黑。这种 Zn 还可能氧化成高熔点的 ZnO，附着在 ZnS 表面，使 ZnS 难于蒸发。幸好 ZnO 和 ZnS 的折射率非常接近，所以即使少量 ZnO 混入也无关紧要。若用电子束蒸发，这种分解现象明显减少。电子束蒸发的 ZnS 膜具有闪锌矿立方结构，而用舟蒸发得到的是闪锌矿和纤锌矿的混合物，后者对高温不太稳定。ZnS 膜在空气中经紫外线照射后会

转变为 ZnO，这是 S 升华后与 O2 再化合的结果。

淀积在室温基板上的 ZnS 膜，牢固性是很差的。改善其牢固度的措施是：(1)离子轰击，并在轰击结束后尽快蒸发；(2)基板烘烤，温度为 150 ~200℃；(3)老化处理，在空气中 250~30℃温度烘烤 4 小时。

（3）二氧化钛(TiO2)

二氧化钛薄膜折射率高，牢固稳定，在可见和近红外区呈透明，这些优异的性能使它在光学薄膜应用中十分诱人。但是，TiO2 材料在真空中加热蒸发时因分解而失氧，形成高吸收的亚氧化钦薄膜 TinO2n-1(n=1，2，…，10)，故常采用反应蒸发技术。

在离子氧中蒸发低价氧化物 TiO, Ti2O3 和 Ti3O5。获得了优良的 TiO2 膜。TiO 的熔点既低于金属钦，又低于 TiO_2，可以用电子束或钨舟进行蒸发。由于 TiO 严重缺氧，所以需在较高的气压(如 3×10^{-2} 帕)和较低的蒸发速率(0.3 nm/ s)下沉积。采用电子衍射确定不同基板温度下多晶 Ti0:膜的结构表明:当基板温度 T_s > 380℃呈金红石，膜层折射率增加，吸收增大。在中性氧中制备的 TiO_2 膜，其消光系数比离子氧中得到的高 10 倍左右。

Ti_2O_3 的热性质比较稳定，蒸发过程中吸氧作用很强。通过选择适当的参数，不难获得折射率 2.2~2.3 的无吸收 TiO_2 膜。由于它的缺氧情况比 TiO 要好，所以蒸发速率可以适当提高(约 0. 5nm/s) 。Ti_2O_3 作初始材料时，在中性氧中的吸收要比 TiO 高得多。在离子氧中蒸发时，其吸收强烈地依赖于基板温度；在室温下则得到与 TiO 相当的吸收。

用质谱仪分析了 TiO， Ti_2O_3， Ti_3O_5 和 TiO_2 作为初始材料的蒸气组分发现，初始膜料 TiO 和 Ti_2O_3 随着蒸发量增加，氧含量增加，折射率降低；TiO_2 则氧含量减小，折射率升高。唯有 Ti_3O_5 氧含量不变，能够得到稳定的折射率。

鉴上所述，不论采用何种初始材料，都得不到纯 TiO_2 膜，其氧化程度直接决定了膜层的吸收大小。实验表明，TiO_2 膜的吸收和折射率均随着基板温度和蒸发速率的升高而增加，随着氧压升高而降低。在空气中加热处理能有效地减少膜内的低价氧化物，TiO， Ti_2O_3 和 Ti_3O_5 转变成 TiO_2 的温度分别为 200℃, 250~350℃和大于 350℃。此外，TiO_2 膜中掺杂一定量的 Ta_2O_5 等，也可使吸收降低。TiO_2 膜长期暴露于紫外线，会导致波长小于 454nrn 的短波区吸收增加。

（4）二氧化硅(SiO_2)

二氧化硅是唯一例外的分解很小的低折射率氧化物材料，其折射率为 1.46，透明区一直延伸到真空紫外((0. 18~8μm)。它的光吸收很小，膜层牢固，且抗磨耐腐蚀，应用极其广泛。

SiO_2 在高温蒸发时与 TiO_2 类似，也可生成低价氧化物 SiO 和 Si_2O_3。这种低价氧化物常比高价氧化物易蒸发，所以薄膜中往往具有复杂的成分。

根据氧化硅吸收带的位置，我们可以粗略地判断膜的成分。三种硅氧化物的吸收带位置分别是：SiO：10. 0~10. 2μm； Si_2O_3：9. 6~9. 8μm 和 11. 5μm；SiO_2 ： 9.0~9. 5μm 和 12. 5μm。一旦用分光光度计测出它们的红外透射特性，那就容易推知膜层成分。

SiO_2 膜的结构精细，呈网络状玻璃态，不但散射吸收小，而且保护能力极强。

上面四种膜料，前两种称软膜，后两种称硬膜。一般说来，氟化物、硫化物属软膜，而氧化物属硬膜。

1. 3. 3 金属膜与介质膜的比较

表 1.3.3-3 列出了金属膜和介质膜的理想性质。实际的材料或多或少地

会偏离这些理想材料，如介质有一定的消光系数 k，而金属也有一定的实数折射率 n。如果它们都很小，则金属膜和介质膜的导纳 y 分别简单地表示为 -ik 和 n。

表 1.3.3-3 金属与介质膜的主要差别

金属膜	应用	介质膜	应用
k∝λ y= -ik β=2πkd/λ=常数 y∝λ R 随着 λ 增大而增大 高的损耗 较厚膜无干涉效应	利用其反射率高、截止宽、偏振小、制备简单，在反射镜、诱导透射滤光片和消偏振薄膜等场合广泛使用	k= 0 y= n δ=2πkd/λ∝1/λ y= 常数 T 随着 λ 增大而增大 低的损耗 具有干涉效应	利用其吸收小、选择性反射、设计参数多、膜层强度高等特点，在低损耗高反射膜、高透射带通滤光片、截止滤光片以及各种复杂膜系方面广泛应用

介质膜具有干涉效应，具有随波长或厚度的变化而呈周期性变化的性质。位相厚度 δ=2πnd/λ 是一个最重要的量，随着 λ 增加，δ 变小。因为 n 变化很小，所以长波区域薄膜的特性比短波区域有所减弱。金属膜不具有任何周期性的性质，它的反射率简单地与位相厚度 δ 和 k 一起增加或减小。由于 δ 基本上是恒定的，而 k 随 λ 的增大而增加，因此金属膜的性质与 λ 有着更大的相关性，且长波区域的特性比短波区域有所增强。

项目 2 光学薄膜制备技术

任务 2.1 真空及真空设备

2.1.1 真空技术知识及主要术语定义

真空蒸发、溅射镀膜等常称为物理气相沉积（Physical Vapor Deposition，简称 PVD 法）是基本的薄膜制作技术。它们均要求淀积薄膜的空间要有一定的真空度。因此，真空技术是薄膜制作技术的基础，获得并保持所需的真空环境，是镀膜的必要条件。所以，掌握真空的基本知识是必要的。

一、真空及其单位

所谓真空是指低于一个大气压的气体空间。同正常的大气相比，是比较稀薄的气体状态。当气体处于平衡时，可得到描述气体性质的气体状态方程，即

$$P = knT \qquad (2.1.1\text{-}1)$$

或

$$PV = \frac{m}{M}RT \qquad (2.1.1\text{-}2)$$

式中，P 为压强（Pa）；n 是气体分子密工（个/m^3），V 为体积（m^2）；M 为气体分子量（kg/mol）；m 是气体质量（kg）；T 是绝对温度（K）；k 是玻尔兹曼常数（1.38×10^{-23}J/K）；R 为气体普适常数（8.314J/mol·K），也可用 $R = N_A \cdot k$ 来表示，N_A 是阿伏伽德罗常数（6.023×10^{23} 个/mol）。于是，由式（1-1）可得

$$n = 7.2\times10^{22}\frac{P}{T} \quad （个/m^3） \qquad (2.1.1\text{-}3)$$

由式(1-3)可知，在标准状态下，任何气体分子的密度约为 3×10^{10} 个/cm^3。即使在 $P = 1.3\times10^{-11}$Pa(1×10^{-13}Torr)这样很高的真空度时，T=293K，则 $n = 4\times10^3$ 个/cm^3。因此，所谓真空是相对的，绝对的真空是不存在的。通常所详的真空是一种“相对真空”。

在真空技术中对于真空度的高低，可以用多个参量来度量，最常用的有“真空度”和“压强”。此外，也可用气体分子密度、气体分子的平均自由程、形成一个分子层所需的时间等来表示。“真空度”和“压强”是两个概念，不能混淆，压强越低意味着单位体积中气体分子数愈少，真空度愈高，反之真空度越低则压强就越高。由于真空度与压强有关，所以真空的度量单位是用压强来表示。

在真空技术中，压强所采用的法定计量单位是帕斯卡（Pascal），系千克米秒制单位，简称帕（Pa），是目前国际上推荐使用的国际单位制（SI）。托（Torr）这一单位在最初获得真空时就被采用，是真空技术中的获特单位。两者的关系为 1Torr = 133.322Pa。目前在实际工程技术中几种旧的单位（Torr，

mmHg，bar，atm）仍有采用，另外，完全改变以前的试验数据并不容易，因而压强单位也采用 Torr。现将几种旧的单位与 Pa 之间的转换关系介绍如下：

毫米汞柱（mmHg）　　1mmHg = 133.322Pa；

托（Torr）　　1Torr = $\frac{1}{760}$ atm = 133.322Pa；

atm 表示标准大气压，毫米汞柱与托在本质上是一回事，二者几乎相等（1mmHg = 1.00000014Torr），只是采用帕来定义标准大气压省略了尾数的缘故。

巴（bar）　　1bar = 10^5Pa。

二、真空区域的划分

为了研究真空和实际应用方便，常把真空划分为粗真空、低真空、高真空和超高真空四个等级。随着真空度的提高，真空的性质将逐渐变化，并经历由气体分子数的量变到真空质变的过程。

1．粗真空（1×10^5～1×10^2Pa）

在粗真空状态下，气态空间的特性和大气差异不大，气体分子数目多，并仍以热运动为主，分子之间碰撞十分频繁，气体分子的平均自由程很短。通常，在此真空区域，使用真空技术的主要目的是为了获得压力差，而不要求改变空间的性质。电容器生产中所采用的真空浸渍工艺所需的真空度就在此区域。

2．低真空（1×10^2～1×10^{-1}Pa）

此时每立方厘米内的气体分子数为 10^{16}～10^{13} 个。气体分子密度与大气时有很大差别，气体中的带电粒子在电场作用下，会产生气体导电现象。这时，气体的流动也逐渐从粘稠滞流状态过渡到分子状态，这时气体分子的动力学性质明显，气体的对流现象完全消失。因此，如果在这种情况下加热金属，可基本上避免与气体的化合作用，真空热处理一般都在低真空区域进行。此外，随着容器中压强的降低，液体的沸点也大为降低，由此而引起剧烈的蒸发，而实现所谓“真空冷冻脱水”。在此真空区域，由于气体分子数减少，

分子的平均自由程可以与容器尺寸相比拟。并且分子之间的碰撞次数减少，而分子与容器壁的碰撞次数大大增加。

3．高真空（1×10^{-1}～1×10^{-6}Pa）

此时气体分子密度更加降低，容器中分子数很少。因此，分子在运动过程中相互间的碰撞很少，气体分子的平均自由程已大于一般真空容器的线度，绝大多数的分子与器壁相碰撞。因而在高真空状态蒸发的材料，其分子（或微粒）将按直线方向飞行。另外，由于容器中的真空度很高，容器空间的任何物体与残余气体分子的化学作用也十分微弱。在这种状态下，气体的热传导和内摩擦已变得与压强无关。

4．超高真空（＜1×10^{-6}Pa）

此时每立方厘米的气体分子数在 10^{10} 个以下。分子间的碰撞极少，分子主要与容器壁相碰撞。超高真空的用途之一是得到纯净的气体，其二，是可获得纯净的固体表面。此时气体分子在固体表面上是以吸附停留为主。

利用真空技术可获得与大气情况不同的真空状态。由于真空状态的特性，真空技术已广泛用于工业生产、科学实验和高新技术的研究等领域。电子材料、电子元器件和半导体集成电路的研制与生产与真空技术有着密切的关系。

三、稀有气体的基本性质

在真空技术中所遇到的是稀薄气体，这种稀薄气体在性质上与理想气体差异很小。因此，在研究稀薄气体的性质时，可不加修正地直接应用理想气体的状态方程。由式（2.1.1-1）大气层描述的气体状态方程反映了气体的 P、V、T、m 四个量之间的关系。该方程在特殊情况下，即可推导出有名的理想气体定律。

（1）波义定律　一定质量的气体，在恒定温度下，气体的压强与体积的乘积为常数。即

$$PV = C \qquad (2.1.1\text{-}4)$$

或

$$P_1V_1 = P_2V_2 \qquad (2.1.1\text{-}5)$$

（2）盖·吕萨克定律　一定质量的气体，在压强一定时，气体的体积与绝对温度成正比。

$$V = CT \qquad (2.1.1\text{-}6)$$

或

$$V = \frac{V_0}{T_0} \cdot T \qquad (2.1.1\text{-}7)$$

（3）查理定律　一定质量的气体，如果保持体积不变，则气体的压强与绝对温度成正比。

$$P = CT \qquad (2.1.1\text{-}8)$$

或

$$P = \frac{P_0}{T_0} \cdot T \qquad (2.1.1\text{-}9)$$

1、气体分子的速度分布

在一定容器中的气体分子处于不断的运动状态，它们相互间及和器壁之间无休止地频繁碰撞。各个分子的速度（大小和方向）是不相同的，在稳态时可满足一定的统计分布规律，通常称为麦克斯韦-玻尔兹曼分布。即在平衡状态下，当气体分子间的相互作用可以忽略时，分布在任一速度区间 v～$v+dv$ 内分子的几率为

$$\frac{dN}{N} = 4\pi\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} \exp(-mv^2/2kT)v^2 dv \qquad (2.1.1\text{-}10)$$

式中，N——容器中气体分子总数；m——气体分子质量；

T——气体温度（K）；k——玻尔兹曼常数。

显然，在不同的速度 v 附近取相等的间隔，比率 dN/N 的数值一般是不同的。比率 dN/N 与速度 v 有关，与 v 的函数关系成正比，即

$$\frac{dN}{N} = f(v)dv \qquad (2.1.1\text{-}11)$$

即速度分布函数为

$$f(v)=4\pi\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2}\exp(-mv^2/2kT)v^2 \qquad (2.1.1\text{-}12)$$

该函数表示分布在速度 *v* 附近单位速度间隔内的分子数占总分子数的比率，也叫做麦克斯韦速率分布定律。麦克斯韦速率分布曲线如图 1-1 所示，该曲线也反映了气体分子速度随温度的变化情况。

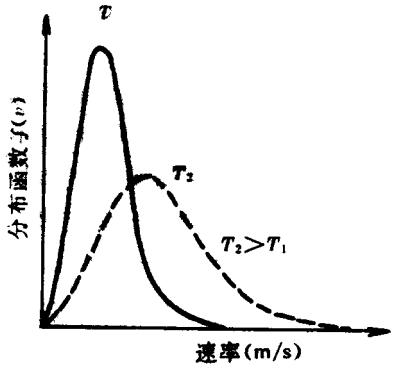


图 2.1.1−1　麦克斯韦速率分布曲线

根据这种规律可从理论上推得分子速率在 vm 处有极有大值，于是 vm 被称为最可几速度，其值为

$$v_m=\sqrt{\frac{2kT}{m}}=\sqrt{\frac{2RT}{M}}=1.41\sqrt{\frac{RT}{M}}\ \text{（cm/s）} \qquad (2.1.1\text{-}18)$$

气体分子的平均速度为

$$v_a=\sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}=\sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}=1.59\sqrt{\frac{RT}{M}}\ \text{（cm/s）} \qquad (2.1.1\text{-}14)$$

气体分子的均方根速度为

$$v_r=\sqrt{\frac{3kT}{m}}=\sqrt{\frac{3RT}{M}}=1.73\sqrt{\frac{RT}{M}}\ \text{（cm/s）} \qquad (2.1.1\text{-}15)$$

由此可见，三种速度中，均方根速度 vr 最大，平均速度 va 之次，最可几速度 vm 最小。这三种速度在不同的场合有各自的应用。在讨论速度分布时，要用到最可几速度；在计算分子运动的平均距离时，要用到平均速度；

在计算分子的平均动能时，则要采用均方根速度。

2、平均自由程

气体分子处于不规则的热运动状态，它除与容器壁发生碰撞外，气体分子间还经常发生碰撞。每个分子在连续两次碰撞之间的路程称为“自由程”。这是一个描述气体性质的微观参量。其统计平均值

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 n} \qquad (2.1.1\text{-}16)$$

称为“平均自由程”。由此可知，平均自由程与分子密度 n 和分子直径σ的平方是反比关系。

根据式（1-1），上式可改写为

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 P} \qquad (2.1.1\text{-}17)$$

此式表明，气体分子的平均自由程与压强成反比，与温度成正比。

显然，在气体种类和温度一定的情况下

$$\lambda \cdot P = 常数 \qquad (2.1.1\text{-}18)$$

在 25℃的空气情况下

$$\lambda \cdot P \approx 0.667 \quad （cm·Pa）$$

或

$$\lambda \approx \frac{0.667}{P} \quad （cm） \qquad (2.1.1\text{-}19)$$

3、碰撞次数与余弦散射律

单位时间内，在单位面积的器壁上发生碰撞的气体分子数称为入射频率，用ν表示。其数值与器壁前的气体分子密度 n 成正比，而且分子的平均速度 va 越大 v 也越大，则有

$$\nu = \frac{1}{4} n v_a \qquad (2.1.1\text{-}20)$$

式（1-20）称为赫兹-克努曾（Hertz-Knudsen）公式，它是描述气体分子热运动的重要公式。根据式（1-1）和式（1-14），则可得到单位时间碰撞单

位固体表面分子数的另一表达式

$$\nu = \frac{P}{\sqrt{2\pi mkT}} \qquad (2.1.1\text{-}21)$$

例如，对于 20℃的空气，则有

$$v_{20} = 2.86\times10^{18} P \quad （个/cm²·s） \qquad (2.1.1\text{-}22)$$

式中 P 的单位为帕（Pa）。

对于 25℃的空气，根据式（1-3）、（1-19）、（1-21）对上述参数之间关系的计算结果如图 1-2 所示。表 1-2 列出了与镀膜有关的一些重要气体的性质。从该表可知，在 1.33×10-4Pa 的压力下镀膜时，若以 50～100Å/min 的速度进行气体分子的入射，只要经过 1～2 秒钟即可淀积成单层分子层。

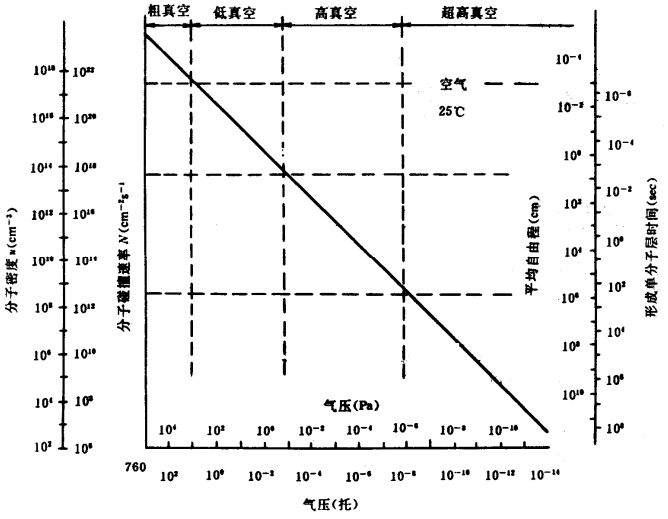


图 2.1.1-2　几个真空概念之间关系（25℃，空气）

表 2.1.1-2　气体的性质

数值 / 气体	化学符号	分子量 M	质量 m (×10^{-23}g)	平均速度 v_a(×10^4) cm/s, 0℃	分子直径 σ (×10^{-8} cm,0℃)	平均自由程 λ (cm·pa, 25℃)	在 1.33×10^{-4}Pa 时			
							碰撞次数（×0^{14}个/cm^2）	形成单分子层的时间(s)	单分子层分子数（×10^{14}个/cm^2）	厚度 (nm/min)
氢	H_2	2.0	0.3	16.9	2.8	1.2	15.1	1.0	15.3	16.3
氧	O_2	32	5.3	4.3	3.6	0.72	3.8	2.3	8.7	9.5
氩	Ar	40	6.6	3.8	3.7	0.71	3.4	2.5	8.6	8.7
氮	N_2	28	4.7	4.5	3.8	0.67	4.0	2.0	8.1	11.3
空气		29	4.8	4.5	3.7	0.68	4.0	2.1	8.3	10.8
水蒸气	H_2O	18	3.0	5.7	4.9	0.45	5.0	1.1	5.3	26.8
一氧化碳	CO	28	4.7	4.5	3.8	0.67	4.0	2.0	8.0	11.5
二氧化碳	CO_2	44	7.3	3.6	4.7	0.45	3.2	1.7	5.3	16.8

上面介绍了气体分子向固体表面的入射碰撞，下面介绍气体分子从表面的反射问题。根据克努曾对低气压气体流动的研究，以及对分子束反射的研究都证明了下述的余比定律成立。即碰撞于固体表面的分子，它们飞离表面的方向与原入射方向无关，并按与表面法线方向所成角度θ的余弦进行分布。则一个分子在离开其表面时，处于立体角$d\omega$（与表面法线成θ角）中的几率为

$$dp = \frac{d\omega}{\pi} \cdot \cos\theta \qquad (2.1.1\text{-}23)$$

式中$1/\pi$是由于归一化条件，即位于2π立体角中的几率为1而出现的。

分子从表面反射与飞来方向无关这一点非常重要。它意味着可将飞来的分子看成一个分子束从一个方向飞来，亦可看成按任意方向飞来，其结果都是相同的。余弦定律（又称“克努曾定律”）的重要意义在于：

（1）它揭示了固体表面对气体分子作用的另一个方向，即将分子原有的方向性彻底“消除”，均按余弦定律散射；

（2）分子在固体表面要停留一定的时间，这是气体分子能够与固体进行能量交换和动量交换的先决条件，这一点有重要的实际意义。

2.1.2 真空的获得所需设备

真空系统的种类繁多，典型的真空系统应包括：待抽空的容器（真空室）、获得真空的设备（真空泵）、测量真空的器具（真空计）以及必要的管道、阀门和其他附属设备。能使压力从一个大气压力开始变小，进行排气的泵常称为“前级泵”，另一些却只能从较低压力抽到更低压力，这些真空泵常称为“次级泵”。

对于任何一个真空系统而言，都不可能得到绝对真空（P = 0），而是具有一定的压强P_u，称为极限压强（或极限真空），这是该系统所能达到的最低压强，是真空系统能否满足镀膜需要的重要指标之一。第二个主要指标是抽气速率，指在规定压强下单位时间所抽出气体的体积，它决定抽真空所需

要的时间。

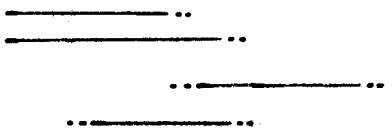
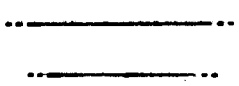
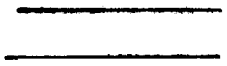
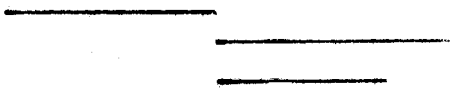
从理论上讲，任何一个真空系统所能达到的真空度可由下列方程确定

$$P = P_u + \frac{Q}{S} - \frac{V}{S} \bullet \frac{dP_i}{dt} \qquad (2.1.2\text{-}24)$$

式中，P_u 是真空泵的极限压强（Pa），S 是泵的抽气速率（L/s），Pi 是被抽空间气体的分压强（Pa），Q 是真空室内的各种气源（Pa·L/s），V 是真空室的体积（L），t 是时间（s）。

真空泵是一个真空系统获得真空的关键。表 1-3 列出了常用真空泵的排气原理、工作压强范围和通常所能获得的最低压强。图 2.1.2-3 示出了几种常用真空泵的抽速范围。可以看出，至今还没有一种泵能直接从大气一直工作到超高真空。因此，通常是将几种真空泵组合使用，如机械泵＋扩散系统和吸附泵＋溅射离子系＋钛升华泵系统，前者为有油系统，后者为无油系统。

表 2.1.2-3　主要真空泵的排气原理与工作范围

种　　类		原　　理	工作压强范围 10^{2}　1　10^{-2}　10^{-4}　10^{-6}　10^{-8}　10^{-10}　10^{-12}　(Torr) 10^{4}　10^{2}　1　10^{-2}　10^{-4}　10^{-6}　10^{-8}　10^{-10}　(Pa)
机械泵	油封机械泵（单级） 油封机械泵（双级） 分子泵 罗茨泵	利用机械力压缩 和排除气体	
蒸气喷射泵	水银扩散泵 油扩散泵 油喷射泵	靠蒸气喷射的动量 把气体带走	
干式泵	溅射离子泵 钛升华泵	利用溅射或升华形成吸气、吸附 排除气体	
	吸附泵 冷凝泵 冷凝吸附泵	利用低温表面对气体进行物理 吸附排除气体	

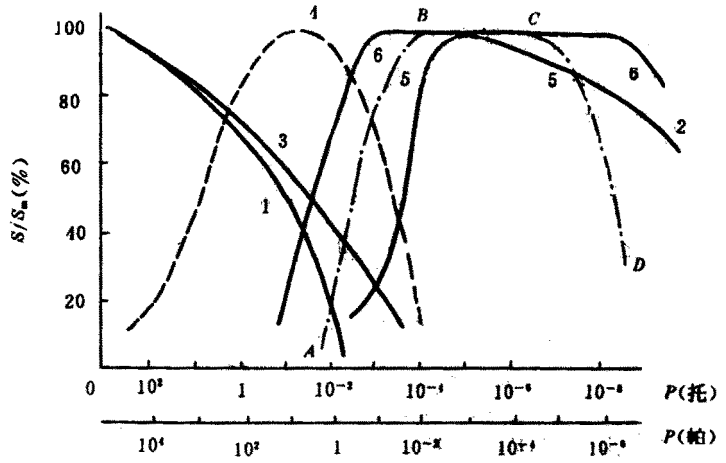


图 2.1.2-3　几种真空泵的抽速比较

1—单级旋片泵　　2—溅射离子泵　　3—双极旋片泵

4—罗茨泵　　5—扩散泵　　6—分子泵

一、机械泵

常用机械泵有旋片式、定片式和滑阀式等。其中旋片式机械泵噪声较小，运行速度高，应用最为广泛。其结构主要由定子、旋片和转子组成，这些部件全部浸在机械泵油中，转子偏心地置于定子泵内，如图 2.1.2-4 所示。其工作原理建立在玻-马洛特定律基础上，如图 2.1.2-5 所示。由于压强与体积的乘积等于一个与温度有关的常数。因此，在温度一定的情况下，容器的体积就与气体的压强成反比。图 2.1.2-5 示出了机械泵转子在连续旋转过程中的两个典型位置。一般旋片将泵腔分为三个部分：从进气口到旋片分离的吸气空间：由两个旋片同泵壁分隔出的膨胀压缩空间和排气阀到旋片分隔的排气空间。图中（1）表示正在吸气，同时把上一周期吸入的气体逐步压缩；图中（2）表示吸气截止。此时，泵的吸气量达到最大并将开始压缩；图中（3）表示吸气空间另一次吸气，而排气空间继续压缩；图中（4）表示排气空间内的气体，已被压缩到当压强超过一个大气压时，气体便推开排气阀由排气管排出。如此不断循环，转子按箭头方向不停旋转，不断进行吸气、压缩和

排气，于是与机械泵连接的真空容器便获得了真空。

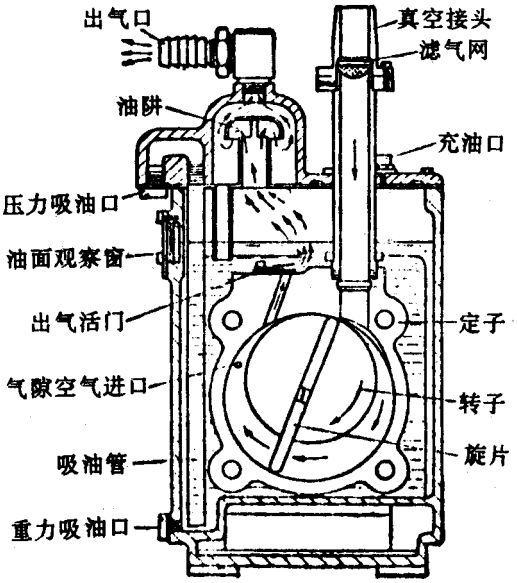


图 2.1.2-4　单级旋片式机械泵的结构

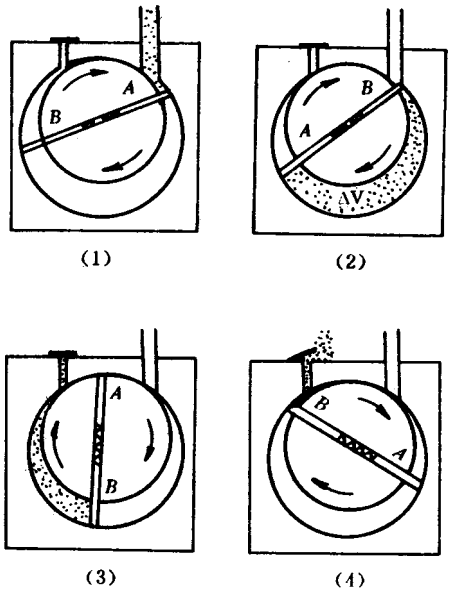


图 2.1.2-5　旋片式机械泵工作原理

如果待抽容器的体积为 V，初始压强为 P0，转子第一次旋转所形成的空间体积为ΔV（见图 1-5）。则根据玻义耳定律，旋片转过一周后，待抽空间的压强 P1 降低为

$$P_1 = P_0 \cdot \frac{V}{V+\Delta V} \quad \text{或} \quad P_1(V+\Delta V) = P_0 V \qquad (2.1.2\text{-}25)$$

经过 *n* 个循环后

$$P_n = P_0\left(\frac{V}{V+\Delta V}\right)^n \qquad (2.1.2\text{-}26)$$

由此可以看出，只有在泵室大而被抽容积小，即 ΔV /V 越大，获得 Pn 所需时间才越短；n 越大 Pn 越小，理论上 $n \to \infty$ 时，$P_n \to 0$，但这在实际上是不可能的。当 n 足够大时，Pn 只会达到某一极限值 Pu，这是因为泵在结构上总是存在着“有害空间”的缘故。所谓有害空间是指出气口与转子密封点之间的极小空隙空间。

设每秒转子旋转 m 次，则 t 秒钟转子旋转的次数为

$$n = mt \qquad (2.1.2\text{-}27)$$

这时待抽容器的压强 Pt 降低为

$$P_t = P_0\left(\frac{V}{V+\Delta V}\right)^{mt} \qquad (2.1.2\text{-}28)$$

或

$$\frac{P_0}{P_t} = \left(1+\frac{\Delta V}{V}\right)^{mt} \qquad (2.1.2\text{-}29)$$

由此可见 P_0 / P_t 可以随容器内压强 P_t 的减小而增加。对于一定的机械泵及待抽容器，其 *m*、*V* 及 ΔV 均为常数，所以

$$\lg\frac{P_0}{P} = mt \cdot \lg\left(1+\frac{\Delta V}{V}\right) = Kt \qquad (2.1.2\text{-}30)$$

式中 $K = m\lg\left(1+\frac{\Delta V}{V}\right)$ 也是一个常数。对于实际的泵而言，该式只有在 P_t >> 极限真空度时才适用。把这一公式作成曲线。如图 2.1.2-6 所示。

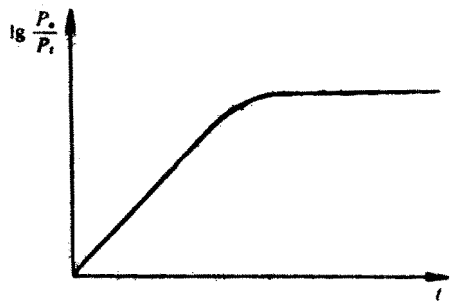


图 2.1.2-6　机械泵的工作特性曲线

为减小有害空间的影响，通常采用双级泵。该泵由两个转子串联构成，以一个转子空间的出气口作为另一个转子空间的进气口。这样便可使极限真空从单级泵的 1Pa 提高到 10^{-2}Pa 数量级。目前，国内外生产的机械泵一般都是双级泵。

由于泵的转子和定子全部浸泡在油箱内，因此机械泵油的作用很重要，对机械泵油的基本要求是饱和蒸气压低，要具有一定的润滑性和粘度，以及较高的稳定性。国产 1 号真空泵油适用于多种类型机械泵，在 20℃时饱和蒸气压小于 1×10^{-3}Pa，50℃时粘度为 5×10^{-2}Pa·s。

表 2.1.2-4　2X 旋片机械泵性能参数

型号	抽速（L/s）	极限真空（Pa）		配用电动机功率（kW）	进气口直径（mm）
		关气镇阀	开气镇阀		
2X-0.5	0.5	6.7×10^{-2}	6.7×10^{-1}	0.18	10
2X-1	1	6.7×10^{-2}	6.7×10^{-1}	0.25	15
2X-2	2	6.7×10^{-2}	6.7×10^{-1}	0.4	20
2X-4	4	6.7×10^{-2}	6.7×10^{-1}	0.6	25
2X-8	8	6.7×10^{-2}	6.7×10^{-1}	1.1	32
2X-15	15	6.7×10^{-2}	6.7×10^{-1}	2.2	50
2X-30	30	6.7×10^{-2}	6.7×10^{0}	4.5	65
2X-70	70	6.7×10^{-2}	6.7×10^{0}	7.5	80
2X-150	150	6.7×10^{-2}	6.7×10^{0}	14.0	125

使用机械泵抽除带有水蒸气的混合气体时，蒸气分压强也会在压缩过程中同样逐渐增大。当蒸气分压强增大到饱和蒸气压，而总压强还不足以推开

排气阀所需的压强时，蒸气就会凝结成水，并与机械泵油混合形成一种悬浊液，这将使泵油质量严重破坏，影响油的密封、润滑作用，并能使泵壁锈蚀。为此常常使用气镇泵，即在靠近排气口的地方开一小孔，在气体尚未压缩之前，由小孔渗入一定量的干燥空气，协助打开排气阀门，让水蒸气在未凝结之前被排除泵外。显然，气镇泵对极限真空度稍有影响。

表 2.1.2−4 列出了国产 2X 型旋片机械泵的基本参数。

二、扩散泵

扩散泵是利用被抽气体向蒸气流扩散的现象来实现排气作用的。扩散泵的结构示意有工作原理如图 1-7 所示。当扩散泵油被加热后会产生大量的油蒸气，油蒸气沿着蒸气导管传输到上部，经伞形喷嘴向外喷射出来。由于喷嘴外的压强较低，于是蒸气会向下喷射出较长距离，形成一高速定向的蒸气流。其射流的速度可高达 200m/s 左右，且其分压强低于扩散泵进气口上方被抽气体的分压强，两者形成压强差。这样真空室内的气体分子必然会向着压强较低的扩散泵喷口处扩散，同具有较高能量的超音速蒸气分子相碰撞而发生能量交换，驱使被抽气体分子沿蒸气流方向高速运动并被带出口处，被机械泵抽走，而从喷嘴射出的油蒸气流喷到水冷的泵壁冷凝成液体，流回泵底再重新被加热成蒸气。这样，在泵内保证了油蒸气的循环，使扩散泵能连续不断的工作，从而使被抽容器获得较高的真空度。

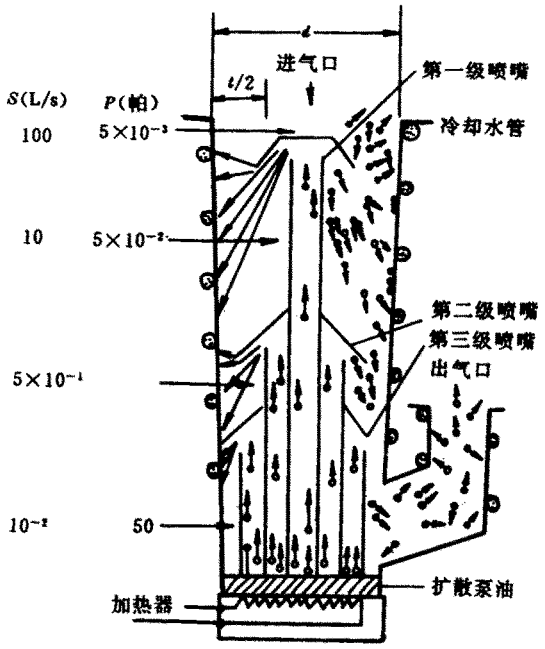


图 2.1.2-7　扩散泵的结构及工作原理

根据扩散泵理论，扩散泵的极限压强为

$$P_u = P_L \exp\left(-\frac{nvL}{D_0}\right) \qquad (2.1.2\text{-}31)$$

式中，P_L 为前级真空泵压强；n 是蒸气分子密度；L 是蒸气流从泵的进气口到出气口的扩散长度；$D_0 = ND =$ 常数，D 为蒸气中气体分子的扩散系数，可由 $D = \lambda v_a / 3$ 计算得到；v 为油蒸气在喷口处的速度，可近似认为

$$v \approx 1.60 \times 10^4 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (\text{cm/s}) \qquad (2.1.2\text{-}32)$$

式中，M 是油蒸气的分子量。

因 v、n、D_0、L 等均为正值，故 P_L / P_u 总是大于 1 的，此比值称扩散泵的压缩比。由式（2.1.2-31）可知，如果蒸气流速 v 和扩散长度 L 愈大，以及气体分子的扩散系数 D 愈小，由此喷射所产生的压缩比就愈高。则在一定的前级压强下经扩散泵抽气后所得的极限压强就愈低。另外，由于 P_u 与前级真空泵压强 P_L 成正比，所以为了提高扩散泵的极限真空，选配性能好的前级泵

也十分重要。

扩散泵的抽气速率 S_J 与其进气口直径 d 有以下关系

$$S_J = 11.7H\frac{\pi d^2}{4} \quad (\text{L/s}) \qquad (2.1.2\text{-}33)$$

式中，H 为抽速系数，它等于泵的实际抽速与理论最大抽速之比，一般为 0.5 左右。

扩散泵的实际抽速 S 为

$$S = \frac{Q}{P_L - P_u} \qquad (2.1.2\text{-}34)$$

式中，Q 为扩散泵每秒抽走气体的量（Pa·L/s）；PL 是扩散泵入口气体的总压强（Pa）；Pu 为扩散泵的极限压强（Pa）。

在实际应用中，扩散泵的抽速可按下列简单的经验公式来进行计算，十分简便可靠。

$$S = (3 \sim 4)d^2 \quad (\text{L/s}) \qquad (2.1.2\text{-}35)$$

扩散泵必须与机械泵配合使用才能组成高真空系统，单独使用扩散泵是没有抽气作用的。经验指出，扩散泵的口径一般是镀膜钟罩的三分之一，而扩散泵的抽速大约为钟罩容积的 4～5 倍，由此便可选择合适抽速的机械泵。

扩散泵油是扩散泵的重要工作物质，泵油应具有较好的化学稳定性（无毒、无腐蚀）、热稳定性（在高温下不分解）、抗氧化性和具有较低的饱和蒸气压（≤10-4Pa）以及在工作时应有尽可能高的蒸气压。几种常用扩散泵油的性能列于表 2.1.2-5。

表 2.1.2-5　几种国产扩散泵油技术性能

种　类	代号	分子量	粘度（cp, 50℃）	外观	蒸气压（Pa, 20℃）	极限压强（Pa, 20℃）
扩散泵油	KB-1	350	≤65	淡黄	$\leq 5.3\times10^{-6}$	3.3×10^{-4}
扩散泵油	KB-2	350	≤65	淡黄	$\leq 5.3\times10^{-6}$	3.3×10^{-5}
扩散泵硅油	274	484	≤38（25℃）	无色	$\leq 2.6\times10^{-6}$	8.0×10^{-6}

扩散泵硅油	275	546	≤65（25℃）	无色	——	3.0×10^{-6}
增压泵油	——	330	≤1.5	水白色	$\leq4\times10^{-3}$	_

油蒸气向真空室的返扩散会造成膜层污染。如无阻挡装置，返油率可高达 $10^{-3}mg/cm^2\cdot s$。因此，常在进气口安装水冷挡板或液氮冷阱，返油率可大大降低，约为原来的 1/10～1/1000。

三、分子泵与罗茨泵

当气体分子碰撞到高速移动的固体表面时，总会在表面停留很短的时间，并且在离开表面时将获得与固体表面速率相近的相对切向速率，这就是动量传输作用。涡轮分子泵就是利用这一现象而制成的，即它是靠高速转动的转子碰撞气体分子并把它驱向排气口，由前级泵抽走，而使被抽容器获得超高真空的一种机械真空泵。分子泵的结构如图 1-8 所示。分子泵的主要特点是：启动迅速，噪声小，运行平稳，抽速大，不需要任何工作液体。

罗茨泵又称机械增压泵，如图 1-9 所示，它是具有一对同步高速高旋转的 8 字形转子的机械真空泵。它既应用分子泵的原理，又利用油封机械泵的变容积原理制成。

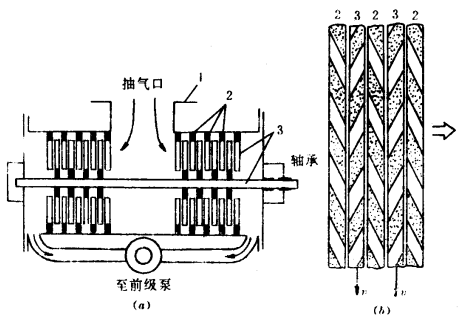


图 2.1.2-8　涡轮分子泵示意图
1—外壳　2—定子　3—转子

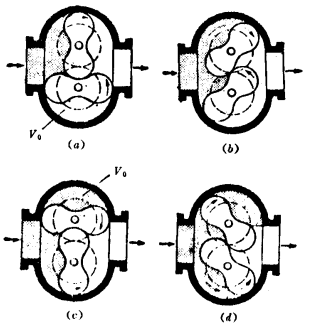


图 2.1.2-9　罗茨泵及其工作原理

罗茨泵的特点是：转子与泵体、转子与转子之间保持一不大的间隙（约 0.1mm），缝隙不需要油润滑和密封，故很少有油蒸气污染；由于这一结构，转子与泵体、转子与转子间没有摩擦，故允许转子有较大的转速（可达 3000

转/分）；此外，罗茨泵还具有启动快，振动小，在很宽的压强范围内（1.33×10^{2}～1.33Pa）具有很大的抽速等特点。罗茨泵的极限压强可达 10^{-4}Pa (双级泵)。罗茨泵必须和前级泵串联使用。

2.1.3 真空的测量

为了判断和检定真空系统所达到的真空度，必须对真空容器内的压强进行测量。但在真空技术中遇到的气体压强都很低，要直接测量其压力是极不容易的。因此，都是利用测定在低气压下与压强有关的某些物理量，再经变换后确定容器的压强。当压强改变时，这些和压强有关的特性也随之变化的物理现象，就是真空测量的基础。任何具体的物理特性，都是在某一压强范围内才最显著。因此，任何方法都有其一定的测量范围，这个范围就是该真空计的“量程”。目前，还没有一种真空计能够测量从大气到 10^{-10}Pa 的整个领域的真空度。真空计按照不同的原理和结构可分成许多类型。表 1-6 列出几种真空计的主要特性。下面对在薄膜技术中常用的真空计作一介绍。

表 2.1.3-6　几种真空计的工作原理与测量范围

名　称	工　作　原　理	测 量 范 围（Pa）
U 形管压力计	利用大气与真空压差	10^{5}～10^{-2}
水银压缩真空计	根据玻义耳定律	10^{3}～10^{-4}
电阻真空地	利用气体分子热传导	104～10^{-2}（10^{-3}）
热偶真空计		
热阴极电离真空计	利用热电子电离残余气体	10^{-1}～10^{-6}
B-A 型真空计		10^{-1}～10^{-10}
潘宁磁控电离计	利用磁场中气体电离与压强有关的原理	1～10^{-5}
气体放电管	利用气体放电与压强有关的性质	10^{3}～1

一、热偶真空计

热偶真空计是利用低压强下气体的热传导与压强有关的原理制成的真空计。当压强较高时，气体传导的热量与压强无关，只有当压强降到低真空

范围，才与压强成正比。

电源加热灯丝产生的热量 Q 将以如下三种方式向周围散发，即辐射热量 Q_1、灯丝与热偶丝的传导热量 Q_2 以及气体分子碰撞灯丝而带走的热 Q_3。即

$$Q=Q_1+Q_2+Q_3 \qquad (2.1.3\text{-}36)$$

热平衡时，灯丝温度 T 为一定值。此时，Q_1 与 Q_2 为恒量，只有 Q_3 才随气体分子对灯丝的碰撞次数而变化，即与气体分子数有关，或与气体压强有关。压强愈高，气体分子数多，碰撞次数多，灯丝被带走的热量就多，灯丝温度变化就大。利用测定热丝电阻值随温度变化的真空计称为热阻真空计（图 1-10），直接用热电偶测量热丝温度的真空计叫做热偶真空计（图 1-11）。热电偶有镍铬—康铜、铁—康铜或铜—康铜等。热偶真空计应用十分广泛，热丝表面温度的高低与热丝所处的真空状态有关。真空度高，则热丝表面温度高（和热丝碰撞的气体分子少），热电偶输出的热电势也高；真空度低，则热丝表面温度低（和热丝碰撞的气体分子多，带走的热量较多），热电偶输出的电动势也小。

二、电离真空计

电离真空计是目前测量高真空的主要仪器。它是利用气体分子电离的原理来测量真空度。根据气体电离源的不同，又分为热阴极电离真空计和冷阴极电离真空计，前者应用极为普遍，其结构如图 1-12 所示，与一只真空三级管类似。在稀薄气体中，灯丝发射的电子经加速电场加速，具有足够的能量，在与气体分子碰撞时，能引起气体分子电离，产生正离子和次级电子。电离几率的大小与电子的能量有关。电子在一定的飞行路途中与分子碰撞的次数（或产生的正离子数），与气体分子密度成正比，因为 $P = nkT$，故在一定温度下，亦即比例于气体压强 P。或者说产生的正离子数亦正比于压强 P。因此，根据电离真空计离子收集极收集离子数的多少，就可确定被测空间的压强大小，这就是电离真空计的工作原理。

根据以下公式可估算出电离计中离子电流与气体压强的关系。设电子从阴极飞到加速极的总路程长度为 L（cm），则离子电流 I_i（mA）与压强之间的

关系为

$$I_i = I_e WLP \qquad (2.1.3\text{-}37)$$

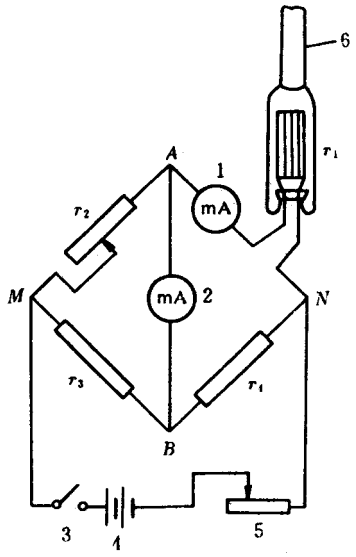


图 2.1.3-10　热阻真空计

r—电阻　1，2—毫安表

3—开关　4—电源　5—电位器

6—接真空系统

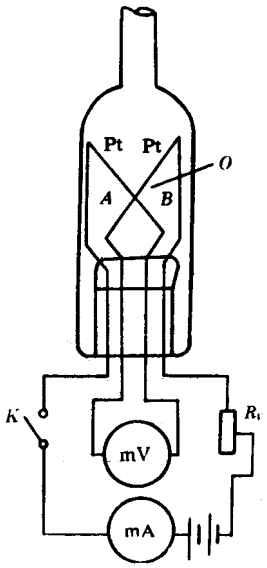


图 2.1.3-11　热偶真空计

P_t—加热铂丝

A，B—热电偶丝电离真空计规管

O—热电偶接点　R_V—可变电阻

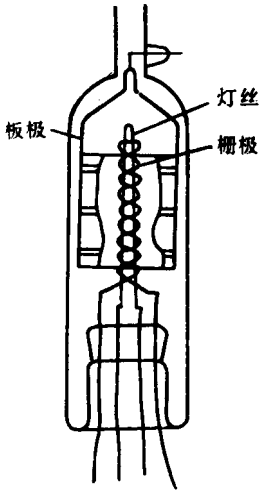


图 2.1.3-13　DL-2 型热阴极

式中，I_e 为阴极（灯丝）的发射电流（常定为 5mA）；W 为 P = 1Pa 时每个电子飞行 1cm 所产生的电子—离子对数，称为电离效率，是电子能量的函数。

考虑到电子在飞行途中能量有所变化，则上式应改写为

$$I_i = I_e \sum_{i=1}^{n} W_i \Delta L_i P \qquad (2.1.3\text{-}38)$$

式中，ΔL_i 为路程 L 分别为 n 段时第 i 段的长度；W_i 为 L 路程中第 i 段电子能量的函数。

再考虑到并非所有电子和离子都被收集，如部分电子和离子会到达管壁，则式（2.1.3-38）应修正为

$$I_i = I_e \alpha\beta \sum_{i=1}^{n} W_i \Delta L_i P \qquad (2.1.3\text{-}39)$$

式中，α 、β 分别为 Ii 和 Ie 的修正系数。于是可将上式改写为

$$I_i = I_e KP \quad 或 \quad \frac{I_i}{I_e} = KP \qquad (2.1.3\text{-}40)$$

K 为常数，称电离真空计的灵敏度，其意义为在单位电子电流和单位压强下所得到的离子电流值，单位为 1/Pa，一般通过实验确定，通常为 4～40。当 Ie 为常数时有

$$I_i = I_e KP = CP \qquad (2.1.3\text{-}41)$$

即得离子流仅与压强成正比，因此只要测出此时离子流，经电路放大后，就可转换为压强刻度在表头上表示。

热阴极电离真空计的测量范围一般为 10-1～10-6Pa（见图 2.1.3-13）。在压强大于 10-1Pa 左右时，虽然气体分子数增加，电子与分子的碰撞数增加，但能量下降，电离几率降低，所以当压强增加到一定程度时电离作用达到饱和，使曲线偏离线性，故测量的上限为 10-1Pa。

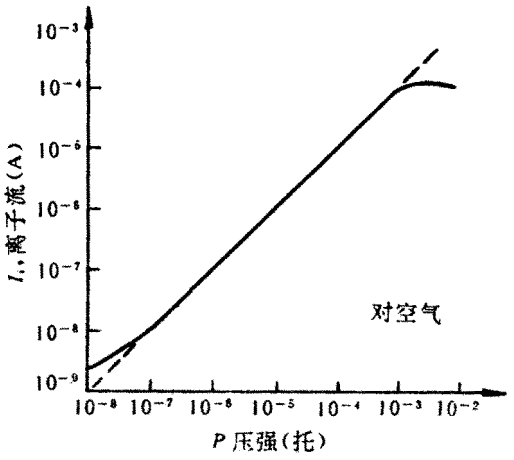


图 2.1.3-13　离子电流与压强的关系

在低压强下（小于 10-6Pa），具有一定能量的高速电子打到加速极上，产生软 X 射线，当其辐射到离子收集极时，将自己的能量交给金属中的自由电子，会使自由电子逸出金属而形成光电流，导致离子流增加，即这时由离子收集极测得的离子流是离子电流与光电流二者之和，当二者在数值上可比拟时，曲线也将偏离线性。故 10-6Pa 就成为测量的下限压强值。B-A 型电离真空计将收集极改成针状，把灯丝放在加速极外边，使收集极受软 X 射线照射的面积减小，于是可测量更高的真空度（～10-10Pa）

实训 2.1 镀膜机真空系统抽真空

二、实训目的

利用物理气相沉积方法镀制光学薄膜前，需要对镀膜机进行抽真空操作，使镀膜机真空度达到工作真空。掌握真空系统工作的原理。掌握真空系统操作流程及注意事项。

三、实训设备

VPT 镀膜机一台（包括三台冷泵，一台机械泵）

四、实训内容

认识镀膜机主要部件，掌握镀膜机抽真空流程及注意事项。

操作如下：

（一）认识镀膜机主要部件

Telemark Electron Beam Gun（电子枪 1）， 4-Pocket Crucible(4 个连体坩埚，用于盛放被镀材料)。

Telemark Electron Beam Gun（电子枪 2），285cc pan style crucible(一个大坩埚，用于盛放被镀材料)。

Telemark crucible indexers， mdel 376 and 379 两个坩埚分度器。

Telemark TT15-2 HV power supply：电力供应电源。

Telemark programmable sweep controller：电子束扫描方式程序控制器。

CTI Cryo-Torr 400 Cryopumps and model 9550 compressors；冷凝泵和压缩机。

Leybold sogevac SV500 and leybold WPS 1001 Blower combination：粗泵，由两个机械泵结合。

IC/5 ：薄膜厚度、沉积速率监控仪。

MKS 250 Controler：用来控制真空度，当需要改变真空室真空度时，可以通过调节 MKS250 向真空室的充氧量来改变室内真空度。

Polycold PFC-1100HC water vapor cryopump:水蒸汽冷凝泵。

HMI and VPT DesignLink: 系统监控和镀膜程序软件。

Granville phillips model 307 and 316 gauge controller: 两个真空度压强测量计，可同时测量出三个不同部位的真空度。

（二）镀膜机抽真空流程

（1）执行开机步骤

a) 打开压缩空气阀门；

b) 打开控制箱小门，打开冷水机电源，再打开冷水机（先按面板上 PUMP 按钮打开水泵，再按 COMP1 按钮打开压缩机）；待水温降到 17.5 度，再打开冷却水循环泵；

c) 打开冷却水进出口开关；

d) 打开电源控制柜开关；

e) 打开 UPS 电源起动计算机；

f) 运行 RSVIEWWORKS 程序；

g) 进入 RSVIEWWORKS 程序下的 MANUAL 选项，点击 POWER OFF 按钮，再点击 COOL 按钮，启动 POLYCOLD；

h) 在 PUMPING SYSTEM 系统下,进入 MODE AUTO 模式，点击 AUTOPUMP OFF 按钮，启动抽空系统；

i) 打开氮气瓶上气阀，将分压调到 0.3Mpa；.



图 1 氮气瓶

在 CRYO REGENT 系统下,进入 MODE AUTO 模式，点击 CRYO OFF1、CRYO OFF2 、CRYO OFF3 对三个冷泵进行再生，等待再生程序完成，并开始自动制冷，等待制冷完成后，系统开始自动抽真空；

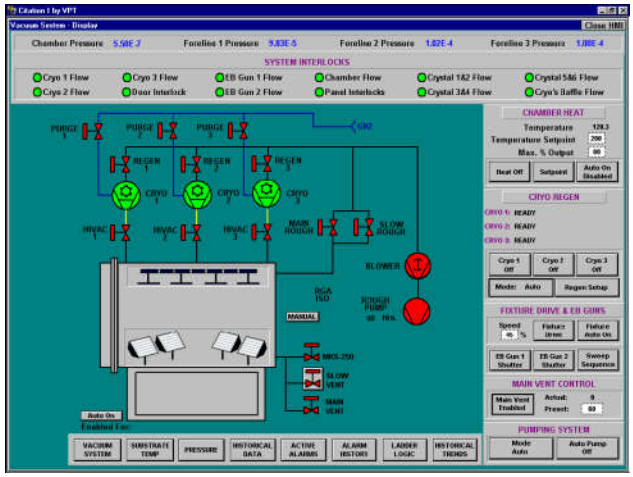


图 2 RSVIEWWORKS 程序控制界面

任务 2.2 热蒸发镀膜工艺

2.2.1 热蒸发镀膜机理介绍

真空蒸发镀膜法（简称真空蒸镀）是在真空室中，加热蒸发器中待形成薄膜的原材料，使其原子或分子从表面气化逸出，形成蒸气流，入射到固体（称为衬底或基片）表面，凝结形成固态薄膜的方法。由于真空蒸发法或真空蒸镀法主要物理过程是通过加热蒸发材料而产生，所以又称热蒸发法。采用这种方法制造薄膜，已有几十年的历史，用途十分广泛。近年来，该法的改进主要是在蒸发源上。为了抑制或避免薄膜原材料与蒸发加热器发生化学反应，改用耐热陶瓷坩埚。为了蒸发低蒸气压物质，采用电子束加热源或激光加热源。为了制造成分复杂或多层复合薄膜，发展了多源共蒸发或顺序蒸发法。为了制备化合物薄膜或抑制薄膜成分对原材料的偏离，出现了反应蒸发法等。

一、真空蒸发的特点与蒸发过程

一般说来，真空蒸发（除电子束蒸发外）与化学气相沉积、溅射镀膜等成膜方法相比较，有如下特点：设备比较简单、操作容易；制成的薄膜纯度

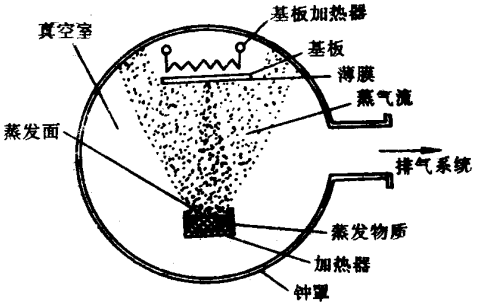


图 2.2.1-1 真空蒸发镀膜原理示意图

高、质量好，厚度可较准确控制；成膜速率快、效率高，用掩模可以获得清晰图形；薄膜的生长机理比较单纯。这种方法的主要缺点是，不容易获得结晶结构的薄膜，所形成薄膜在基板上的附着力较小，工艺重复性不够好等。

图 2-1 为真空蒸发镀膜原理示意图。主要部分有：（1）真空室，为蒸发过程提供必要的真空环境；（2）蒸发源或蒸发加热器，放置蒸发材料并对其进行加热；（3）基板，用于接收蒸发物质并在其表面形成固态蒸发薄膜；（4）基板加热器及测温器等。

真空蒸发镀膜包括以下三个基本过程：

（1）加热蒸发过程。包括由凝聚相转变为气相（固相或液相→气相）的相变过程。每种蒸发物质在不同温度时有不相同的饱和蒸气压；蒸发化合物时，其组分之间发生反应，其中有些组分以气态或蒸气进入蒸发空间。

（2）气化原子或分子在蒸发源与基片之间的输支，即这些粒子在环境气氛中的飞行过程。飞行过程中与真空室内残余气体分子发生碰撞的次数，取决于蒸发原子的平均自由程，以及从蒸发源到基片之间的距离，常称源—基距。

（3）蒸发原子或分子在基片表面上的淀积过程，即是蒸气凝聚、成核、核生长、形成连续薄膜。由于基板温度远低于蒸发源温度，因此，沉积物分子在基板表面将直接发生从气相到固相的相转变过程。

上述过程都必须在空气非常稀薄的真空环境中进行。否则，蒸发物原子或分子将与大量空气分子碰撞，使膜层受到严重污染，甚至形成氧化物；或

者蒸发源被加热氧化烧毁；或者由于空气分子的碰撞阻挡，难以形成均匀连续的薄膜。

二、饱和蒸气压

在一定温度下，真空室内蒸发物质的蒸气与固体或液体平衡过程中所表现出的压力称为该物质的饱和蒸气压。此时蒸发物表面液相、气相处于动态平衡，即到达液相表面的分子全部粘接而不离开，与从液相到气相的分子数相等。物质的饱和蒸气压随温度的上升而增大，在一定温度下，各种物质的饱和蒸气压不相同，且具有恒定的数值。相反，一定的饱和蒸气压必定对应一定的物质的温度。已经规定物质在饱和蒸气压为 10^{-2} 托时的温度，称为该物质的蒸发温度。

饱和蒸气压 P_e 与温度 T 之间的数学表达式，可从克拉伯龙-克劳修斯（Clapeylon Clausius）方程式推导出来

$$\frac{dP_v}{dT}=\frac{H_e}{T(V_g-V_s)} \qquad (2.2.1\text{-}1)$$

式中，H_e 为摩尔气化热或蒸发热（J/mol）；V_g 和 V_s 分别为气相和固相或液相的摩尔体积（cm^3）；T 为绝对温度（K）。

因为 $V_g>>V_s$，并假设在低气压下蒸气分子符合理想气体状态方程，则有

$$V_g-V_s\approx V_g,\quad V_g=\frac{RT}{P_v} \qquad (2.2.1\text{-}2)$$

式中，R 是气体常数，其值为 8.31×107erg/K·mol。故方程式（2-1）可以写成

$$\frac{dP_v}{P_v}=\frac{H_v\cdot dT}{RT^2} \qquad (2.2.1\text{-}3)$$

亦可写成

$$\frac{d(\ln P_e)}{d(1/T)}=\frac{-H_v}{R}$$

如果把 P_e 的自然对数值与 1/T 的关系作图表示，应该是一条直线。

由于气化热 H_e 通常随温度只有微小的变化，故可近似地地把 H_e 看作常数，于是式（2.2.1-3）求积分得

$$\ln P_e = C - \frac{H_v}{RT} \qquad (2.2.1\text{-}4)$$

式中 C 为积分常数。式（2-4）常采用常用对数表示为

$$\lg P_e = A - \frac{B}{T} \qquad (2.2.1\text{-}5)$$

式中，A、B 为常数，A = C /2.3，B = He/2.3R，A、B 值可由实验确定。而且在实际上 Pe 与 T 之间的关系多由实验确定。且有 He = 19.12B（J/mol）关系存在。式（2.2.1-5）即为蒸发材料的饱和蒸气压与温度之间的近似关系式。对于大多数材料而言，在蒸气压小于 1 托（133 帕）的比较窄的温度范围内，式（2.2.1-5）才是一个精确的表达式。

表 2.2.1-1 和图 2.2.1-2 分别给出了常用金属的饱和蒸气压与温度之间的关系，从图 2.2.1-2 的 lgPe~1/T 近似直线图看出，饱和蒸气压随温度升高而迅速增加，并且到达正常蒸发速率所需温度，即饱和蒸气压约为 1Pa 时的温度。因此，在真空条件下物质的蒸发要比常压下容易得多，所需蒸发温度也大大降低，蒸发过程也将大大缩短，蒸发速率显著提高。

表 2.2.1-1 一些常用材料的蒸气压与温度关系

金属	分子量	不同蒸气压 P_e(Pa)下的温度 T（K）						熔点（K）	蒸发速率*
		10^{-8}	10^{-6}	10^{-4}	10^{-2}	10^{0}	10^{2}		
Au	197	964	1080	1220	1405	1670	2040	1336	6.1
Ag	107.9	759	847	958	1105	1300	1605	1234	9.4
In	114.8	677	761	870	1015	1220	1520	429	9.4
Al	27	860	958	1085	1245	1490	1830	932	18
Ga	69.7	796	892	1015	1180	1405	1745	303	11
Si	28.1	1145	1265	1420	1610	1905	2330	1685	15
Zn	65.4	354	396	450	520	617	760	693	17
Cd	112.4	310	347	392	450	538	665	594	14
Te	127.6	385	428	482	553	647	791	723	12
Se	79	301	336	380	437	516	636	490	17

As	74.9	340	377	423	477	550	645	1090	17
C	12	1765	1930	2140	2410	2730	3170	4130	19
Ta	181	2020	2230	2510	2860	3330	3980	3270	4.5
W	183.8	2150	2390	2680	3030	3500	4180	3650	4.4

*单位：J×1017（cm-2 • s-1）（P≈1 Pa，粘附系数 a≈1）

强调指出，饱和蒸气压 Pe 与温度 T 的关系曲线对于薄膜制作技术有重要的实际意义，它可以帮助我们合理地选择蒸发材料及确定蒸发条件。

三、蒸发速率

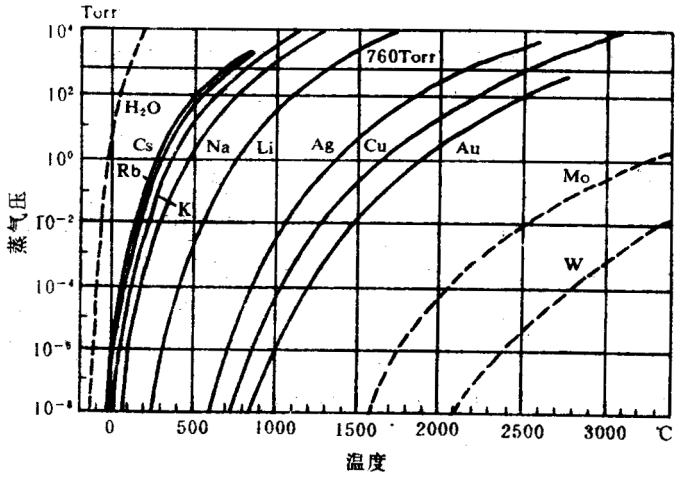
根据气体分子运动论，在处于热平衡状态时，压强为 P 的气体，单位时间内碰撞单位面积器壁的分子数

$$J = \frac{1}{4} n v_a = \frac{P}{\sqrt{2\pi mkT}} \qquad (2.2.1\text{-}6)$$

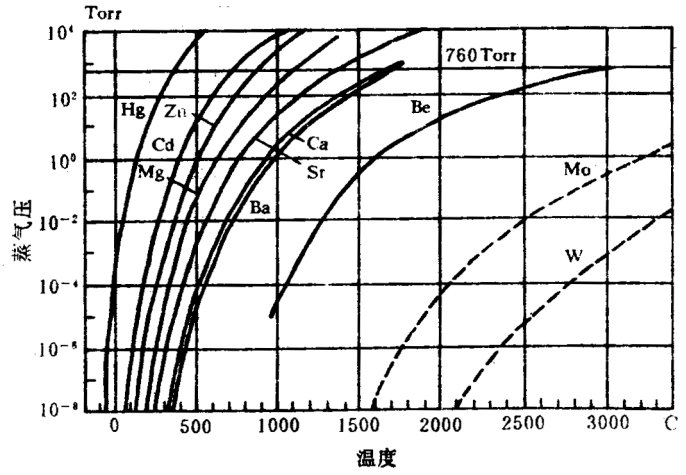
式中，n 是分子密度，v_a 是算术平均速度，m 是分子质量，k 为玻尔兹曼常数。如果考虑在实际蒸发过程中，并非所有蒸发分子全部发生凝结，上式可改写为

$$J_e = aP_v / \sqrt{2\pi mkT} \qquad (2.2.1\text{-}7)$$

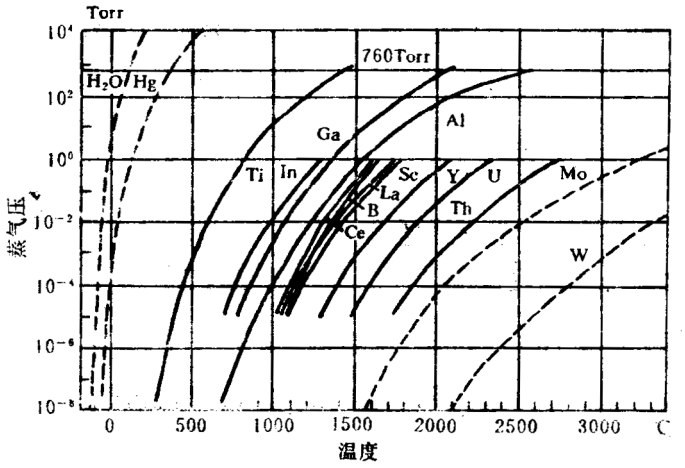
式中，a 为冷凝系数，一般 a ≤ 1，Pe 为饱和蒸气压。



(a)周期表 I 族元素的蒸气压



(b)周期表Ⅱ族元素的蒸气压



(c)周期表Ⅲ族元素的蒸气压

图 2.2.1-2 各种元素的蒸气压与温度关系

设蒸发材料表面液相、气相处于动态平衡，到达液相表面的分子全部粘接而不脱离，与从液相到气相的分子数相等，则蒸发速率可表示为

$$J_e = \frac{dN}{A \cdot dt} = \frac{a_e (P_v - P_h)}{\sqrt{2\pi mkT}} \qquad (2.2.1\text{-}8)$$

式中，*dN* 为蒸发分子（原子）数，α_v 为蒸发系数，*A* 为蒸发表面积，*t* 为时间（秒），P_e 和 P_h 分别为饱和蒸气压与液体静压（Pa）。

当 $\alpha_e = 1$ 和 $P_h = 0$ 时，得最大蒸发速率

$$J_m = \frac{dN}{Adt} = \frac{P_v}{\sqrt{2\pi mkT}} \quad （\mathrm{cm^{-2} \cdot s^{-1}}） \qquad （2.2.1\text{-}9）$$

$$\approx 3.51 \times 10^{22} P_v \left(\frac{1}{\sqrt{TM}} \right) \quad （个/\mathrm{cm^2 \cdot s}，\mathrm{Torr}）$$

$$\approx 2.64 \times 10^{24} P_v \left(\frac{1}{\sqrt{TM}} \right) \quad （个/\mathrm{cm^2 \cdot s}，\mathrm{Pa}）$$

式中，M 为蒸发物质的摩尔质量。朗谬尔(Langmuir)指出，式（2.2.1-9）对从固体自由表面的蒸发也是正确的。如果对式（2.2.1-9）乘以原子或分子质量，则得到单位面积的质量蒸发速率

$$G = mJ_m = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \cdot P_v \qquad （2.2.1\text{-}10）$$

$$\approx 5.83 \times 10^{-2} \sqrt{\frac{M}{T}} \cdot P_v \quad （\mathrm{g/cm^2 \cdot s}，\mathrm{Torr}）$$

$$\approx 4.37 \times 10^{-3} \sqrt{\frac{M}{T}} \cdot P_v \quad （\mathrm{kg/m^2 \cdot s}，\mathrm{Pa}）$$

此式是描述蒸发速率的重要表达式，它确定了蒸发速率、蒸气压和温度之间的关系。

必须指出，蒸发速率除与蒸发物质的分子量、绝对温度和蒸发物质在温度 T 时的饱和和蒸气压有关外，还与材料自身的表面清洁度有关。特别是蒸发源温度变化对蒸发速率影响极大。如果将饱和蒸气压与温度的关系式（2.2.1-5）代入式（2.2.1-10），并对其进行微分，即可得出蒸发速率随温度变化的关系式，即

$$\frac{dG}{G} = \left(2.3\frac{B}{T} - \frac{1}{2} \right) \frac{dT}{T} \qquad （2.2.1\text{-}11）$$

或

$$\frac{dG}{G}=\left(\frac{B}{T}-\frac{1}{2}\right)\frac{dT}{T}$$

对于金属，2.3*B*/*T* 通常在 20~30 之间，即有

$$\frac{dG}{G}=(20\sim 30)\frac{dT}{T} \qquad (2.2.1\text{-}12)$$

由此可见，在蒸发温度以上进行蒸发时，蒸发源温度的微小变化即可引起蒸发速率发生很大变化。因此，在制膜过程中，要想控制蒸发速率，必须精确控制蒸发源的温度，加热时应尽量避免产生过大的温度梯度。蒸发速率正比于材料的饱和蒸气压，温度变化 10%左右，饱和蒸气压就要变化一个数量级左右。

下面计算由于 1%的温度变化，所引起铝蒸发薄膜生长速率的变化情况。*B* 值可由式（2.2.1-5）计算求得，取为 3.586×10^4（K），在蒸气压为 1 托时的蒸发温度值为 1830K，由式（2.2.1-11）

$$\frac{dG}{G}=\left(\frac{3.586\times10^4}{1830}-\frac{1}{2}\right)\times10^{-2}=0.1909$$

以上说明，蒸发源 1%的温度变化会引起生长速率有 19%的改变。

四、蒸发分子的平均自由程与碰撞几率

真空室内存在着两种粒子，一种是蒸发物质的原子或分孔子，另一种是残余气体分子。真空蒸发实际上都是在具有一定压强的残余气体中进行的。显然，这些残余气体分子会对薄膜的形成过程乃至薄膜的性质产生影响。

由气体分子运动论可求出在热平衡条件下，单位时间通过单位面积的气体分子数 Ng 为

$$N_g=3.513\times10^{22}\frac{P}{\sqrt{TM}}\ （个/cm^2\cdot s） \qquad (2.2.1\text{-}13)$$

此式与式（2.2.1-9）是相同的，式中 P 是气体压强（托）；M 是气体的摩尔质量（克），T 是气体温度（K），Ng 就是气体分子对基板的碰撞率。

表 2.2.1-2 给出几种典型气体分子的 Ng。由该表可见，每秒钟大约有 1015

个气体分子到达单位基板表面，而一般的薄膜淀积速率为几 Å/s（大约 1 个原子层厚）。很显然，在残余气体压强为 10-5 托时，气体分子与蒸发物质原子几乎按 1：1 的比例到达基板表面。气体分子对基板表面的粘附系数，决定于残余气体分子与基板表面的性质以及基板温度等因素。对于化学活性大的基板粘附系数大约为 1。因此，要获得高纯度的薄膜，就必须要求残余气体的压强应非常低。

表 2.2.1-2 气体分子的碰撞次数

物质	分子量	Ng（$cm^{-2} \cdot s^{-1}$）*	
		10^{-5}（托）	10^{-2}（托）
H_2	2	1.4×10^{15}	1.4×10^{18}
Ar	40	3.2×10^{15}	3.2×10^{18}
O_2	32	3.6×10^{15}	3.6×10^{18}
N_2	28	3.8×10^{15}	3.8×10^{18}

*T = 300K，粘附系数 $a \approx 1$

蒸发材料分子在残余气体中飞行，这些粒子在不规则的运动状态下，相互碰撞，又与真空室壁相撞，从而改变了原有的运动方向并降低其运动速度。如前所述，粒子在两次碰撞之间所飞行的平均距离称为蒸发分子的平均自由程 λ，并可表示为

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}n\pi d^2} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi P d^2}$$

$$= \frac{2.331\times10^{-20}T}{P(\text{托})\ d^2}$$

$$= \frac{3.107\times10^{-18}T}{P(\text{帕})\ d^2} \qquad (2.2.1\text{-}14)$$

式中，n 是残余气体分子密度，d 是碰撞表面，大约为几个(Å)²，例如，在 10^{-2} 帕（$n\approx3\times10^{12}/cm^3$）的气体压强下，蒸发分子在残余气体中的 λ 大约为 50cm，这与普通真空镀膜室的尺寸不相上下。因此，可以说在高真空条件下大部分的蒸发分子几乎不发生碰撞而直接到达基板表面。

显然，平均自由程及蒸发分子与残余气体分子的碰撞都具有统计规律。设 N_0 个蒸发分子飞行距离 x 后，未受到残余气体分子碰撞的数目

$$N_z = N_0 e^{-z/\lambda}$$

则被碰撞的分子百分数

$$f = 1 - \frac{N_z}{N_0} = 1 - e^{-z/\lambda} \qquad (2.2.1\text{-}15)$$

图 2.2.1-3 是根据式（2.2.1-15）进行计算所得蒸发分子在源一基之间渡越过程中，蒸发分子的碰撞百分数与实际行程对平均自由程之比的曲线。当平均自由程等于源一基距时，大约有 63%的蒸发分子受到碰撞；如果平均自由程增加 1-倍，则碰撞几率将减小到 9%左右。由此可见，只有当 $\lambda >> l$（l 为源—基距）时，即只有在平均自由程较源—基距大得多的情况下，才能有效减少蒸发分子在渡越中的碰撞现象。

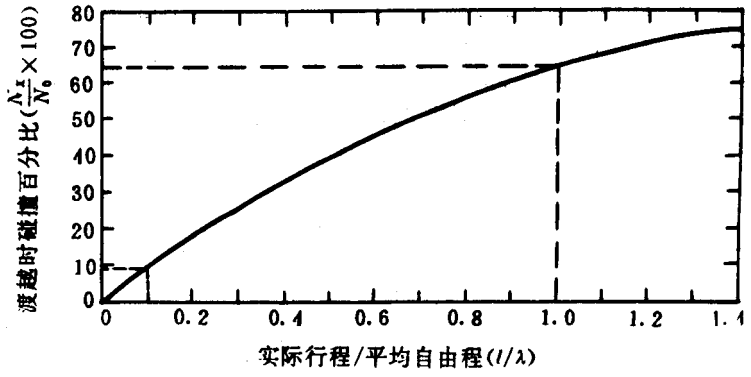


图 2.2.1-3 渡越过程中蒸发分子的碰撞几率

与实际行程对平均自由程之比的关系曲线

如果真空度足够高，平均自由程足够大，且满足条件 $\lambda >> l$，则有 $f \approx 1/\lambda$，将式（2.2.1-19）代入后可得

$$f \approx 1.50lP \qquad (2.2.1\text{-}16)$$

由此则得出，为了保证镀膜质量，在要求 $f \le 0.1$ 时，若源—基距 l = 25cm 时，必须 $P \le 3\times10^{-3}$ Pa。

除了上述残余气体分子的存在，对平均自由程的影响外，还应注意其对膜层的污染影响，即对于残余气体的组成也应加以注意。一般说来，真空室内的残余气体主要由氧、氮、水汽、扩散泵油蒸气、真空室内支架及夹具以及蒸发源材料所含的污染气体等组成。这些残余气体分子存在于真空室密闭系统中，主要是由于真空系统表面的解吸作用、蒸发源的释气和真空泵的回流扩散现象所形成的。对于设计优良的真空泵及其系统，泵的回流扩散作用并不严重。除了蒸发源在实际蒸发时所释放的气体以外，当气体压强低于10^{-4}Pa 时，被解吸的吸附于真空室内各种表面的吸附分子是主要的气体来源。

实际淀积薄膜时，由于残余气体和蒸发薄膜及蒸发源之间的相互反应，情况比较复杂，定量而可靠的实验数据较少。但是，对于大多数真空系统来说，水汽是残余气体的主要组份。水汽可与新生态的金属膜发生反应，生成氧化物而释放出氢气；或者与 W、Mo 等加热器材料作用，生成氧化物和氢。

五、蒸发所需热量和蒸发粒子的能量

电阻工蒸发源所需热量，除将蒸发材料加热蒸发所需热量外，还必须考虑蒸发源在加热过程中产生的热辐射和热传导所损失的热量。即蒸发源所需的总热量 Q 为

$$Q=Q_1+Q_2+Q_3 \qquad (2.2.1\text{-}17)$$

式中，Q1——蒸发材料蒸发时所需的热量；Q2——蒸发源因热辐射所损失的热量；Q3——蒸发源因热传导而损失的热量。

1．蒸发材料蒸发时所需热量

如果将分子量为 M 重量为 M 克的物质，从室温 T0 加热到蒸发温度 T 所需的热量为 Q1，则

$$Q_1=\frac{W}{M}\left(\int_{T_0}^{Tm}c_S\,dT+\int_{T_m}^{T}c_L\,dT+L_m+L_v\right) \qquad (2.2.1\text{-}18)$$

式中，cS 是固体比热（cal/C mol）；cL 是液体比热（cal/C·mol）；Lm 是固体的熔解热（cal/ mol）；Lv 是分子蒸发热或气化热（cal/mol）；Tm 是固体的熔点（K）。当蒸发过程有生成或分解时，还须将这部分热量考虑进去。另外，对直接升华的物质，Lm 和 Lv 的值可不考虑。常用金属材料所需蒸发热

如表 2.2.1-3 所示。

表 2.2.1-3 常用金属的蒸发热量（在 P = 1Pa 时）

名　　称	Q_1（kJ/g）	名　　称	Q_1（kJ/g）
Al	12.98	Cr	8.37
Ag	2.85	Zr	7.53
Au	2.01	Ta	4.60
Ba	1.34	Ti	10.47
Zn	2.09	Pb	1.00
Cd	10.47	Ni	7.95
Fe	79.53	Pt	3.14
Cu	5.86	Pd	4.02

从表中可以看出，不同物质在相同压强下所需的蒸发热是不相同的。

应当指出，蒸发热量 Q 值的 80%以上是作为蒸发势 L_e 而消耗掉的。此外，还有辐射和传导损失的热量。

2．热辐射损失的热量估计

这部分损失的热量与蒸发源的形状、结构和蒸发源材料有关，可由下式估计

$$Q_2 = \sigma \cdot \alpha_s \cdot T^4 \qquad (2.2.1\text{-}19)$$

式中，σ 是斯特范-玻尔兹曼（Stefan-Boltzmann）常数，$\sigma = 5.668 \times 10^{-12}$ W/cm2・℃4 或 $\sigma = 1.35 \times 10^{-12}$ Cal/cm2・s・℃4；α_s 为辐射系数，可从物理手册中查知；T 为蒸发温度。

3．热传导的损失热量

如果按单层屏蔽热传导计算，则

$$Q_3 = \frac{\zeta F(T_1 - T_2)}{S} \qquad (2.2.1\text{-}20)$$

式中，ζ 是电极材料的热传导系数；F 为导热面积；S 是导热壁的厚度；T1 是高温面温度；T2 是低温面温度。

蒸发源所需的总热量 Q 即为蒸发源所需的总功率。

2.2.2 热蒸发镀膜工艺分类

蒸发源是蒸发装置的关键部件，大多数金属材料都要求在 1000~2000℃的高温下蒸发。因此，必须将蒸发材料加热到很高的蒸发温度。最常用的加热方式有：电阻法和电子束法、。下面对两种加热方式的蒸发源进行分别讨论。

一、电阻蒸发源

采用钽、钼、钨等高熔点金属，做成适当形状的蒸发源，其上装入待蒸发材料，让电流通过，对蒸发材料进行直接加热蒸发，或者把待蒸发材料放入 Al2O3、BeO 等坩埚中进行间接加热蒸发，这便是电阻加热蒸发法。由于电阻加热蒸发源结构简单、价廉易作，所以是一种应用很普通的蒸发源。

采用电阻加热法时应考虑蒸发源的材料和形状。

1．蒸发源材料

通常对蒸发源材料的要求是：

（1）熔点要高。因为蒸发材料的蒸发温度（饱和蒸气压为 10-2 托时的温度）多数在 1000~ 2000℃之间，所以蒸发源材料的熔点必须高于此温度。

（2）饱和蒸气压低。这主要是为防止或减少在高温下蒸发源材料会随蒸发材料蒸发而成为杂质进入蒸镀膜层中。只有蒸发源材料的饱和蒸气压足够低，才能保证在蒸发时具有最小的自蒸发量，而不致于产生影响真空度和污染膜层质量的蒸气。表 2-4 列出了电阻加热法中常用蒸发源材料金属的熔点和达到规定的平衡蒸气压时的温度。为了使蒸发源材料所蒸发的数量非常少，在选择蒸发源材料时，应使蒸发材料的蒸发温度要低于表 2-4 中蒸发源材料在平衡蒸气压为 10-8 托（≈10-6 帕）时的温度。在遇到杂质较多的情况下可采用与 10-5 托所对应的温度。

表 2.2.2-4 电阻蒸发源材料的熔点和对应的平衡蒸气压的温度

蒸发源材料	熔点（K）	平衡温度（K）		
		10^{-8} 托	10^{-5} 托	10^{-2} 托
W	2683	2390	2840	3500

Ta	3269	2230	2680	3330
Mo	2890	1865	2230	2800
Nb	2741	2035	2400	2930
Pt	2045	1565	1885	2180
Fe	1808	1165	1400	1750
Ni	1726	1200	1430	1800

（3）化学性能稳定，在高温下不应与蒸发材料发生化学反应。但是，在电阻加热法中比较容易出现的问题，是在高温下某些蒸发源材料与蒸镀材料之间会产生反应和扩散而形成化合物和合金。特别是形成低共熔点合金，其影响非常大。例如在高温时钽和金会形成合金，铝、铁、镍、钴等也会与钨、钼、钽等蒸发源材料形成合金。而一旦形成低共熔合金，熔点就显著下降，蒸发源就是很容易烧断。又如 B_2O_3 与 W、Mo、Ta 均有反应，W 还能与水汽或氧发生反应，形成挥发性的氧化物如 WO、WO_2 或 WO_3；Mo 也能与水汽或氧反应而形成挥发性 MoO_3 等。因此，应选择不会与镀膜材料发生反应或形成合金的材料做该材料的蒸发源材料。各种物质蒸发时所用蒸发源见表 2.2.2-5 所示。

表 2.2.2-5 适合于各种元素的蒸发源

元素	温度（℃）		蒸发源材料		
	熔点	10^{-2} 托	丝状、片状	坩埚	
Ag	961	1030	Ta,Mo,W	Mo,C	按适合程度排列，下同。与 W 不浸润
Al	659	1220	W	BN,TiC/C, TiB_2-BN	可与所有 RM 形成合金，难以蒸发。高温下能与 Ti,Zr,Ta 等反应。
Au	1063	1400	W,Mo	Mo,C	浸润 W，Mo；与 Ta 形成合金，Ta 不宜作素发源
Ba	710	610	W,Mo,Ta Ni,Fe	C	不能形成合金，浸润 RM，在高温下与大我数氧化物发生反应
Bi	271	670	W,Mo,Ta,Ni	Al_2O_3,C 等	蒸气有毒
Ca	850	600	W	Al_2O_3	在 He 气氛中预熔解去气
Co	1495	1520	W	Al_2O_3,BeO	与 W，Ta，Wo、Pt 等形成合金
Cr	~1900	1400	W	C	
Cu	1084	1260	Mo,Ta,Nb,W	Mo,C,Al_2O_3	不能直接浸润 Mo，W，Ta
Fe	1536	1480	W	BeO,Al_2O_3,ZrO_2	与所有 RM 形成合金，宜采用 EBV
Ge	940	1400	W,Mo,Ta	C,Al_2O_3	对 W 溶解度小，浸润 RM，不浸润 C
In	156	950	W,Mo	Mo,C	
La	920	1730	—	—	宜采用 EBV
Mg	650	440	W,Ta,Mo,Ni,Fe	Fe,C,Al_2O_3	
Mn	1244	940	W,Mo,Ta	Al_2O_3,C	浸润 RM
Ni	1450	1530	W	Al_2O_3,BeO	与 W，Mo，Ta 等形成合金，宜采用 EBV

Pb	327	715	Fe,Ni,Mo	Fe,Al_2O_3	不浸润 RM
Pd	1550	1460	W（镀 Al_2O_3）	Al_2O_3	与 RM 形成合金
Pt	1773	2090	W	ThO_2,ZrO_2	与 Ta, Mo, Nb 形成合金，与 W 形成部分合金，宜采用 EBV 或溅射
Sn	232	1250	Ni-Cr 合金，Mo,Ta	Al_2O_3,C	浸润 Mo，且浸蚀
Ti	1727	1740	W,Ta	C,ThO_2	与 W 反应，不与 Ta 反应，熔化中有时 Ta 会断裂
Tl	304	610	Ni,Fe,Nb Ta,W	Al_2O_3	浸润左边金属，但不形成合金。稍浸润 W，Ta，不浸润 Mo
V	1890	1850	W,Mo	Mo	浸润 Mo，但不形成合金。在 W 中的溶解度很小，与 Ta 形成合金
Y	1477	1632	W		
Zn	420	345	W,Ta,Mo	Al_2O_3,Fe,C,Mo	浸润 RM，但不形成合金
Zr	1852	2400	W		浸润 W，溶解度很小

注：RM——高熔点金属；EBV——电子束蒸发。

作为改进的办法，是采用氮化硼（BN50%-$TiB_2$50%）导电陶瓷坩埚、氧化锆（ZrO_2）、氧化钍（ThO_2）、氧化铍（BeO）、氧化镁（MgO）、氧化铝（Al_2O_3）坩埚以及石墨坩埚，或者采用蒸发材料自热蒸发源等。

（4）具有良好的耐热性，热源变化时，功率密度变化较小；

（5）原料丰富，经济耐用。

根据这些要求，在制膜工艺中，常用的蒸发源材料有 W、Mo、Ta 等，或耐高温的金属氧化物、陶瓷或石墨坩埚。表 2.2.2-6 列出了 W、Mo、Ta 的主要物理参数。

表 2.2.2-6 蒸发源用金属材料的性质

	温度（℃）	27	1027	1527	1727	2027	2327	2527
W (熔点：3380℃ 相对密度： 19.3	电阻率(μΩ·cm) 蒸气压（Pa） 蒸发速率(g/cm²·s) 光谱辐射率 (0.665μm)	5.66 — — 0.470	33.66 — — 0.450	50 — — 0.439	56.7 1.3×10^{-9} 1.75×10^{-13} 0.435	66.9 6.3×10^{-7} 7.8×10^{-11} 0.429	77.4 7.6×10^{-5} 8.8×10^{-9} 0.423	84.4 1.0×10^{-3} 1.1×10^{-7} 0.419
W (熔点：2630℃ 相对密度： 10.2	电阻率(μΩ·cm) 蒸气压（Pa） 蒸发速率(g/cm²·s) 光谱辐射率	5.63 — — 0.418	35.2 (1127℃) 2.1×10^{-13} 2.5×10^{-17} —	47.0 8×10^{-9} 1.1×10^{-10} 0.367 (1330℃)	53.1 5×10^{-5} 5.3×10^{-9} 0.353 (1730℃)	59.2 (1927℃) 4×10^{-5} 5×10^{-7} —	72 1.4×10^{-3} 1.6×10^{-5} —	78 9.6×10^{-3} 1.04×10^{-4} —
W (熔点：2980℃ 相对密度： 16.6	电阻率(μΩ·cm) 蒸气压（Pa） 蒸发速率(g/cm²·s) 光谱辐射率	15.5 (20℃) — — 0.490	54.8 — — 0.462	72.5 — — 0.432	78.9 1.3×10^{-8} 1.63×10^{-12} 0.421	88.3 8×10^{-8} 9.8×10^{-11} (1927℃) 0.409	97.4 5×10^{-4} 5.5×10^{-8} 0.400	102.9 7×10^{-3} 6.6×10^{-7} 0.394

2．蒸镀材料对蒸发源材料的“湿润性”

在选择蒸发源材料时，还必须考虑蒸镀材料与蒸发源材料的“湿润性”问题。这种湿润性与蒸发材料的表面能大小有关。高温熔化的蒸镀材料在蒸发源上有扩展倾向时，可以说是容易湿润的；反之，如果在蒸发源上有凝聚而接近于形成球形的倾向时，就可以认为是难于湿润的。图 2.2.2-18 示出了二者相互间湿润状态的几种情况。

在湿润的情况下，由于材料的蒸发是从大的表面上发生的且比较稳定，所以可认为是面蒸发源的蒸发；在湿润小的时候，一般可认为是点蒸发源的蒸发。另外，如果容易发生湿润，蒸发材料与蒸发源十分亲合，因而蒸发状态稳定；如果是难以湿润的，在采用丝状蒸发源时，蒸发材料就容易从蒸发源上掉下来。例如 Ag 在钨线上熔化后就会脱落。

另外，关于蒸发源的形状可根据蒸发材料的性质，结合考虑与蒸发源材料的润湿性，制作成不同的形式和选用不同的蒸发源材质。图 2.2.2-19 示出了几种典型的蒸

在制作蒸发源时，钨是比较困难的。钨在经高温退火处理后会出现再结晶，这种经过再结晶的钨大约在 400℃左右才显示出较好的柔软性。所以制作 W 蒸发源时，必须在较高温度下进行，才能弯制成简单的形状。钼即使在室温下也具有较好的柔软性，加工性良好。钼的柔性最好，很容易加工成型。

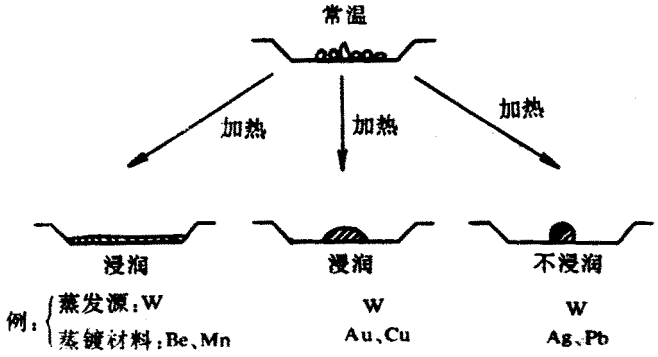


图 2.2.2-18 蒸发源材料与镀膜材料湿润 状态

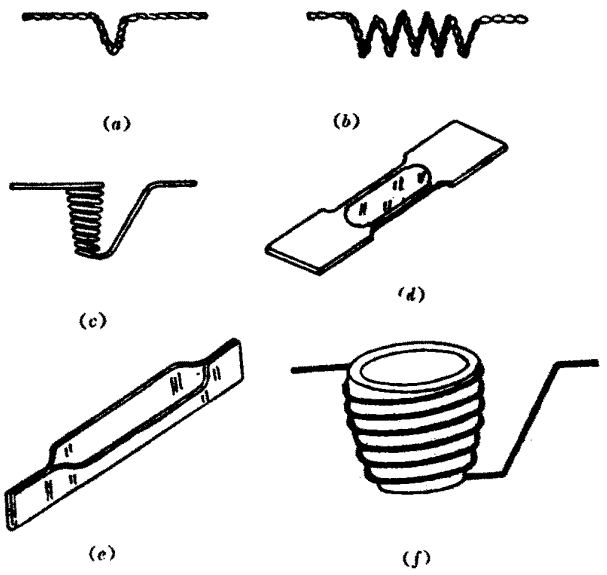


图 2.2.2-19 各种形状的电阻蒸发源

丝状蒸发源的线径一般为 0.5~1mm，特殊时可用 1.5mm。螺旋丝状蒸发源常用于蒸发铝，因为铝和钨能互相湿润，但钨在熔融铝中具有一定的溶解性，应予以注意。锥形篮状蒸发源一般用于蒸发块状或丝状的升华材料（如三股）。多股丝可有效防止断线，而且还能增大蒸发表面和蒸发量。

箔状蒸发源的厚度常为 0.05~.15mm。因为箔状蒸发源具有很大的辐射表面，它的功率消耗要比同样横截面的丝状蒸发源大 4~5 倍。用这类蒸发源蒸发材料时，应避免造成较大的温度梯度，蒸发材料与蒸发源之间要有良好的热接触，否则蒸发材料容易形成局部过热点，不仅引起材料容易分解，而且造成蒸发料的喷溅。

二、电子束蒸发源

随着薄膜技术的广泛应用，对膜的种类和质量提出了更多更严的要求。而只采用电阻加热蒸发源已不能满足蒸镀某些难熔金属和氧化物材料的需要，特别是要求制膜纯度很高的需要。于是发展了将电子束作为蒸发源的方法。将蒸发材料放入水冷铜坩埚中，直接利用电子束加热，使蒸发材料气化蒸发后凝结在基板表面成膜，是真空蒸发镀膜技术中的一种重要的加热方法和发展方向。电子束蒸发克服了一般电阻加热蒸发的许多缺点，特别适合制

作高熔点薄膜材料和高纯薄膜材料。

1．电子束加热原理与特点

电子束加热原理是基于电子在电场作用下，获得动能轰击到处于阳极的蒸发材料上，使蒸发材料加热气化，而实现蒸发镀膜。若不考虑发射电子的初速度，则电子动能$\frac{1}{2}mv^2$，与它所具有的电功率相等，即

$$\frac{1}{2}mv^2 = e \cdot U \qquad (2.2.2\text{-}55)$$

式中，U 是电子所具有的电位（V）；m 是电子质量（9.1×10-28g），e 是电荷（1.6×10-19C）。因此得出电子运动速度

$$v = 5.93 \times 10^5 \sqrt{U} \ \text{（m/s）} \qquad (2.2.2\text{-}56)$$

假如 U = 10kV，则电子速度可达 6×104km/s。这样高速运动的电子流在一定的电磁场作用下，使之汇聚成电子束并轰击到蒸发材料表面，使动能变为热能。若电子束的能量

$$W = neU = IUt \qquad (2.2.2\text{-}57)$$

式中，n 为电子密度；I 为电子束的束流（A）；t 是束流的作用时间（s）。因而其产生的热量 Q 为

$$Q = 0.24Wt \qquad (2.2.2\text{-}58)$$

在加速电压很高时，由上式所产生的热能可足以使蒸发材料气化蒸化，从而成为真空蒸发技术中的一种良好热源。

电子束蒸发源的优点为：

（1）电子束轰击热源的束流密度高，能获得远比电阻加热源更大的能量密度。可在一个不太小的面积上达到 104~109W/cm2 的功率密度，因此可以使高熔点（可高达 3000℃以上）材料蒸发，并且能有较高的蒸发速度。如蒸发 W、Mo、Ge、SiO2、Al2O3 等。

（2）由于被蒸发材料是置于水冷坩埚内，因而可避免容器材料的蒸发，以及容器材料与蒸镀材料之间的反应，这对提高镀膜的纯度极为重要。

（3）热量可直接加到蒸镀材料的表面，因而热效率高，热传导和热辐射的损失少。

电子束加热源的缺点是电子枪发出的一次电子和蒸发材料发出的二次电子会使蒸发原子和残余气体分子电离，这有时会影响膜层质量。但可通过设计和选用不同结构的电子枪加以解决。多数化合物在受到电子轰击会部分发生分解，以及残余气体分子和膜料分子会部分地被电子所电离，将对薄膜的结构和性质产生影响。更主要的是，电子束蒸镀装置结构较复杂，因而设备价格较昂贵。另外，当加速电压过高时所产生的软 X 射线对人体有一定伤害，应予以注意。

2．电子束蒸发源的结构型式

依靠电子束轰轰击蒸发的真空蒸镀技术，根据电子束蒸发源的型式不同，可分为环形枪、直枪（皮洋斯枪）、e 型枪和空心阴极电子枪等几种。环型枪是靠环型阴极来发射电子束，经聚焦和偏转后打在坩埚中使坩埚内材料蒸发。其结构较简单，但是功率和效率都不高，多用于实验性研究工作，在生产中应用较少。

直枪是一种轴对称的直线加速电子枪，电子从阴极灯丝发射，聚焦成细束，经阳极加速后轰击在坩埚中使蒸发材料熔化和蒸发。直枪的功率从几百瓦到几千瓦都有。由于聚焦线圈和偏转线圈的应用使直枪的使用较为方便。它不仅可得到高的能量密度（≥100kW/cm2），而且易于调节控制。它的主要缺点是体积大、成本高，另外蒸镀材料会污染枪体结构和存在灯丝逸出的 Na+离子污染等。最近，采取在电子束的出口处设置偏转磁场，并在灯丝部位制成有一套独立抽气系统的直枪改进型，如图 2-20 所示。不但避免了灯丝对膜层的污染，而且还有利于提高电子枪的寿命。

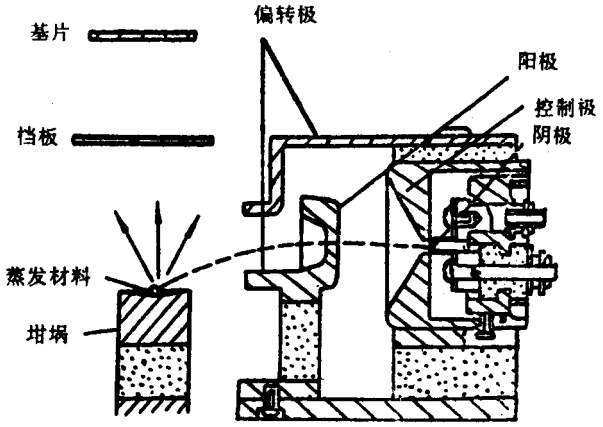


图 2.2.2-20 直枪蒸发源简图

E 型电子枪 270°偏转的电子枪，它克服了直枪的缺点，是目前用得较多的电子束蒸发源。其结构和间图如图 2-21 所示。所谓 e 型是由电子运动轨迹而得名。由于入射电子与蒸发原子相碰撞而游离出来的正离子，在偏转磁场作用下，产生与入射电子相反方向的运动，因而避免了直枪中正离子对蒸镀膜层的污染。同时 e 型枪也大大减少了二次电子（高能电子轰击材料表面所产生的电子）对基板轰击的几率。

由于 e 型枪能有效地抑制二次电子，可方便地通过改变磁场调节电子束的轰击位置。再加上在结构上采用内藏式阴极，即防止了极间放电，又避免了灯丝污染。目前 e 型枪已逐渐取代了直枪和环形枪。

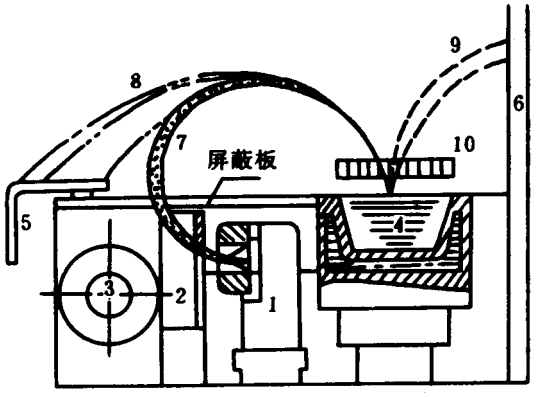


图 2.2.2-21 e 型电子枪的工作原理

1—发射体 2—阳极 3—电磁线圈 4—水冷坩埚 5—收集极 6—吸收极

7—电子轨迹 8—正离子轨迹 9—散射电子轨迹 10—等离子体

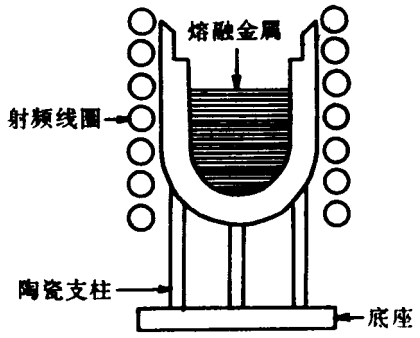


图 2.2.2-22 高频感应加热源的工作原理

以电子束蒸发镀膜（VPT 镀膜机）机为例，讲述具体电子束预熔的操作及工作方式。

预融准备

j) 在 PUMPING SYSTEM 系统下，点击 AUTOPUMP ON 按钮，自动关闭高阀，等待 20 秒，再点击 SLOW VENT 阀门，等待真空室门打开；

k) 清洁真空室，检查电子枪组件同时完成清洁操作；

l) 加入蒸发材料后，关闭真空室门。在 PUMPING SYSTEM 系统下，点击 AUTOPUMP OFF 按钮，开始自动抽真空；

m) 在真空度达到 5×10^{-5}Torr 后，确认气流控制器面板上的开关位置，通道选择旋钮拨到 1 位置，控制旋钮拨到 AUTO 位置，打开气流控制器开关，开始对真空室充氧，真空度达到 1.0×10^{-4}Torr；1.6×10^{-4}Torr(是否充氧由工艺决定)

n) 将坩锅转动开关拨由 AUTO 到 MANUAL,手动调节坩锅位置和转速;

o) 确认 dual EB 电子枪束流旋钮处于零位，面板开关拨到 LOC 位置，蒸发源挡板处于关闭的位置，打开高压电源开关(钥匙和 ON 按钮)，等待 5min 后，按 RESET 键完成系统连锁控制，打开高压开关，手动调节发射束流，先使用低的发射束流 program 调整光斑位置。再增加发射束流完成预融操作；

p) 电子枪扫描方式由工艺确定；

q) 完成预融操作后，把气流控制器通道选择旋钮拨到 R 位置，控制旋钮拨到 EXT 位置。把电子枪面板开关由 LOC 位置拨到 REMOTE 位置；

2.2.3 离子束辅助工艺介绍

离子辅助沉积（IAD）是在镀膜过程中将常规的电子束蒸发技术与离子体电弧技术相结合，它是目前在镀制优质光学薄膜的主要方法之一。图 1.8 是带有等离子源（也称 Advanced Plasma Source）和电子枪（E-Gun）的真空室工作情形。

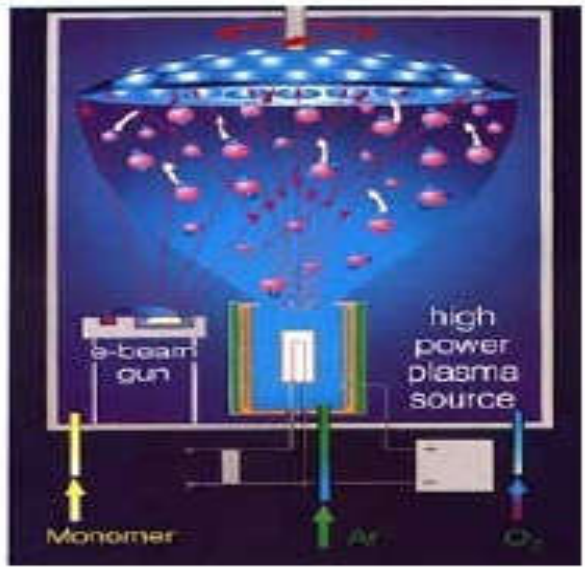


图 2.2.3-23 离子辅助沉积示意图

离子源是由一个 LaB6 热阴极、柱状的阳极筒和一个磁场线圈组成，安装在真空室的底部中央位置。其结构装置如图 1.9 所示。

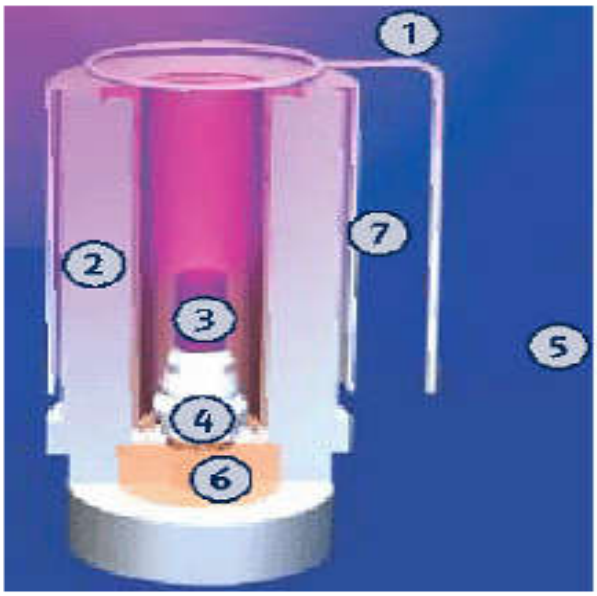


图 2.2.3-24 离子源结构示意图

1、充气环；2、阳极筒；3、阴极；4、加热器；5、真空室基座；

6、冷却水；7、法拉第线圈

其工作原理是：LaB6 阴极被石墨灯丝加热器间接加热，热阴极受热后发射热电子，在阴极及阳极间加上直流电压，同时充入惰性气体，通常用氩，由于辉光放电产生等离子体，又由于阳极周围是由螺旋管线圈的磁场围绕着，等离子体就在磁场的作用下沿螺线向工件盘运动，由于等离子体的作用，反应气体、蒸发材料的分子或原子也被离化，产生了离子镀的过程。等离子源相对真空室是电绝缘的，由于电子迁移率高，电子首先到达基片和真空室壁，使阳极与基片和真空室壁产生一个自偏压，如图 2.4 所示，基片相对于离子源为负电位，离化后的离子在电场作用下得到了加速，这样就增加了膜料粒子在基片表面沉积的迁移力，提高了膜层的密度，减小了水汽的浸入。这样一个过程与离子源之间形成一个均匀的等离子体区，由于较高的等离子区密度，反应气体(氧气)通过等离子源上方的环形喷头充入，被激活和部分离化，蒸发物也部分被离化。这样淀积物气体分子的能量被提高，分子之间的作用力又降低了对气压的要求，这些都有利于薄膜生长，提高薄膜性能。

另外，离子源与基片间的负偏压取决于真空度、提供的放电电压、磁场的强度等因素有关，在使用中可根据工艺要求来控制离子能量。此离子源可用于蒸镀氧化物、低价氧化物、硫化物、氟化物、半导体以及金属材料等。除此之外，由于离子体源的可作用 $1m^2$ 范围，故可满足大面积均匀薄膜的制备，并有助于提高产量。

2.2.4 影响热蒸发镀膜质量的工艺参数

薄膜的性质和结构主要决定于薄膜的成核与生长过程，实际上受许多淀积参数的影响，如淀积速率、粒子速度与角分布、粒子性质、衬底温度及真空度等。因此，在气相沉积技术中为了监控薄膜的性质与生长过程， 必须对淀积参数进行有效的测量与监控。在所有沉积技术中，淀积速率和膜厚是最重要的薄膜淀积参数。显然，用于淀积速率测量的实时方法，对于时间的积分也能用于膜厚的测量，而非实时方法则只能测量膜厚。从原则上讲，与膜厚相关的任何物理量都能用来确定膜厚。但是，实际并非如此，因为与膜厚有关的大部分物理性质，强烈地受微观结构的影响，即受淀积参数的影响。

一、膜厚的分类

所谓薄膜是指在基板的垂直方向上所堆积的 $1\sim10^4$ 的原子层或分子层。在此方向上，薄膜具有微观结构。

厚度是指两个完全平整的平行平面之间的距离，是一个可观测到实体的尺寸。因此，这个概念是一个几何概念。理想的薄膜厚度是指基片表面和薄膜表面之间的距离。由于薄膜仅在厚度方向是微观的，其他的两维方向具有宏观大小。所以，表示薄膜的形状，一定要用宏观方法，即采用长、宽、厚的方法。因此，从这个意义上讲，膜厚既是一个宏观概念，又是微观上的实体线度。由于实际上存在的表面是不平整和不连续的，而且薄膜内部还可能存在着针孔、杂质、晶格缺陷和表面吸附分子等，所以，要严格地定义和精确测量薄膜的厚度实际上是比较困难的。膜厚的定义应根据测量的方法和目的来决定。因此，同一薄膜，使用不同的测量方法将得到不同的结果，即不

同的厚度。

经典模型认为物质的表面并不是一个抽象的几何概念，而是由刚性球的原子（分子）紧密排列而成，是实际存在的一个物理概念。图 2-30 是实际表面和平均表面的示意图。平均表面是指表面原子所有的点到这个面的距离代数和等于零，平均表面是一个几何概念。通常，将基片一侧的表面分子的集合的平均表面称为基片表面 S_S；薄膜上不与基片接触的那一侧的表面的平均表面称为薄膜形状表面 S_T；将所测量的薄膜原子重新排列，使其密度和块状材料相同且均匀分布在基片表面上，这时的平均表面称为薄膜质量等价表面 S_M；根据测量薄膜的物理性质等效为一定长度和宽度与所测量的薄膜相同尺寸的块状材料的薄膜，这时的平均表面称为薄膜物性等价表面 S_P。由此可以定义：

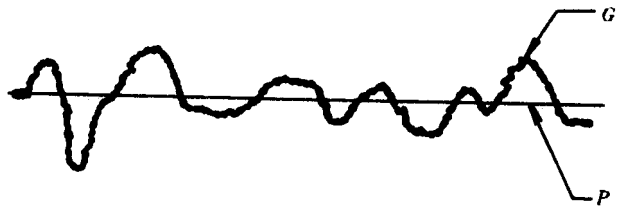


图 2.2.4-25 实际表面和平均表面示意图

G—实际表面；P—平均表面

（1）形状膜厚 d_T 是 S_D 和 S_T 面之间的距离；

（2）质量膜厚 d_M 是 S_S 和 S_M 面之间的距离；

（3）物性膜厚 d_P 是 S_S 和 S_P 面之间的距离。

上述各种膜厚定义如图 2-31 所示。形状膜厚 d_T 是 最接近于直观形式的膜厚，通常以 μm 为单位。d_T 只与表面原子（分子）有关，并且包含着薄膜内部结构的影响；质量膜厚 d_M 反映了薄膜中包含物质的多少，通常以 $\mu g/cm^2$ 为单位，它消除了薄膜内部结构的影响（如缺陷、针孔、变形等）；物性膜厚 d_P 在实际使用上较有用，而且比较容易测量，它与薄膜内部结构和外部结构无直接关系，主要取决于薄膜的性质（如电阻率、透射率等）。三种定义的膜厚往往满足下列不等式：

$$d_T \geq d_M \geq d_P$$

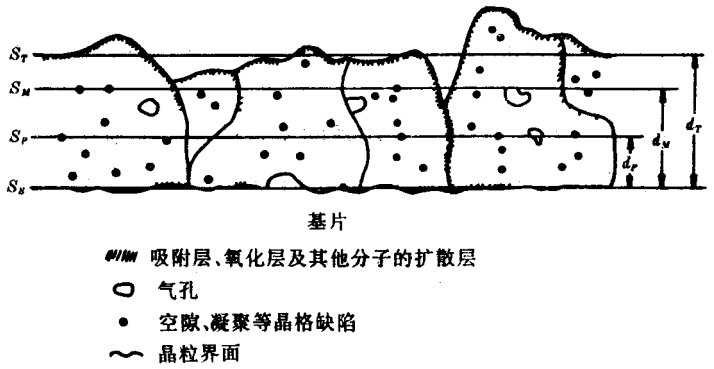


图 2.2.4-26 假想的薄膜剖面和膜厚定义示意图

由于实际表面的不平整性，以及薄膜不可避免有各种缺陷、杂质和吸附分子等存在，所以不论用哪种方法来定义和测量膜厚，都包含着平均化的统计概念，而且所得膜厚的平均值是包括了杂质、缺陷以及吸附分子在内的薄膜的厚度值。三种膜厚的测试方法如一有 2-8 所示。在形状膜厚的测量方法中，触针法和多次反射干涉法最常用，由它们所确定的膜厚，确实是由表面的形状所决定。在质量膜厚测定中，天平法最常用，但难以实现自动测试，为此多采用石英晶体振荡法代替。一般说来，只要厚度随薄膜物性变化，都能用于物性厚度的测量。并且由于这种方法的灵敏度高、测试容易和比较直观等，所以电物性和电光性的膜厚测量方法应用最广泛。

上述的测量方法，一些方法只能用于薄膜形成以后的测量，而另一些方法则可在薄膜形成的实际过程中监控其膜厚的变化。通过测量单位时间内薄膜的生长厚度，就能用这些监控膜厚的方法来测定薄膜的淀积速率。

下面介绍几种代表性的测定膜厚的方法。

表 2.2.4-7 膜厚的测试方法

膜厚定义	测试手段	测 试 方 法
形状膜厚	机械方法	触针法，测微计法
	光学方法	多次反射干涉法，双光线干涉法
	其他方法	电子显微镜法

质量膜厚	质量测定法 原子数测定法	化学天平法，微量天平法，扭力天平法，石英晶体振荡法 比色法、X 射线荧光法、离子探针法、放射性分析法
物性膜厚	电学方法 光学方法	电阻法、电容法、涡流法、电压法 干涉色法、椭圆偏振法、光吸收法

二、称重法

1．微量天平法

这个方法是建立在直接测定蒸镀在基片上的薄膜质量基础之上。因此所使用的天平必须满足专门的要求，具有足够的灵敏度，机械上是刚性的，在较高温度下易于除气并有非周期性的阻尼特性。

它是将微量天平设置在真空室内，把蒸镀的基片吊在天平横梁的一端，测出随薄膜的淀积而产生的天平倾斜，进而求出薄膜的积分堆积量，然后换算为膜厚。由此便可得到质量膜厚。

如果，积分 堆积量（质量）为 m，蒸镀膜的密度为 ρ，基片上的蒸镀面积为 A，其膜厚可由下式确定

$$t = \frac{m}{\rho A} \qquad (2.2.4\text{-}70)$$

式中，ρ 一般采用块材的密度值。

微量天平法的优点：灵敏度高，而且能测定淀积质量的绝对值；能在比较广的范围内选择基片材料；能在淀积过程中跟踪质量的变化等。如与偏光解析法或石英晶体振荡法并用，可用于研究金属薄膜的初期生长过程。

在一定的面积内，测定面积 A 的误差可以保持很小，并可忽略。因此厚度部分的误差 dt/t 为

$$\frac{dt}{t} = \frac{dm}{m} \qquad (2.2.4\text{-}71)$$

如果处理得当，测定质量的误差可为±2 μg。

若在淀积薄膜后从真空系统中取出称重量，由于在基片上刚淀积的薄膜

暴露在大气时，会立即吸附水气等，吸气后的重量变化可能比微量天平的精度大 1~2 个数量级。因而在这种情况下应用此方法测定膜厚，其精确性将受到限制。

此方法的另一个问题是不能在一个基片上测定膜厚的分布，因为所得到的是整个面积 *A* 上的平均厚度。此外，如果薄膜的实际密度不等于块材密度时，这一等效厚度也就不是真正的厚度。通常由式（2-70）得到的厚度值稍小于实际的厚度值。

2．石英晶体振荡法

这是一种利用改变石英晶体电极的微小厚度，来调整晶体振荡器的固有振荡频率的方法。利用这一原理，在石英晶片电极上淀积薄膜，然后测基固有频率的变化就可求出质量膜厚。由于此法使用简便，精确度高，已在实际中得到广泛应用。此法在本质上也是一种动态称重法。

石英晶片的固有振动频率 *f*、波长 λ 和声速 *v* 之间有以下关系式

$$\lambda f = v \tag{2.2.4-72}$$

如果石英晶片的厚度为 *t*，对基波而言，则波长 λ 为

$$\lambda = 2t \tag{2.2.4-73}$$

再设石英晶片的密度为 ρ，切变弹性系数为 *c* 则

$$v = \sqrt{c/\rho} \tag{2.2.4-74}$$

将式（2.2.4-73）、（2.2.4-74）代入式（2.2.4-72），可得

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{N}{t} \tag{2.2.4-75}$$

式中，N 为频率常数，其值 $N = (c/\rho)^{1/2}/2$，对于 AT 切割方式，N = 1670kHz・mm。

对式（2.2.4-75）求导，则得

$$df = -\frac{N}{t^2}dt \tag{2.2.4-76}$$

由此可知，厚度的变化与振荡频率成正比。式中的负号表示石英晶体厚度增

加时其频率下降。

若在蒸镀时石英晶体上接收的淀积厚度（质量膜厚）为 dx，则相应的晶体厚度变化为

$$dt = \frac{\rho_m}{\rho} dx \qquad (2.2.4\text{-}77)$$

式中，ρ_m 为淀积物质的密度，ρ 是石英晶体的密度，其值 ρ =2.65g/cm3。当 ρ mdx 在不大的范围内，可把由式（2.2.4-77）给出的 dt 代入式（2.2.4-76），则得

$$df = -\frac{v^2}{N} \cdot \frac{\rho_m}{\rho} \cdot dx \qquad (2.2.4\text{-}78)$$

此式即为表示振荡频率变化与薄膜质量膜厚之间关系的基本公式。

这种测膜厚方法的优点是测量简单，能够在制膜过程中连续测量膜厚。而且，由于膜厚的变化是通过频率显示，因此，如果在输出端引入时间的微分电路，就能测量薄膜的生长速度或蒸发速率。其缺点是，测量的膜厚始终是在石英晶体振荡片上的薄膜厚度。并且每当改变晶片位置或蒸发源形状时，都必须重新校正；若在溅射法中应用此法测膜厚，很容易受到电磁干扰。此外，探头（石英晶片）工作温度一般不允许超过 80℃否则将会带来很大误差。

利用上述原理制成的石英晶体膜厚监控仪国产型号有 MSB-型、SK-1A（B）型等，可用于电阻或电子束蒸发设备上，监控金属、半导体和介质薄膜的厚度。

该方法最高灵敏度是 20Hz 左右，换算为石英晶体的质量膜厚为 12Å。

三、电学方法

1．电阻法

由于电阻值与电阻体的形状有关，利用这一原理来测量膜厚的方法称电阻法。电阻法是测量金属薄膜厚度最简单的一种方法。由于金属导电膜的阻值随膜厚的增加而下降，所以用电阻法可对金属膜的淀积厚度进行监控。以

制备性能符合要求的金属薄膜。但是，随着薄膜厚度的减小，电阻增大的速率比预料的要大。产生这一现象的原因是由于薄膜界面上的散射和薄射的结构与大块材料的结构不同，以及附着和被吸附的残余气体对电阻的影响造成的。此外，超薄薄膜的电导率会发生变化，是因为这种薄膜是不连续的，以岛状结构形式存在，其特性与连续薄膜完全不一样。尽管如此，在相当宽的膜厚范围内，尤其在较高淀积速率和低的残余气体压强条件下，用电阻测量法确定膜厚仍然是适用的。

由于材料的电阻率（或者电导率）通常是与整块材料的形状有关的一个确定值，如果认为薄膜的电阻率与块材相同，则可由下式确定膜厚，即

$$t = \frac{\rho}{R_S} \qquad （2.2.4\text{-}79）$$

式中，R_S为正方形平板电阻器沿其边方向的电阻值，该R_S值与正方形的尺寸无关，常称为方电阻或面电阻，简称方阻，单位为Ω/□。方阻是在实际上经常使用的一个参数。

因此，采用电桥法或欧姆表直接测试出阻值监控片上的淀积薄膜的方电阻值，便可根据式（2.2.4-79）得出膜厚值。

用电桥法测量电阻的原理如图 2.2.4-27 所示。采用电阻法测量的薄膜电阻值范围介于几分之一欧至几百兆欧之间，一俟达到设计电阻值时，通过继电器控制电磁阀挡板，便可立即停止蒸发淀积。使用普通仪器，电阻测量精度可达±1%~±0.1%。由于准确确定薄膜的ρ值有困难，所以用电阻法测得的膜厚仍有一定误差。通常为≥±5%左右。

2．电容法

电介质薄膜的厚度可以通过测量它的电容量来确定。根据这一原理可以在绝缘基板上，按设计要求先淀积出叉指形电极对，使之形成平板形叉指形电极时，使之形成平板形叉指电容器。当未淀积介质时，叉指电容值主要由基板的介电常数决定。而在叉指上淀积介质薄膜后，其电容值由叉指电极

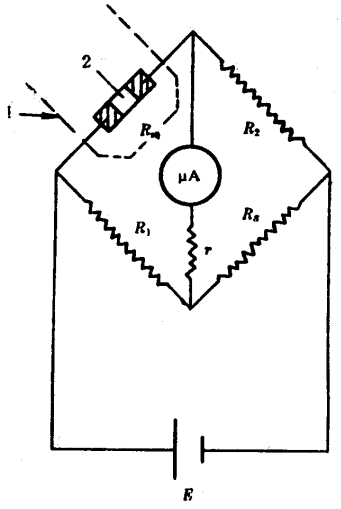


图 2-27 由测量电阻值（RS）来测量膜厚的电桥回路

1—真空室　2—蒸发面

的间距和厚度，以及淀积薄膜的介电系数决定。只要用电容电桥测出电容值便可确定淀积的膜厚。

另一种方法是在绝缘基板上先形成下电极，然后淀积一层介质薄膜后，再制作上电极，使之形成一个平板形电容器。然后根据平板电容器公式，在测出电容值后，便可计算出淀积介质薄膜的厚度。显然，这种方法只能用于淀积 后的膜厚测量，而不能用于淀积过程的监控。计算时所需要的ε值，可取块材介质的介电系数值。

由于确定介电系数和平板电容器或叉指电容器的表面积（电极）所造成的误差，限制了这种方法的准确性。

3．电离式监控计法

电离式监控计是基于电离真空计的工作原理，在真空蒸发过程中，蒸发物的蒸气通过一只类似 B-A 规式的传感规时，与电子碰撞并被电离，所形成离子流的大小与蒸气的密度成正比。由于残余气体的影响，传感规收集到的离子流由蒸发物蒸气和残余气体两部分离子流组成。如果用一只补偿规测出残余气体离子流的大小，并将两只规的离子流送到差动放大器，再通过电路补偿消除残余气体的离子流，这样得到的差动信号就是蒸发物质的蒸发速率

信号，利用此信号可以实现蒸发速率的测量与控制。

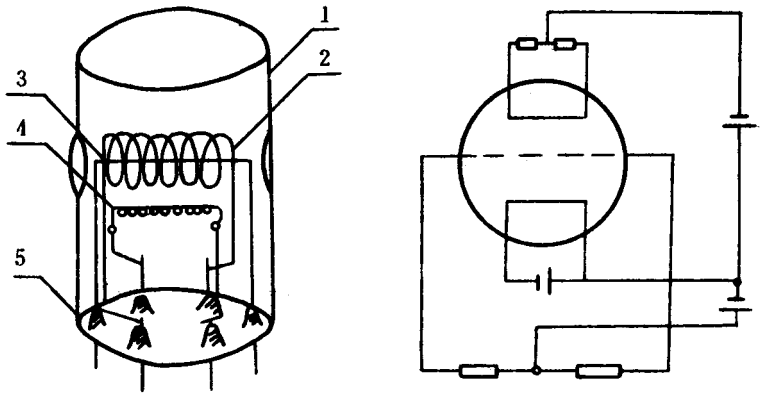


图 2.2.4-28 传感规结构示意图

1—带水冷却罩　2—加速极　3—收集极　4—发射极　5—芯柱

电离式监控计只适于真空蒸发镀膜工艺。所用传感规实际上是经过改型的 B-A 真空规，其结构如图 2-33 所示。补偿规的尺寸与传感规定完全相同。二者灵敏度尽可能一致。图 2-34 示出了电离式监控计的原理方框图。差动放大器将传感规和补偿两个离子流之差进行放大，就成为蒸发速率信号，再将该信号送到自动平衡记录仪，并同时通过放大调节器送到磁放大器，就可实现对蒸发电源进行自动调节，从而达到控制蒸发速率的目的。

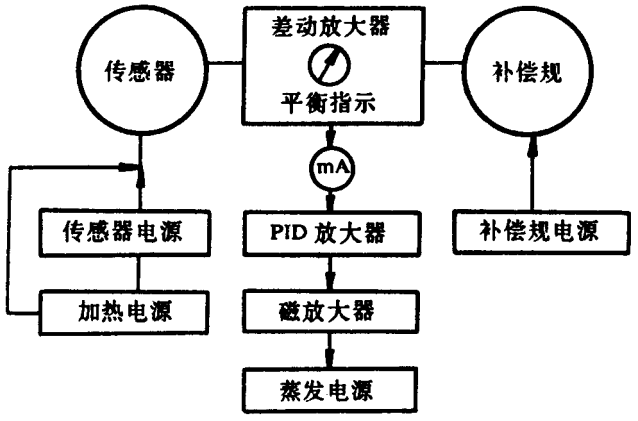


图 2.2.4-29 电离式监控计示意图

四、光学方法

1．光吸收法

如果强度为 I_0 的光照射具有光吸收性的薄膜，则透过薄膜的光强度可由下式表示

$$I = I_0(I-R)^2 \exp(\alpha t) \qquad (2.2.4\text{-}80)$$

式中，t 为膜厚，α 是吸收系数，R 为薄膜与空气界面上的反射率。

显然，通过测量光强度的变化，利用上式可以确定吸收薄膜的厚度。这种方法非常简单，常用于金属蒸发膜厚度测定，且适用于淀积过程的控制。淀积速率一定时，在半对数坐标图上，透射光强与时间的关系是线性的。

这种方法也适用于在一定面积上薄膜厚度均匀性的检测。但必须指出，此方法只适用于能形成连续的、薄的微晶的薄膜材料（如 Ni-Fe 合金等），其他物质（如 Ag）在小的厚度时（~30nm），透射光强随厚度成线性衰减。因此，只有能满足式（2.2.4-80）的蒸发材料才适用。

2．光干涉法

光干涉法的理论基础是光的干涉效应。当平行单色光照射到薄膜表面上时，从薄膜的上、下表面反射回来的两束光在上表面相遇后，就发生干涉现象。而且，当一束光入射于薄膜上时，从膜的反射光和透射光的特性将随薄膜厚度而变化。通过测定反映反射光或透射光特性的某个参量，即可测定薄膜的厚度。显然，用这种方法所测量的是薄膜的光学厚度，以入射光的波长 λ 作为计量单位，精确度达±10%。如果设膜的折射率 n 与块材相同，则从光学厚度（nt）可求得薄膜的几何厚度 t。

如果两束相干光的波程差等于波长的整数倍，则两束光相互加强。如果波程差等于半波长的奇数倍，则两束光相互削弱。因此，当膜层厚度相差 λ/2（光学厚度）时，即膜层的几何厚度相差 λ/2n（n 为薄膜材料的折射率）时，反射率相同，这就是光干涉法测膜厚的基础。

如果淀积一层折射率小于比较片折射率的材料，并采用单色光源，则淀积开始后，反射率将随膜厚的增加而减小；当薄膜的光学厚度达到 λ/4 时反射率达到最小值。如果继续淀积，则反射率随膜厚的增加而上升，并在薄膜

的光学厚度达 λ/2 时达到与监控反射率相等的最大值。如此继续下去，下一个最小值的 3λ/4 处，最大值在 λ 处，……。反射率的变化规律如图 2.2.4-30 中的曲线 1、2 所示。

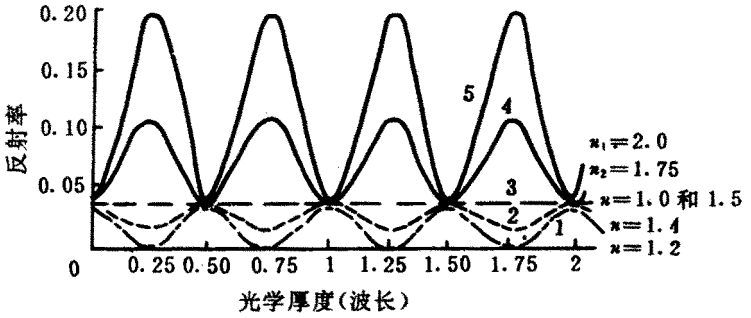


图 2.2.4-30 薄膜的反射率与光学厚度的关系

如果薄膜的折射率高于监控比较片，则两界面反射波的相互加强将产生在薄膜的光学厚度为 λ/4 处，反射率的最小值将发生在 λ/2 处，与监控片的反射率相同。以此类推，下一个最大值将在 3λ/4 处，最小值在 λ 处，……。反射率的变化规律如图 2-35 中曲线 4、5 所示。

在薄膜淀积过程中如果记录淀积膜反射率经过极值点的次数，则可监控膜层的厚度。并且还应在反射率达到某一极值时，中断淀积过程。如果淀积中经过极值点的次数为 *m* 次，则薄膜的光学厚度恰好等于 *m*λ/4。

例如，设计淀积 2μm 厚的 SiO 薄膜，已知 SiO 的折射率 *n* = 2.0，监控片的折射率 $n' = 1.5$，单色光的波长 λ =1μm，并假设薄膜的吸收为零，则

$$m \cdot \frac{\lambda}{4} = nt \qquad (2.2.4\text{-}81)$$

式中，n 为淀积薄膜的折射率，t 是淀积薄膜厚度，nt 即为淀积薄膜的光学厚度，λ 是入射光波长，m 为系数（m = 0，1，2，……）。

由上式即可解得 m = 16，若只计算最大值，则只需要注意观察第 8 个最大值即可。

监控透射率的原理与监控反射率是一致的。不过当透射率为极大值时，反射率为极小值，当透射率为极小值时，反射率则相反。它们的极值点是同时发生的，所对应的膜厚也相同。因此，记录透射率在淀积过程中经过极值

点的次数，同样可以监控淀积膜的厚度。

需要指出，金属薄膜在可见光范围内吸收性很强，无法观察出极值点。因此，这种方法不适用于测定或监控金属薄膜。

3．等厚干涉条纹法

如果在楔形薄膜上产生单色干涉光，在一定厚度下就能满足最大和最小的干涉条件，因此，能观察到明暗相间的平行条纹。这已成为膜厚测量的标准方法。如果厚度不规则，则干涉条纹也呈现不规则的形状。

图 2.2.4-31 是这种测量方法的示意图。产生干涉的膜层是由一小角度的两块光学平板之间的空气隙所形成，其中一块蒸镀有被测薄膜，并在其表面上形成台阶，两块平板上都蒸镀有相同材料的金属薄膜。由于两者之间间隔很小，于是干涉条纹就非常窄。如图 2.2.4-32 所示，如果 L 是条纹间距，△L 是条纹的位移，则薄膜厚度可由下式给出

$$t = \frac{\Delta L}{L} \cdot \frac{\lambda}{2} \qquad (2.2.4\text{-}82)$$

式中，λ 是单以光的波长。

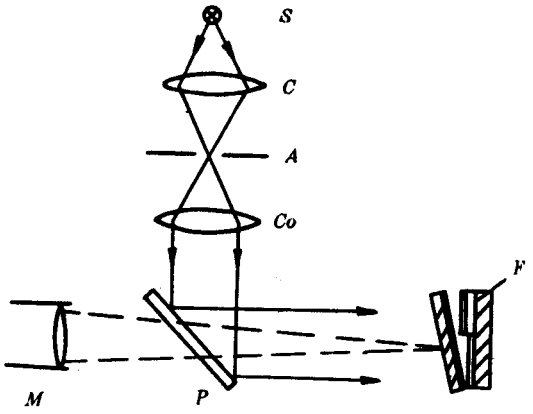


图 2.2.4-36 等厚干涉条纹法原理

S—光源 C—会聚透镜 A—光阑 CO—准直物镜 P—半透明平板 M—显微镜 F—待测薄膜

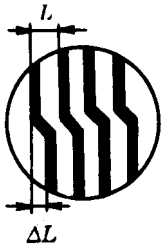


图 2.2.4-37 在薄膜台阶处干涉条纹的位移

五、触针法

这种方法在针尖上镶有曲率半径为几微米的蓝宝石或金刚石的触针，使其在薄膜表面上移动时，由于试样的台阶会引起触针随之作阶梯式上下运动。再采用机械的、光学的或电学的方法，放大触针所运动的距离并转换成相应的读数，该读数所表征的距离即为薄膜厚度。例如，触针钻石探头半径为 0.00254mm，测试时与样品的接触压力约 0.1g。

常用的电学放大法有以下几种：

1．差动变压器法

利用差动变压器法放大触针上下运动距离的原理如图 2.2.4-33（*a*）所示。图中线圈 2 和线圈 3 的输出反相连接。由于铁芯被触针牵动随触针上下移动，此时，线圈 2 和线圈 3 输出差动电信号，放大此信号并显示相应于触针运动距离的数值。

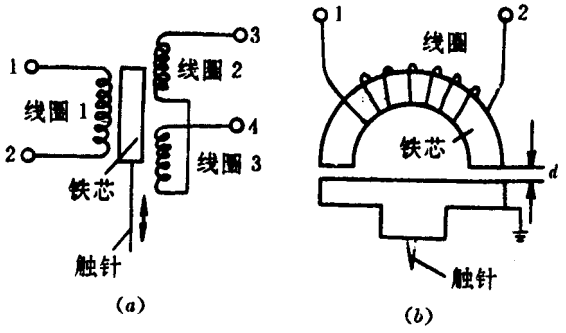


图 2.2.4-33 触针测厚计的传感器

（a）差动变压器法　（b）阻抗法

2．阻抗放大法

阻抗放大法的原理如图 2.2.4-33（*b*）所示。由于触针上下运动使电感器的间隙 *d* 发生相应的变化时，感抗随之变化，导至线圈阻抗改变。再利用放大电路放大并显示该阻抗的变化量，即可表征触针上下运动的距嶂。

3．压电元件法

压电元件法是利用压电材料的压电效应来放大并显示触针上下运动的距离。由于触针上下运动，作用在压电晶体元件的压力将随之改变，从而导致元件的电参数亦随之改变。放大并显示该电参数的变化量，即可表征触针上下运动的数值。

触针式膜厚测量法广泛用于硬质膜厚的测量，其精度比多光束干涉法精确。但应注意以下几个方面，因为它直接影响触针法的应用与精度：

（1）由于触针尖端的面积非常小，会穿透铝膜等易受损伤的软质膜，并在其上划出道沟，从而产生极大的误差；

（2）基片表面的起伏或不平整所造成的“噪声”亦会引起误差；

（3）被测薄膜与基片之间，必须要有膜一基台阶存在，才能进行测量。

实训 2.2 电子束蒸发制备高反射薄膜

三、实训目的

利用电子束蒸发制备技术制备高性能高反射薄膜。掌握真空系统工作的原理。掌握镀膜机操作流程及注意事项。

四、实训设备

VPT 镀膜机一台

五、实训内容

操作如下：

（1）镀膜材料选择

高折射率材料为 Hf,低折射率材料为 SiO_2.

（2）抽真空步骤见实训 2.1

（3）加温和热平衡过程控制

所有镀膜过程在 VPT 镀膜机上完成，每一罩镀膜过程的加热和热平衡的程序必须一样，即镀件要加到 xx 的温度，光学零件加温、降温要慢。

（4）膜系选择依据

每一次镀膜时工件的旋转速度为 30%，。

先镀一罩 xx,的单层膜试验片，镀膜时充氧量为 xx，镀金属铪时调用离子源的 6 号程序，镀膜时电子枪的高压为 8.5 千伏，采用定点镀膜的方式，膜层要比较厚，如在晶振膜厚仪中设计镀 6 微米，镀后用椭偏仪测量其折射率和物理厚度，根据这个结果可以确定高折射率材料被镀件和晶振膜厚仪中晶振片上厚度的比例关系。

再镀一罩 SiO_2 的单层膜试验片，镀膜时充氧量为 2.5×10^{-4}torr，镀金属铪时调用离子源的 3#程序，镀膜时电子枪的高压为 8.5 千伏，采用 VPT 镀膜机 TELEMARK 枪的 wzhfo2dd 镀膜的扫描方式，膜层要比较厚，如在晶振膜厚仪中设计镀 6 微米，镀后用椭偏仪测量其折射率和物理厚度，根据这个结果可以确定低折射率材料被镀件和晶振膜厚仪中晶振片上厚度的比例关系。

利用厚度和折射率的数据，利用膜系设计中的高反膜设计方法可以确定主膜系，在现 VPT 镀膜机上.

（5） 过程控制

特殊过程工艺验证：采用与正式件一样的镀膜夹具，准备放在夹具的中间和边上以及陪镀片孔上三个基片玻璃的材料要和正式片的材料一样，禁止使用代替材料，其中一片要测量反射波前。手工清洗过程中清洗布禁止在没有清洗前循环用，要在照明灯关闭的条件下清洗，清洗结束后要有第二个人检查。

a) 镀膜材料预熔：

第一步：用专用小勺子，每次取适量氧化铪颗粒加入坩埚内，所加入的氧化铪的量不能太多，并检查坩埚的旋转，禁止材料和坩埚的旋转装置发生

碰撞的现象，否则坩埚内材料过高会将坩埚遮板顶撞倾斜，导致冷却水泄露出坩埚。

第二步：关闭真空室门，抽真空至 5×10^{-5}Torr 以下时，打开设备间的氧气瓶开关，通过旋转气流控制器面板上的通道旋钮，旋转“通道 3”，控制旋钮拨到“AUTO”位置，打开气流控制器开关，氧分压调至设定值（视镀膜工艺而定）。

第三步：选择坩埚旋转控制方式为“MANUAL”，调节坩埚转速（视镀膜工艺而定），选择要预熔的材料所在的坩埚。

第四步：选择电子束流控制方式为“LOC”；打开高压电源开关，待 5 分钟后，按下“RESET”键完成系统联锁控制，然后打开高压开关，调节偏压在 8.50~8.55 之间，打开电子束流开关“BEAM ON”，详细操作方式见《VPT 镀膜机设备操作规程》。

第五步：将电子束扫描调节手柄开关拨到“SWEEP”。手动调节控制面板电子束流，初始设定值为 0.15~0.20 之间，通过手柄调节光斑至坩埚中心，然后在坩埚内移动光斑，使氧化铪材料内的气体释放。

第六步：由小到大，慢慢调节电子束流在 0.20~0.40 之间，开始预熔氧化铪材料，预熔过程中一定要注意防止材料喷溅。

第七步：由小到大，慢慢调节电子束流在 0.40~0.55 之间，将材料充分熔化，防止材料内部有空心，否则会导致镀膜过程中蒸发速率极不稳定，镀制的膜层也不均匀。熔化时间不要超过 5 分钟，否则熔化时间过长会蒸发掉更多材料，造成浪费。

第八步：将电子束流调至 0.30~0.40 之间，将整个坩埚内已熔过的氧化铪再扫描一遍，使氧化铪块体更加平整均匀。

第九步：依次关闭电子束流、高压开关、电子枪电源、气流控制器、氧气瓶阀门，待十分钟后预熔过的氧化铪材料冷却方可充气打开真空室。

第十步：用防静电手柄触碰电子枪正负电极充分放电，然后清洁真空室，并再次往坩埚中添加氧化铪颗粒，重复上述 1 至 9 步。直至坩埚内熔过的氧

化铪块体足够进行镀膜。

任务 2.3 溅射镀膜工艺

2.3.1 溅射镀膜机理介绍

所谓“溅射”是指荷能粒子轰击固体表面（靶），使固体原子（或分子）从表面射出的现象。射出的粒子大多呈原子状态，常称为溅射原子。用于轰击靶的荷能粒子可以是电子、离子或中性粒子，因为离子在电场下易于加速并获得所需动能，因此大多采用离子作为轰击粒子。该粒子又称入射离子。由于直接实现溅射的机构是离子，所以这种镀膜技术又称为离子溅射镀膜或淀积。与此相反，利用油射也可以进行刻蚀。淀积和刻蚀是溅射过程的两种应用。溅射这一物理现象是 130 多年前格洛夫（Grove）发现的，现已广泛地应用于各种薄膜的制备之中。如用于制备金属、合金、半导体、氧化物、绝缘介质薄膜，以及化合物半导体薄膜、碳化物及氮化物薄膜，乃至高 T_0 超导薄膜等。

溅射镀膜与真空蒸发镀膜相比，有如下的特点：

（1）任何物质均可以溅射，尤其是高熔点、低蒸气压元素和化合物。不论是金属、半导体、绝缘体、化合物和混合物等，只要是固体，不论是块状、粒状的物质翥阿以作为靶材。

由于溅射氧化物等绝缘材料和合金时，几乎不发生分解和分馏，所以可用于制备与靶材料组分相近的薄膜和组分均匀的合金膜，乃至成分复杂的超导薄膜。

此外，采用反应溅射法还可制得与靶材完全不同的化合物薄膜，如氧化物、氮化物、碳化物和硅化物等。

（2）溅射膜与基板之间的附着性好。由于溅射原子的能量比蒸发原子能量高 1~2 个数量级，因此，高能粒子淀积在基板上进行能量转换，产生较高的热能，增强了溅射原子与基板的附着力。加之，一部分高能量的溅射原

子将产生不同程度的注入现象，在基板上形成一层溅射原子与基板材料原子相互“混溶”的所谓伪扩散层。此外，在溅射粒子的轰击过程中，基板始终处于等离子区中被清洗和激活，清除了附着不牢的淀积原子，净化且活化基板表面。因此，使得溅射膜层与基板的附着力大大增强。

（3）溅射镀膜密度高，针孔少，且膜层的纯度较高，因为在油射镀膜过程中，不存在真空蒸镀时无法避免的坩埚污染现象。

（4）膜厚可控性和重复性好。由于溅射镀膜时的放电电流和靶电流可分别控制，通过控制靶电流则可控制膜厚。所以，油射镀膜的膜厚可控性和多次溅射的膜厚再现性好，能够有效地镀制预定厚度的薄膜。此外，溅射镀膜还可以在较大面积上获得厚度均匀的薄膜。

溅射镀膜（主要是二极溅射）的缺点是：溅射设备复杂、需要高压装置；溅射淀积的成膜速度低，真空蒸镀淀积速率为 0.1~5μm/min，而溅射速率则为 0.01~0.5μm/min；基板温升较高和易受杂质气体影响等。但是，由于射频溅射和磁控溅射技术的发展，在实现快速溅射淀积和降低基板温度方面已获得了很大的进步。

2.3.2 溅射镀膜工艺分类

溅射镀膜基于荷能离子轰击靶材时的溅射效应，而整个溅射过程都是建立在辉光放电的基础之上，即溅射离子都来源于气体放电。不同的溅射技术所采用的辉光放电方式有所不同。直流二极溅射利用的是直流辉光放电；三极溅射是利用热阴极支持的辉光放电；射频溅射是利用射频辉光放电；磁控溅射是利用环状磁场控制下的辉光放电。

一、辉光放电

1．直流辉光放电

溅射是辉光放电中产生的，因此，辉光放电是溅射的基础。辉光放电是在真空度约为 10~1Pa 的稀薄气体中，两个电极之间加上电压时产生的一种气体放电现象。

气体放电时，两电极间的电压和电流的关系不能用简单的欧姆定律来描述，因为二者之间不是简单的直线关系。图 2.3.1-1 表示直流辉光放电的形成过程，亦即两电极之间的电压随电流的变化曲线。

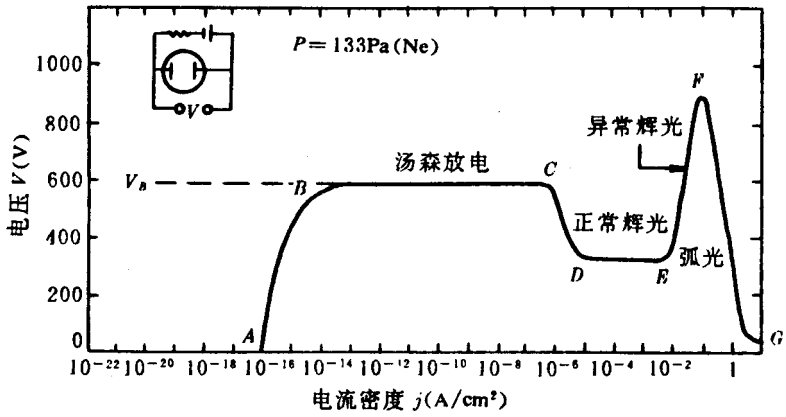


图 2.3.2-1 直流辉光放电伏安特性曲线

当两电极加上直流电压时，由于宇宙线产生的游离离子和电子是很有限的，所以开始时电流非常小，此 *AB* 区域叫做“无光”放电。随着电压升高，带电离子和电子获得了足够能量，与中性气体分子碰撞产生电离，使电流平稳地增加，但是电压却受到电源的高输出阻抗限制而呈一常数；*BC* 区域称为“汤森放电区”。在此区内，电流可在电压不变情况下增大。

然后发生“雪崩点火”。离子轰击阴极，释放出二次电子，二次电子与中性气体分子碰撞，产生更多的离子，这些离子再轰击阴极，又产生出新的更多的二次电子。一旦产生了足够多的离子和电子后，放电达到自持，气体开始起辉，两极间电流剧增，电压迅速下降，放电呈现负阻特性。这个 CD 区域叫做过渡区。

在 *D* 点以后，电流与电压无关，即增大电源功率时，电压维持不变，而电流平稳增加，此时两极板间出现辉光。从这一区域内若增加电源电压或改变电阻来增大电流，两极板间的电压几乎维持不变。从 *D* 到 *E* 之间区域叫做“正常辉光放电区”。在正常辉光放电时，放电自动调整阴极轰击面积。最初，轰击是不均匀的，轰击集中在靠近阴极边缘处，或在表面其他不规则处。

随着电源功率的增大，轰击区逐渐扩大，直到阴极面上电流密度几乎均匀为止。

E 点以后，当离子轰击覆盖整个阴极表面后，继续增加电源功率，会使放电区内的电压和电流密度，即两极间的电流随着电压的增大而增大，*EF* 这一区域称“异常辉光放电区”。

在 *F* 点以后，整个特性都改变了，两极间电压降至很小的数值，电流大小几乎是由外电阻的大小来决定，而且电流越大，极间电压越小，*FG* 区域称为“弧光放电区”。

下面对各个放电区的性质作进一步说明。

（1）无光放电

由于在放电容器中充有少量气体，因而始终有一部分气体分子以游离状态存在着。当两电极上加直流电压时，这些少量的正离子和电子将在电场下运动，形成电流。由于气体分子在这种情况下的自然游离数是恒定的，所以，当正离子和电子一俟产生，便被电极拉过去。即使再升高电压，到达电极的电子与离子数目不变。所以此时的电流密度很小，一般情况下仅有 10^{-16}~10^{-14} 安培左右。由于此区是导电而不发光，所以称为无光放电区。

（2）汤森放电区

在两极电压逐渐升高，电子的运动速度逐渐加快，电子与中性气体分子之间的碰撞不再是低速时的弹性碰撞，而是使气体分子电离。电离为正离子与电子，新产生的电子和原有电子继续被电场加速，使更多的气体分子被电离，于是在伏安曲线上便出现汤森放电区。

上述两种情况的放电，都以有自然电离源为前提，如果没有游离的电子和正离子存在，则放电不会发生。因此，这种放电方式又称为非自持放电。

（3）辉光放电

当放电容器两端电压进一步增加时，汤森放电的电流将随着增大。当电流增至 *C* 点时，极板两端电压突然降低，而这时电流突然增大， 并同时出现带有颜色的辉光，此过程称为气体的击穿，图中电压 V_B 称为击穿电压。击

穿后气体的发光放电称为辉光放电。这时电子和正离子是来源于电子的碰撞和正离子的轰击，即使自然游离源不存在，导电也将继续下去。而且维持辉光放电的电压较低，且不变，此时电流的增大显然与电压无关，而只与阴极板上产生辉光的表面积有关。正常辉光放电的电流密度与阴极材料和气体的种类有关。此外，气体的压强与阴极的形状对电流密度的大小也有影响。电流密度随气体压强增加而增大。凹面形阴极的正常辉光放电电流密度，要比平板形阴极大数十倍左右。

由于正常辉光放电时的电流密度仍比较小，所以在溅射等方面均是选择在非正常辉光放电区工作。

（4）非正常辉光放电区

在轰击覆盖住整个阴极表面之后，进一步增加功率，放电的电压和电流密度将同时增大，进入非正常辉光放电状态。其特点是：电流增大时，两放电极板间电压升高，且阴极电压降的大小与电流密度和气体压强有关。因为此时辉光已布满整个阴极，再增加电流时，离子层已无法向四周扩散，这样，正离子层便向阴极靠拢，使正离子层与阴极间距离缩短，此时若要想提高电流密度，则必须增大阴极压降使正离子有更大的能量去轰击阴极，使阴极产生更多的二次电子才行。

在气体成分和电极材料一定条件下，由巴邢定律可知，起辉电压 V 只与气体压强 P 和电极距离 d 的乘积有关（见图 2.3.1-2 所示）。从图可以看出，电压有一最小值。若气体压强太低或极间距离太小，二次电子在到达阳极前不能使足够的气体分子被碰撞电离，形成一定数量的离子和二次电子，会使辉光放电熄灭。气压太高或极间距离太大，二次电子因多次碰撞而得不到加速，也不能产生辉光。在大多数辉放电溅射过程中要求气体压强低，压强与间距乘积一般都在最小值的右边，故需要相当高的起辉电压。在极间距小的电极结构中，经常需要瞬时地增加气体压强以启动放电。

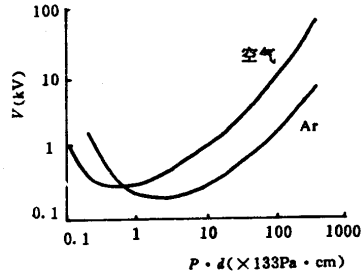


图 2.3.2-2 巴邢曲线

（起辉电压 *V*与气体压强 *P*和电极间距 *d*之积的实验曲线）

（5）弧光放电区

异常辉光放电时，在某些因素影响下，常有转变为弧光放电的危险。此时，极间电压陡降，电流突然增大，相当于极间短路。且放电集中在阴极的局部地区，致使电流密度过大而将阴极烧毁。同时，骤然增大的电流有损坏电源的危险。弧光放电在气相沉积中的应用，仍在进一步研究之中。

2．正常与异常辉光放电

两电极之间维持辉光放电时，放电电压与电流之间的函数关系如图 2.3.2-1 所示。在一定的电流密度范围内（可为 2~3 个数量级），放电电压维持不变。如前所述，这一区域称为正常辉光区。在此区域内，阴极的有效放电面积随电流增加而增大，从而使阴极有效区内电流密度保持恒定不变。当整个阴极均成为有效放电区域之后（即整个阴极全部由辉光所覆盖），只有增加阴极的电流密度，才能增大电流，形成均匀而稳定的“异常辉光放电”，从而均匀地覆盖基片，这个放电区就是溅射区域。溅射电压 *V*，电流密度 *j* 和气体压强 *P* 遵守以下关系

$$V = E + \frac{F\sqrt{j}}{P} \qquad (2.3.2\text{-}1)$$

式中，E 和 F 是取决于电极材料、尺寸和气体种类的常数。在达到异常辉光放电区后，继续增大电压，一方面有更多的正离子轰击阴极产生在量电子发射，另方面因阴极暗区随电压增加而收缩，如方程式（3-2）所示

$$P \cdot d = A + \frac{BF}{V - E} \qquad (2.3.2\text{-}2)$$

式中，d 为暗区宽度，A、B 亦为与电极材料、尺寸和气体种类有关的常数。当电流密度达到约 0.1A/cm2 时，电丈夫开始急剧降低，便出现前述的低压弧光放电，这一溅射时应力求避免。另外，暗区从阴极向外扩展的距离是异常辉光区中电压的函数，这一事实常为人人们所忽视。在设计溅射装置时，必须加以考虑。

在异常辉光区内，大量离子产生于负辉光中。在这种情况下，任何妨碍负辉光的物体都将影响离子轰击被遮蔽的阴极部分。在等离子体中，由于离子与电子的质量相差悬殊，因而其复合速率很低。但在放电室的壁上（或任何可遇到的表面上），由于其动能可作为热量释出，因此很容易发生复合。如室壁或其他物体正好位于阴极附近，则离子密度和溅射速率的均匀性将发生严重差别。由于离子轰击是清除表面杂质的一种有效方法，因而可产生另一效应。任何此类杂质一经释出后，就成为放电的成分，可能混入所淀积的薄膜中，所以，无关零件应远离阴极及淀积区。

图 2.3.2-3 给出了低压直流辉光放电时的暗区和亮区以及对应的电位、场强、空间电荷和光强分布。对这些放电区间的形成原因解释如下：由于从冷阴极发射的电子能量只有 1eV 左右，很少发生电离碰撞，所以在阴极附近形成阿斯顿暗区。紧靠阿斯顿暗区的是比较明亮的阴极辉光区，它是在加速电子碰撞气体分子后，激发态的气体分子衰变和进入该区的离子复合而形成中性原子所造成的。随着电子继续加速，获得足够动能，穿过阴极辉光区后，与正离子不易复合，所以又出现一个暗区，叫做克鲁克斯暗区。克鲁克斯暗区的宽度与电子的平均自由程（即压强）有关。随着电子速度的增大，很快获得了足以引起电离的能量，于是离开阴极暗区后便大量产生电离，在此空间由于电离而产生大量的正离子。由于正离子的质量较大，故向阴极的运动速度较慢。所以，由正离子组成了空间电荷并在该处聚积起来，使该区域的电位升高，而与阴极形成很大电位差，此电位差常称为阴极辉光放电的阴极压降。正是由于在此区域的正离子浓度很大，所以电子经过碰撞以后速度降低，使电子与正离子的复合几率增多，从而造成有明亮辉光的负辉光区。经

过负辉光区后，多数动能较大的电子都已丧失了能量，只有少数电子穿过负辉光区。在负辉光区与阳极之间是法拉第暗区和阳极光柱，这些区域几乎没有电压降，唯一的作用是连接负辉光区和阳极。这是因为在法拉第暗区后，少数电子逐渐加速并在空间与气体分子碰撞而产生电离。由于电子数较少，产生的正离子不会形成密集的空间电荷，所以在这一较大空间内，形成电子与正离子密度相等的区域。空间电荷作用不存在，使得此区间的电压降很小，很类似一个良导体。

在溅射过程中，基板（阳极）常处于负辉光区。但是，阴极和基板之间的距离至少应是克鲁克暗区宽度的 3~4 倍。当两极间的电压不变而只改变其距离时，阴极到负辉光区的距离几乎不变。

必须指出，图 2.3.2-3 所列的放电区结构是属于长间隙的情况，而溅射时的情况属于短间隙辉光放电，这时并不存在法拉第暗区和正离子柱。

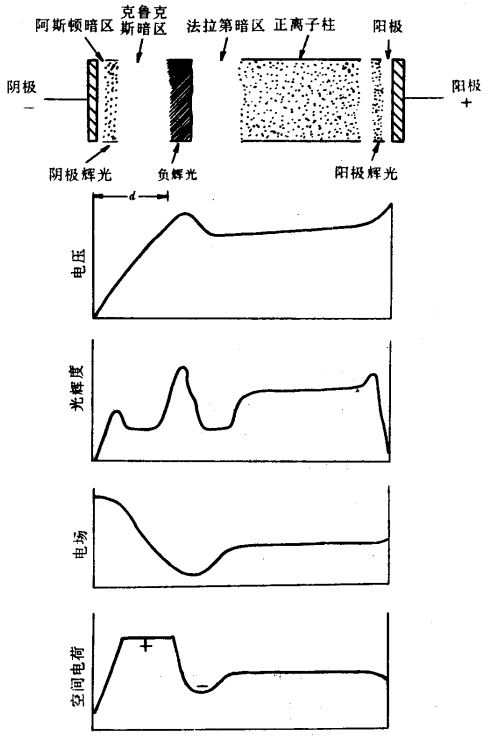


图 2.3.2-3 直流辉光放电现象及其电特性和光强分布

3．辉光放电阴极附近的分子状态

如前所述，由于在冷阴极发射时，从阴极发射的电子的初始能量只有 1eV 左右，所以与气体分子不发生相互作用。故在非常靠近阴极的地方是黑暗的，这就是阿斯顿暗区。在使用氩、氖之类工作气体时这个暗区很明显。可是对于其他气体，这个暗区就很窄，难以观察到。如果使电子加速就会使气体分子激发，激发的气体分子发出固有频率的光波，称为阴极辉光。若进一步加速电子，会使气体分子发生电离，从而产生大量的离子和低速电子，因此，这个区域几乎不发光，称为克鲁 克斯暗区。在这个区域又便所形成的低速电子加速，从而激发气体分子，使气体分子发光，这就是负辉光。气体分子从阴极到负辉光区的放电状态如图 2.3.2-4 所示。

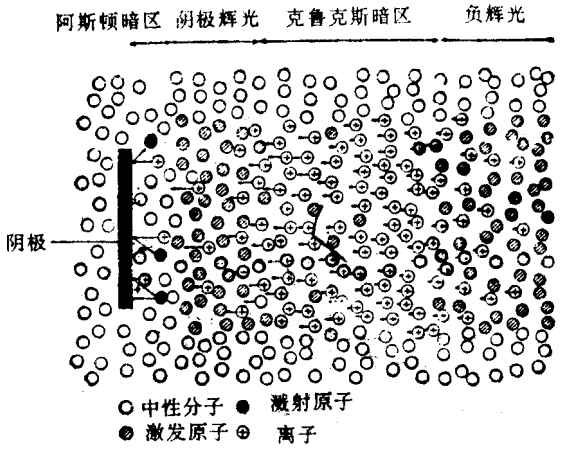


图 2.3.2-4 辉光放电过程中阴极附近分子状态示意图

与溅射现象有关的重要问题主要有两个：一个是在克鲁克斯暗区周围所形成的正离子冲击阴极；另一个是，当两极板间的电压不变而改变两极间的距离时，主要发生变化的是由等离子体构成的阳极光柱部分的长度，而从阴极到负辉光区的距离是几乎不改变的。这是由于两电极间电压的下降几乎都发生在阴极到负辉光区之间的缘故。因而使由辉光放电产生的正离子撞击阴极，把阴极原子溅射出来，这就是一般的溅射法。阴极与阳极之间的距离，至少必须比阴极与负辉光区之间的距离要长。

4．低频交流辉光放电

一般很少采用低频交流辉光放电进行溅射。在频率低于 50kHz 的交流电压条件下，离子有足够的活动性，且有充分的时间在每个半周的时间内，在各个电极上建立直流辉光放电。这种放电称为低频交流辉光放电。这一放电基本上与直流辉光放电相同，只是两个电极交替地成为阴极和阳极。

5．射频辉光放电

在一定气压下，当阴阳极间所加交流电压的频率增高到射频频率时，即可产生稳定的射频辉光放电。射频辉光放电有两个重要的特征：第一，在辉光放电空间产生的电子，获得了足够的能量，足以产生碰撞电离。因而，减少了放电对二次电子的依赖，并且降低了击穿电压。第二，射频电压能够通过任何一种类型的阻抗耦合进去，所以电极并不需要是导体，因而，可以溅射包括介质材料在内的任何材料。因此，射频辉光放电在溅射技术中的应用十分广泛。

一般，在 5~30MHz 的射频溅射频率下，将产生射频放电。这时外加电压的变化周期小于电离和消电离所需时间（一般在 10^{-6} 秒左右），等离子体浓度来不及变化。由于电子质量小，很容易跟随外电场从射频场中吸收能量并在场内作振荡运动。但是，电子在放电空间的运动路程不是简单的由一个电极到另一个电极的距离，而是在放电空间不断来回运动，经过很长的路程。因此，增加了与气体分子的碰撞几率，并使电离能力显著提高，从而使击穿电压和维持放电的工作电压均降低（其工作电压只有直流辉光放电的 1/10）。所以射频放电的自持要比直流放电容易得多。通常，射频辉光放电可以在较低的气压下进行。例如，直流辉光放电常在 10^{0}~10^{-1}Pa 运行，射频辉光放电可以在 10^{-1}~10^{-2}Pa 运动。另外，由于正离子质量大，运动速度低，跟不上电源极性的改变，所以可以近似认为正离子在空间不动，并形成更强的正空间电荷，对放电起增强作用。

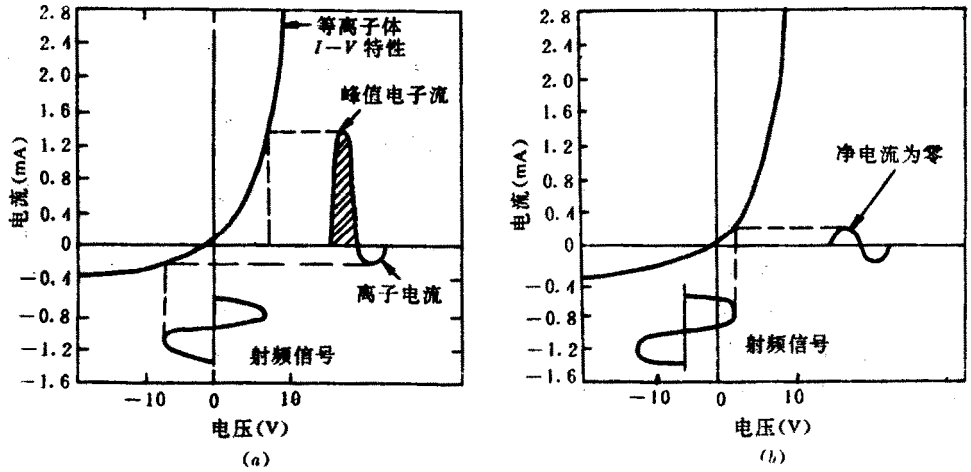


图 2.3.2-5 在射频辉光放电情况下容性耦合表面上
脉动负极性电荷覆盖层的形成

虽然大多数正离子的活动性甚小，可以忽略它们对电极的轰击。但是，若有一个或两个电极通过电容耦合到射频振荡器上，将在该电板上建立一个脉动的负电压。由于电子和离子迁移率的差别，辉光放电的 *I-V* 特性类似于一个有漏电的二极管整流器（见图 2.3.2-5）。也就是说，在通过电容器引入射频电压时，将有一个大的初始电流存在，而在第二个半周内仅有一个相对较小的离子电流流过。所以，通过电容器传输电荷时，电极表面的电位必然自动偏置为负极性，直到有效电流（各周的平均电流）为零。平均直流电位 V_s 的数值近似地与所加峰值电压相等。

如果在射频溅射装置中，将溅射靶与基片完全对称配置，正离子以均等的几率轰击溅射靶和基片，溅射成膜是不可能的。实际上，只要求靶上得到溅射，那么这个溅射靶电极必须绝缘起来，并通过电容耦合到射频电源上去。另一电极（真空室壁）为直接耦合电极（即接地电极），而且靶面积必须比直接耦合电极小。设辉光放电空间与靶之间的电压为 V_c，辉光放电空间与直接耦合电极之间的电压为 V_d（见图 2.3.2-6），则两个电压之间存在如下近似理论关系

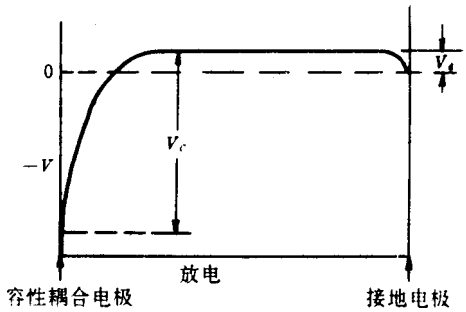


图 2.3.2-6 射频辉光放电中从小的电容耦合电极靶到大的直接耦合电极的电压分布

$$V_c / V_d = (A_d / A_c)^A \qquad (2.3.2\text{-}3)$$

式中，A_c 和 A_d 分别为容性耦合电极（即溅射靶）和直接耦合电极（即接地电极）的面积。实际上，由于直接耦合电极是整个系统的地，包括底板、真空室壁等在内，A_d 尺寸比 A_c 大得多。所以，$V_c>>V_d$，即 V_c 与 V_d 二者之间在实际上并不具有 4 次方关系。因此，平均壳层电压在靶电位和地之间变化，如图 2.3.2-6 所示。所以射频辉光放电时等离子体中离子对接地零件只有极微小的轰击，而对溅射靶却进行强烈轰击并使之产生溅射。

射频放电虽然可在 5~30MHz 频率范围内进行，实际上，通常工业用频率为 13.56MHz，主要是为了避免对通信的干扰，此时气体压强可降到 0.13Pa 或更低。

二、溅射特性

表征溅射特性的参量主要有溅射率、溅射阈值，以及溅射粒子的速度和能量等。

1．溅射阈值

所谓溅射阈值是指使靶材原子发生溅射的入射离子所必须具有的最小能量。溅射阈值的测定十分困难，随着测量技术的进步，目前已能测出低于 10^{-5} 原子/离子的溅射率。图 2.3.2-7 是用不同能量的 Ar^+ 离子轰击各种金属元素靶材时得到的溅射率曲线。图 2.3.2-8 是不同种类的入射离子以不同能量轰击同一钨靶的溅射曲线。入射离子不同时溅射阈值变化很小，而对于不同靶

材溅射阈值的变化比较明显。也就是说，溅射阈值与离子质量之间无明显的依赖关系，而主要取决于靶材料。对处于周期表中同一周期的元素，溅射阈值随着原子序数增加而减小。对绝大多数金属来说，溅射阈值为 10~30eV，相当于升华热的 4 倍左右。表 2.3.2-1 列出了几种金属的溅射阈值。

表 2.3.2-1 一些金属元素的阈值能量（eV）

原子序数	元素	Ne	Ar	Kr	Xe	原子序数	元素	Ne	Ar	Kr	Xe
4	Be	12	15	15	15	41	Nb	27	25	26	22
11	Na	5	10	—	30	42	Mo	24	24	28	27
13	Al	13	13	15	18	45	Rh	25	24	25	25
22	Ti	22	20	17	18	46	Pd	20	20	20	15
23	V	21	23	25	28	47	Ag	12	15	15	17
24	Cr	22	15	18	20	51	Sb	—	3	—	—
26	Fe	22	20	25	23	73	Ta	25	26	30	30
27	Co	20	22	22	—	74	W	35	25	30	30
28	Ni	23	21	25	20	75	Re	35	35	25	30
29	Cu	17	17	16	15	78	Pt	27	25	22	22
30	Zn	—	3	—	—	79	Au	20	20	20	18
32	Ge	23	25	22	18	90	Th	20	24	25	25
40	Zr	23	22	18	26	92	U	20	23	25	22

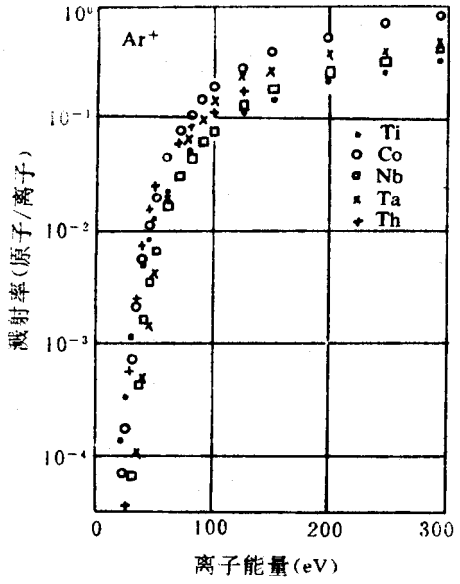


图 2.3.2-7 用 Ar^+溅射不同靶材的溅射率曲线

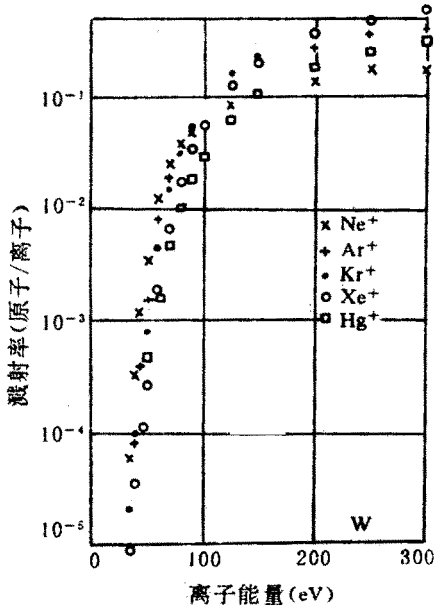


图 2.3.2-8 不同的气体离子轰击钨靶的溅射率曲线

2．溅射率

溅射率是描述溅射特性的一个最重要物理参量，它表示正离子轰击靶阴极时，平均每个正离子能从阴极上打出的原子数。又称溅射产额或溅射系数，常用 *S* 表示。

溅射率与入射离子的种类、能量、角度及靶材的类型、晶格结构、表面状态、升华热大小等因素有关，单晶靶材还与表面取向有关。

（1）靶材料　溅射率与靶材料种类的关系可用靶材料元素在周期表中的位置来说明。在相同条件下，用同一种离子对不同元素的靶材料轰击，得到不相同的溅射率，并且还发现溅射率呈周期性变化，其一般规律是随靶材元素原子序数增加而增大。由图 3-9 可以看出：铜、银、金的溅射率较大；碳、硅、钛、钒、锆、铌、钽、钨等元素的溅射率较小；在用 400eV 的 Xe^+ 离子轰击时，银的溅射率为最大，碳为最小。此外，具有六方晶格结构（如镁、锌、钛等）和表面污染（如氧化层）的金属要比面心立方（如镍、铂、铜、银、金、铝等）和清洁表面的金属的溅射率低；升华热大的金属要比升

华热小的溅射率低。升华热大的金属要比升华热小的溅射率低。从原子结构分析上述规律显然与原子的 3*d*、4*d*、5*d* 电子壳层的填充程度有关。各种元素的溅射率如表 2.3.2-2 所示。

表 2.3.2-2 各种元素的溅射率

靶材元素	Ne^+				Ar^+			
	100（eV）	200（eV）	300（eV）	600（eV）	100（eV）	200（eV）	300（eV）	600（eV）
Be	0.012	0.10	0.26	0.56	0.074	0.18	0.29	0.80
Al	0.031	0.24	0.43	0.83	0.11	0.35	0.65	1.24
Si	0.034	0.13	0.25	0.54	0.07	0.18	0.31	0.53
Ti	0.08	0.22	0.30	0.45	0.081	0.22	0.33	0.58
V	0.06	0.17	0.36	0.55	0.11	0.31	0.41	0.70
Cr	0.18	0.49	0.73	1.05	0.30	0.67	0.87	1.30
Fe	0.18	0.38	0.62	0.97	0.20	0.53	0.76	1.26
Co	0.084	0.41	0.64	0.99	0.15	0.57	0.81	1.36
Ni	0.22	0.46	0.65	1.34	0.28	0.66	0.95	1.52
Cu	0.26	0.84	1.20	2.00	0.48	1.10	1.59	2.30
Ge	0.12	0.32	0.48	0.82	0.22	0.50	0.74	1.22
Zr	0.054	0.17	0.27	0.42	0.12	0.28	0.41	0.75
Nb	0.051	0.16	0.23	0.42	0.068	0.25	0.40	0.65
Mo	0.10	0.24	0.34	0.54	0.13	0.40	0.58	0.93
Ru	0.078	0.26	0.38	0.67	0.14	0.41	0.68	1.30
Rh	0.081	0.36	0.52	0.77	0.19	0.55	0.86	1.46

Pd	0.14	0.59	0.82	1.32	0.42	1.00	1.41	2.39
Ag	0.27	1.00	1.30	1.98	0.63	1.58	2.20	3.40
Hf	0.057	0.15	0.22	0.39	0.16	0.35	0.48	0.83
Ta	0.056	0.13	0.18	0.30	0.10	0.28	0.41	0.62
W	0.038	0.13	0.24	0.32	0.068	0.29	0.40	0.62
Re	0.04	0.15	0.24	0.42	0.10	0.37	0.56	0.91
Os	0.032	0.16	0.30	0.41	0.057	0.36	0.56	0.95
Ir	0.069	0.21	0.44	0.46	0.12	0.43	0.70	1.17
Pt	0.12	0.31	0.84	0.70	0.20	0.63	0.95	1.56
Au	0.20	0.56	0.17	1.18	0.32	1.07	1.65	2.3(500)
Th	0.028	0.11	0.36	0.36	0.097	0.27	0.42	0.66
U	0.063	0.20	0.52	0.52	0.14	0.35	0.59	0.97

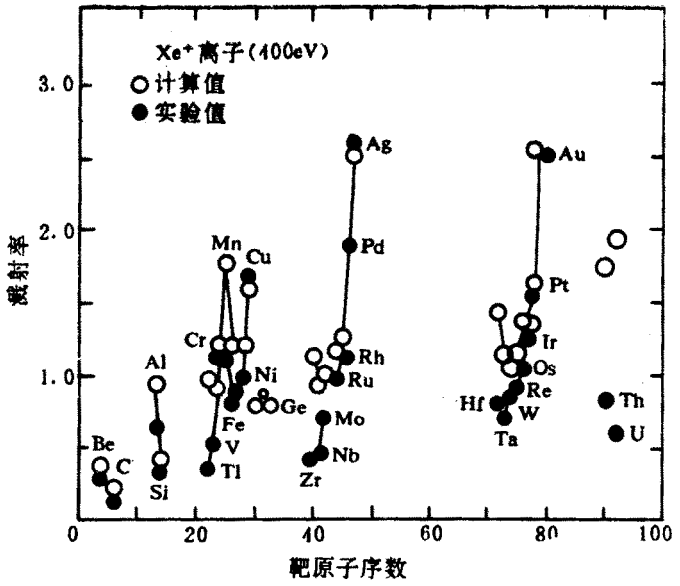


图 2.3.2-9 溅射率与原子序数的关系

（2）入射离子能量　入射离子能量大小对溅射率影响显著。当入射离子能量高于某一个临界值（溅射阈值）时，才发生溅射。图 2.3.2-10 所示为溅射率与入射离子能量之间的典型关系曲线。该曲线可分为三个区域：

$S \propto E^2$　　ET<E<500eV（ET 为溅射阈值）

$S \propto E$　　500eV<E<1000eV

$S \propto E^{1/2}$　　1000eV<E<5000eV

即溅射率最初随轰击离子能量的增加而指数上升，其后出现一个线性增大区，并逐渐达到一个平坦的最大值并呈饱和状态。如果再增加 *E* 则因产生离子注入效应而使 *S* 值开始下降。用 Ar 离子轰击铜时，离子能量与溅射率的典型关系如图 2.3.2-11 所示，图中能量范围扩大到 100keV，这一曲线可分成三部分：第一部分是没有或几乎没有溅射的低能区域；第二部分的能量从 70eV 增至 10keV，这是溅射率随离子能量增大的区域，用于溅射淀积薄膜的能量值大部分在这一范围内；第三部分是 30keV 以上，这时溅射率随离子能量增加而下降。如前所述，这种下降据认为是由于轰击离子此时深入到晶格内部，将大部分能量损失在靶材体内，而不是消耗在靶表面的缘故。轰击离

子愈重，出现这种下降的能量就愈高。

（3）入射离子种类　溅射率依赖于入射离子的原子量，原子量越大，则溅射率越高。溅射率也与入射离子的原子序数有关，呈现出随离子的原子序数周期性变化的关系。这和溅射率与靶材料的原子序之间存在的关系相类似。从图 2.3.2-12 可见，在周期表每一排中，凡电子壳层填满的元素就有最大的溅射率。因此，惰性气体的溅射率最高，而位于元素周期表的每一列中间部位元素的溅射率最小。如 Al、Ti、Zr、Hf 等。所以，在一般情况下，入射离子大多采用惰性气体。考虑到经济性，通常选用氩为工作气体。另外，使用惰性气体还有一个好处是，可避免与靶材料起化学反应。实验表明，在常用的入射离子能量范围内（500~2000eV），各种惰性气体的溅射率大体相同。同时，从图 2.3.2-12 还可看到，用不同的入射离子对同一靶材料溅射时，所呈现的溅射率的差异，大大高于用同一种离子去轰击不同靶材所得到的溅射率的差异。

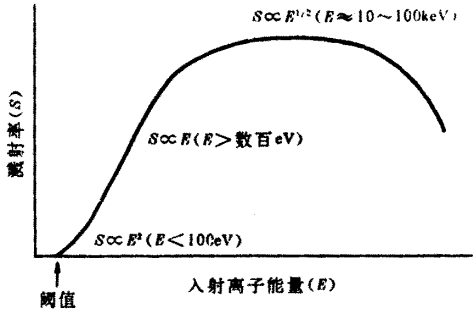


图 2.3.2-10 溅射率与入射离子能量的关系

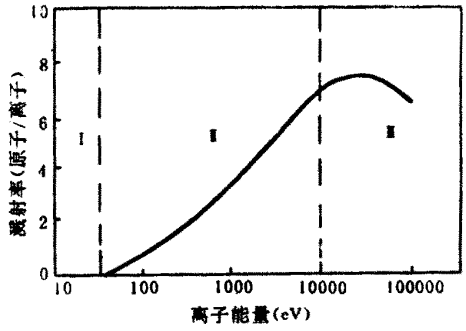


图 2.3.2-11 Ar 离子轰击铜时离子能量与溅射率的关系

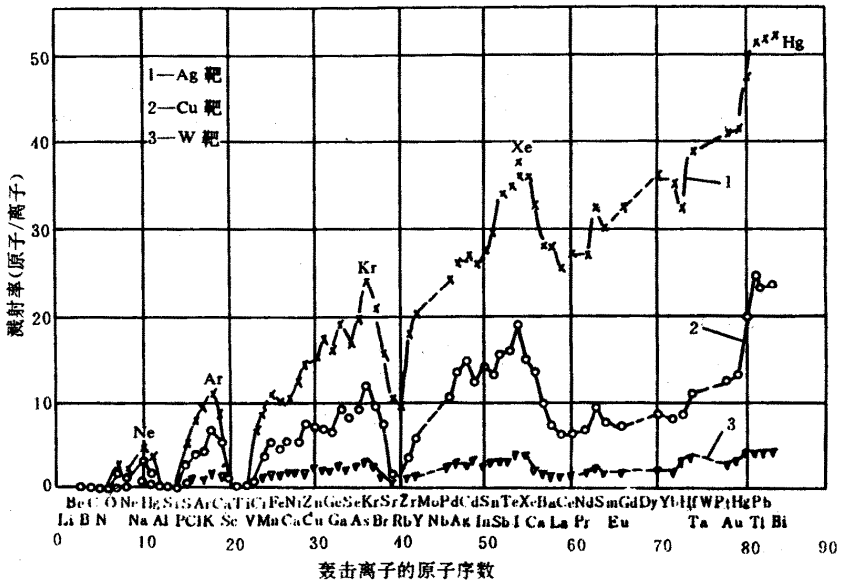


图 2.3.2-12 溅射率与入射离子的原子序数的关系

（4）入射离子的入射角　入射角是指离子入射方向与被溅射靶材表面法线之间的夹角。图 2.3.1-13 示出了 Ar 离子对几种金属的溅射率与入射角的关系。可以看出，随着入射角的增加溅射率逐渐增大，在 0~60°之间的相对溅射率基本上服从 $1/\cos\theta$ 规律，即 S（θ）/S（0）=$1/\cos\theta$，S（θ）和 S（0）分别为 θ 角和垂直入射时的溅射率。并且可见，60°时的 S 值约为垂直入射时的 2 倍。当入射角为 60°~80°时，溅射率最大，入射有再增加时，溅射率急剧减小，当等于 90°时，溅射率为零。这种变化情况的典型曲线见图 2.3.2-14 所示，即对于不同的靶材和入射离子而言，对应的最大溅射率 S 值，有一个最佳入射角 θ_m。另外，实验结果表明，不同的离子加速电压，对入射角 θ_m 值也存在一定影响。一般说来，入射角度与溅射率的关系，对金、银、铜、铂等影响较小；对铝、铁、钛、钽等影响较大；镍、钨等为中等。

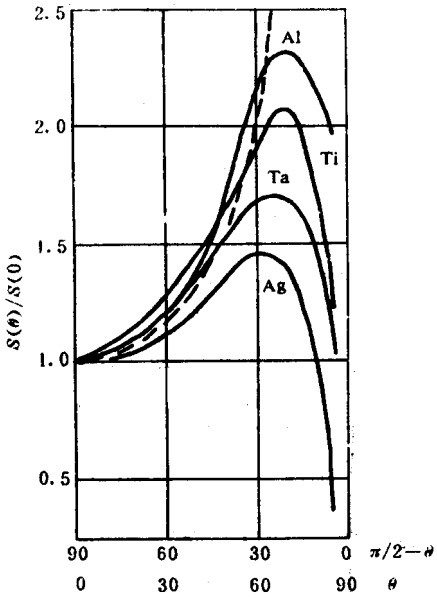


图 2.3.2-13 Ar^+的入射角与几种金属溅射率的关系

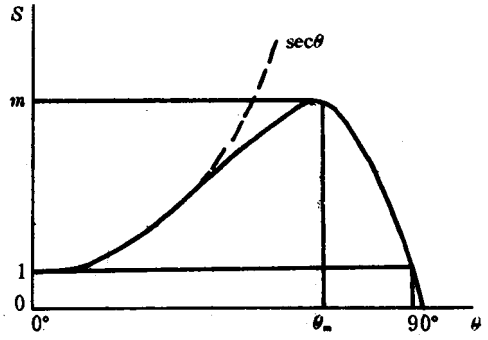


图 2.3.2-14 溅射率与离子入射角的典型关系曲线

另外，大量实验结果表明，不同入射角θ的溅射率值$S(\theta)$，和垂直入射时的溅射率值$S(\theta)$，对于不同靶材和入射离子的种类，有以下结果：

（1）对于轻元素靶材，$S(\theta)/S(0)$的比值变化显著；

（2）重离子入射时，$S(\theta)/S(0)$的比值变化显著；

（3）随着入射离子能量的增加，$S(\theta)/S(0)$呈最大值的角度逐渐增大，但是$S(\theta)/S(0)$的最大值，在入射离子的加速电压超过 2kV 时，急剧减小。

对于上述溅射率随离子入射角的变化，可从以下两方面进行解释：首先，入射离子所具有的能量轰击靶材，将引起靶材表面原子的级联碰撞，导致某

些原子被溅射。该级联碰撞的扩展范围不仅与入射离子能量有关，还与离子的入射角有关。显然，在大入射角情况下，级联碰撞主要集中在很浅的表面层，妨碍了级联碰撞范围的扩展。结果低能量的反冲原子的生成率很低，致使溅射率急剧下降。第二，入射离子以弹性反射方式从靶面反射。离子的反射方向与入射角有关。因此，反射离子对随后入射离子的屏蔽阻挡作用与入射角有关。在入射角为 60°~80° 时，其阻挡作用最小而轰击效果最好，故此时溅射率 *S* 呈最大值。

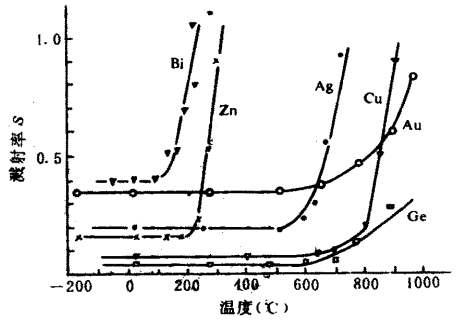


图 2.3.2-15 溅射率与温度关系
（用 Xe+以 45keV 对靶进行轰击）

（5）靶材温度　溅射率与靶材温度的依赖关系，主要与靶材物质的升华能相关的某温度值有关，在低于此温度时，溅射率几乎不变。但是，超过此温度时，溅射率将急剧增加。可以认为，这和溅射与热蒸发二者的复合作用有关。图 2.3.2-15 是用 45keV 的氙离子（Xe^+）对几种靶材进行轰击时，所得溅射率与靶材温度的关系曲线。由图可见，在溅射时，应注意控制靶材温度，防止出现溅射率急剧增加现象的产生。

溅射率除与上述因素有关外，还与靶的结构与靶材的结晶取向、表面形貌、溅射压强等因素有关。综上所述，为了保证溅射薄膜的质量和提高薄膜的淀积速度，应当尽量降低工作气体的压力和提高溅射率。

3．溅射原子的能量和速度

溅射原子所具有的能量和速度也是描述溅射特性的重要物理参数。一般由蒸发源蒸发出来的原子的能量为 0.1eV 左右。而在溅射中，由于溅射原子是与高能量（几百~几千 eV）入射离子交换动量而飞溅出来的，所以，溅

射原子具有较大的能量。如以 1000eV 加速的 Ar^+离子溅射铝等轻金属元素时，逸出原子的能量约为 10eV，而溅射钨、钼、铂时，逸出原子的能量约为 35eV。一般认为，溅射原子的能量比热蒸发原子能量大 1~2 个数量级，约为 5~10eV。因此，溅射薄膜具有许多优点。

溅射原子的能量与靶材料、入射离子的种类和能量以及溅射原子的方向性等都有关。不同能量的 Hg^+离子轰击 Ag 单晶靶后逸出的 Ag 原子能量分布情况如图 2.3.2-16 所示。其能量的分布近似麦克斯威尔分布，大部分溅射原子的能量小于 100eV，高能量部分有一拖长的尾巴，平均能量为 10~40eV。轰击离子的能量增加，高能量尾巴也拖得更长。当入射离子能量大于 1000eV 时，所逸出原子的平均能量不再增大。

用能量为 1200eV 的 Kr^+离子轰击不同元素靶材得到的逸出溅射原子能量分布曲线如图 2.3.2-17 所示。Rh、Pd、Ag 在元素周期表中是相邻元素，原子量大体相等，但能量分布曲线却有较大差异。不同种类入射离子轰击不同靶材时，逸出原子的能量分布示于图 2.3.2-18，可见它们具有相近似的能量分布规律，但能量值的分布范围不相同。

同一离子轰击不同材料时，溅射原子的平均逸出能量和平均逸出速度分别如图 2.3.2-19 和图 2.3.2-20 所示，由图可见，当原子序 Z>20 时，各元素的平均逸出能量差别增大，而平均速度的差别极小。另外由图 2.3.2-21 可见，不同方向逸出原子的能量分布也是不相同的。

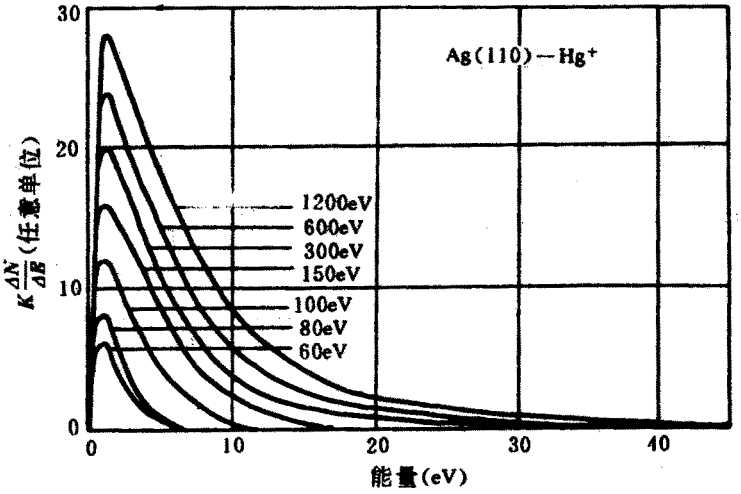


图 2.3.2-16 不同能量的 Hg+轰击 Ag 靶时溅射原子的能量分布

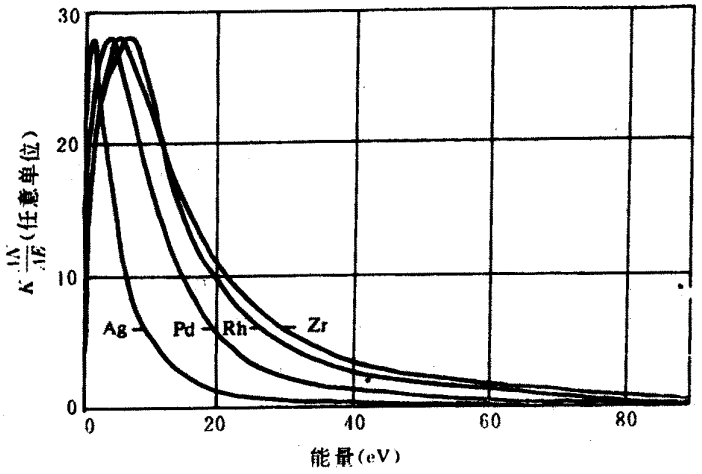


图 2.3.2-17 1200eV Kr^+轰击不同靶材时逸出原子的能量分布

实验结果表明，溅射原子的能量和速度具有以下几个特点：

（1）重元素靶材被溅射出来的原子有较高的逸出能量，而轻元素靶材则有高的原子逸出速度；

（2）不同靶材料具有不相同的原子逸出能量，而溅射率高的靶材料，通常有较低的平均原子逸出能量；

（3）在相同轰击能量下，原子逸出能量随入射离子质量线性增加，轻入射离子溅射出的原子其逸出能量较低，约为 10eV，而重入射离子溅射出的

原子其逸出能量较大，平均达到 30~40eV，与溅射率的情形相类似；

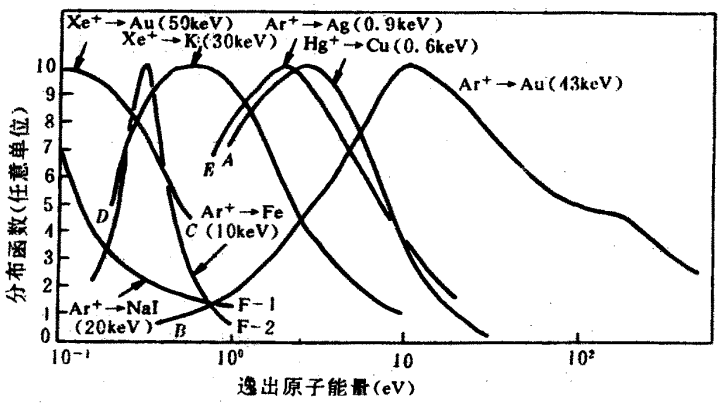


图 2.3.2-18 不同入射离子轰击不同靶材时逸出原子的能量分布

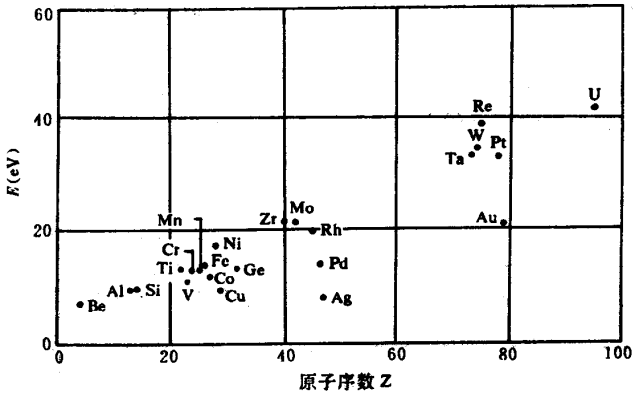


图 2.3.2-19 1200eV Kr+轰击不同靶材时溅射原子的平均逸出能量

（4）溅射原子的平均逸出能量，随入射离子能量增加而增大，当入射离子能量达到 1keV 以上时，平均逸出能量逐渐趋于恒定值；

（5）在倾斜方向逸出的原子具有较高的逸出能量，这符合溅射的碰撞过程遵循动量和能量守恒定律。

此外，实验结果表明，靶材的结晶取向与晶体结构对逸出能量影响不大。溅射率高的材料通常具有较低的平均逸出能量。

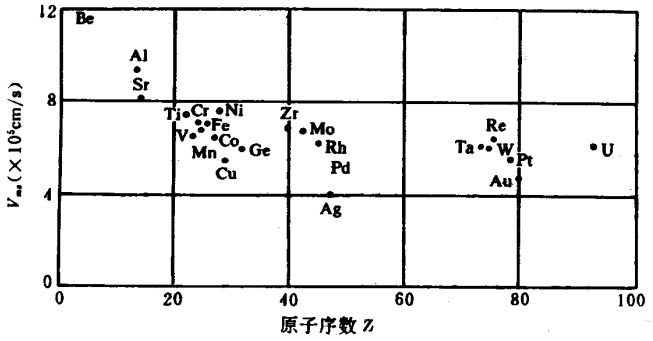


图 2.3.2-20 1200eV Kr^+轰击不同靶材时溅射原子的平均逸出速度

4．溅射原子的角度分布

研究溅射原子的分布，有助于了解溅射机理和建立溅射理论，在实际应用上也有助于控制膜厚的分布。早期的研究认为，溅射原子角度分布符合 Knudsen 的余弦定律，并且与入射离子的方向性无关（参见图 2.3.2-22 中虚线部分）。这与早期的溅射理论分析相符，即认为溅射的发生是由于高能量的轰击离子产生了局部高温区，从而导致靶材料的蒸发，因此，逸出原子呈现余弦分布规律。这种理论称为溅射的热峰蒸发理论。但是，以后的进一步研究发现，在有低能离子轰击时，逸出原子的分布并不遵从余弦分布规律。垂直于靶表面方向逸出的原子数，明显地少于按余弦分布时应有的逸出原子数，其结果如图 2.3.2-23 所示。对于不同的靶材料，角分布与余弦分布的偏差也不相同。而且，改变轰击离子的入射角时，逸出原子数在入射的正反射方向显著增加，如图 2.3.2-22 中实线所示，与余弦分布的偏差明显增大。

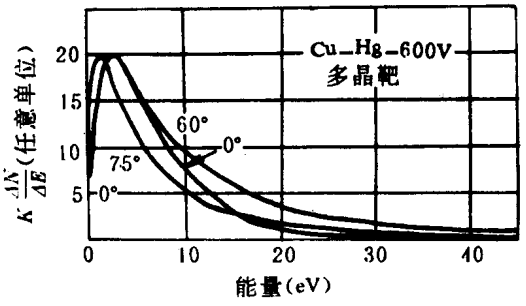


图 2.3.2-21 用 Hg^+垂直轰击 Cu 多晶靶时，与表面法线成不同角度方向溅射原子的能量分布

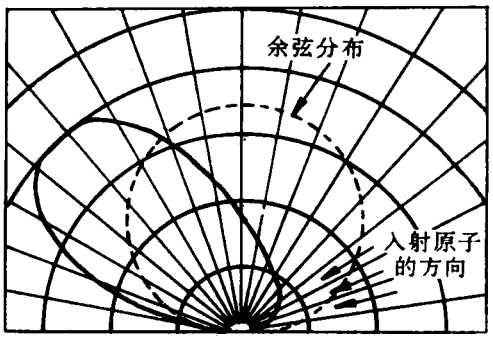


图 2.3.2-22 倾斜轰击时溅射原子的角度分布

另外，实验结果还表明，溅射原子的逸出主要方向与晶体结构有关。显然，这也直接影响其溅射率。对于单晶靶材料，通常，最主要的逸出方向是原子排列最紧密的方向，其次是次紧密的方向。对于面心立方结构晶体，主要的逸出方向为[110]晶向，其次为[100]、[111]晶向。

半导体单晶材料逸出原子的角分布与金属类似，也存在与结晶构造有关的主要逸出方向，即具有各向异性的特点，但不如金属那样明显。

多晶靶材与单晶靶材溅射原子的角分布有明显的不同，如上所述，对于单晶靶可观察到溅射原子明显的择优取向，而多晶固体差不多显示一种余弦分布，如图 2.3.2-24 所示。

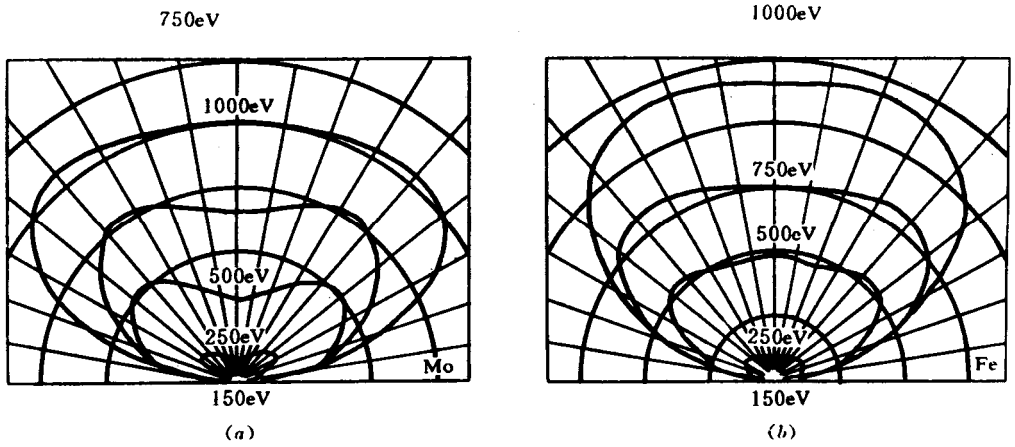


图 2.3.2-23 能量为 100~1000eV 的 Hg^+垂直入射时钼（*a*）和铁（*b*）的溅射原子角分布

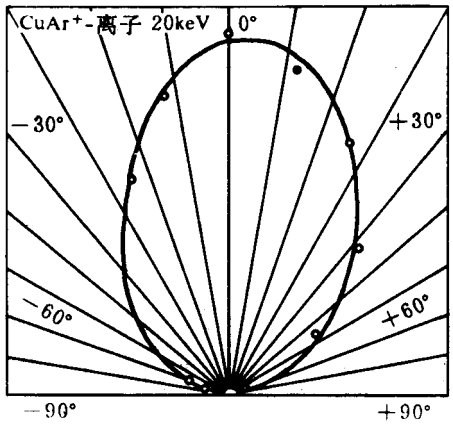


图 2.3.2-24 用 20keV Ar+溅射铜时溅射原子的余弦分布规律

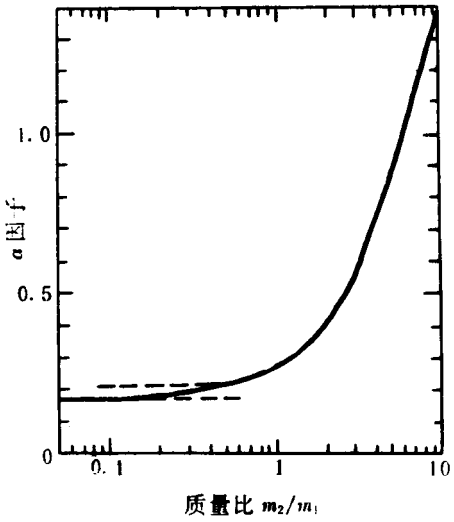


图 2.3.2-25 a 因子与质量比的关系

（1）确定荷能粒子（入射离子和溅射原子）在表面附近的能量；

（2）确定由此产生的低能溅射原子的数目；

（3）确定由这些溅射原子中到达基板表面的数目；

（4）确定到达基板表面的溅射原子中能量超过结合能的原子数目。

由此，可对一般轰击离子求得溅射率的表达式。

（1）离子能量 $E < 1$keV，在垂直入射时，溅射率的表达式为

$$S=\left(\frac{3}{4\pi^2}\right)\frac{\alpha T_m}{V_0} \qquad (2.3.2\text{-}4)$$

式中，$T_m=\dfrac{4m_1m_2}{(m_1+m_2)^2}E$，为最大传递能量，对级联碰撞来说，$T_m$ 也是溅射过程最大的反射能量；V_0 是靶材和元素的势垒高度，也是靶材元素的升华能；α 是与 m_2/m_1 有关的量，其依赖关系如图 2.3.2-25 所示，对于不同的质量比，其值在 0~1.5 之间。m_1 和 m_2 分别是靶原子和入射离子的质量。

（2）离子能量 E > 1keV，在垂直入射时的溅射率

$$S=0.042aS_n(E)/V_0\,\text{Å}^2 \qquad (2.3.2\text{-}5)$$

式中，Å 即埃（1 Å = 0.1nm），a 和 V_0 的意义与上式中同。S_n（E）由林哈德等给出

$$S_n(E)=4\pi Z_1Z_2e^2a_{12}[m_1/(m_1+m_2)]S_n(\varepsilon) \qquad (2.3.2\text{-}6)$$

式中

$$\varepsilon=\frac{m_1E/(m_1+m_2)}{Z_1Z_2e^2/a_{12}} \qquad (2.3.2\text{-}7)$$

式中，$a_{12}=0.8853a_0(Z_1^{2/3}+Z_2^{2/3})^{-1/2}$，称汤姆逊-费米屏蔽半径；$a_0$ 为玻尔半径，a_0 = 0.0529nm；$0.8853=\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{3}{4}\pi\right)^{3/2}$ 称汤姆逊-费米常数；Z_1 为轰击离子的原子序数；Z_2 为靶材的原子序数。

ε 是一个无量纲参数，称为折合能量。$S_n(\varepsilon)$ 称为核阻止截面。ε 与 $S_n(\varepsilon)$ 的关系如表 3-3 所示。

表 2.3.2-3 ε 与 $S_n(\varepsilon)$ 的关系

ε	$S_n(\varepsilon)$	ε	$S_n(\varepsilon)$
0.002	0.120	0.4	0.405
0.004	0.154	1.0	0.356
0.01	0.211	2.0	0.291

0.02	0.261	4.0	0.214
0.04	0.311	10	0.128
0.1	0.372	20	0.0813
0.2	0.403	40	0.0493

用 400eV 的 Xe^+溅射不同元素靶材，按式（3-4）的计算值与实验值的比较结果示于图 3-9 中。可以看出，Be、Si、Cr、Ni、Cu、Ge、Ru、Rh、Pd、Ag、Ir、Pt、Au 元素靶二者符合较差，计算值比测量值大一倍左右。这些元素绝大多数是过渡金属元素，其溅射率随 *d* 层电子的填充数而增加。当 *d* 层电子达到满层时，*S* 达到极大值。

（3）一般情况下，溅射率的计算式可按下式处理

$$\mathrm{S}=\mathrm{W}\times10^5/mIt \qquad (2.3.2\text{-}8)$$

式中，*W* 为靶材的损失量（*g*）；*m* 为原子量；*I* 为离子电流（*A*）；*t* 为溅射时间（*s*）。

$$W=RtAd \qquad (2.3.2\text{-}9)$$

式中，*R* 为刻蚀速率（cm/s）；*A* 为样品面积（cm^2）；*d* 为材料密度（g/cm^3）。

离子电流

$$I=JA \qquad (2.3.2\text{-}10)$$

式中，J 为离子电流密度（A/cm^2）。

根据以上各式，可得出溅射率为

$$S=\frac{Rd}{mJ}\times10^5 \qquad (2.3.2\text{-}11)$$

三、溅射过程

溅射过程包括靶的溅射、逸出粒子的形态、溅射粒子向基片的迁移和在基板上成膜的过程。

1．靶材的溅射过程

当入射离子在与靶材的碰撞过程中，将动量传递给靶材原子，使其获得的能量超过其结合能量，才可能使靶原子发生溅射。这是靶材在溅射时主要发生的一个过程。实际上，溅射过程十分复杂，当高能入射离子轰击固体表面时，还会产生如图 3-26 所示的许多效应。例如入射离子可能从靶表面反射，

或在轰击过程中捕获电子后成为中性原子或分子，从表面反射；离子轰击靶引起靶表面逸出电子，即所谓次级电子；离子深入靶表面产生注入效应，称离子注入；此外还能使靶表面结构和组分发生变化，以及使靶表面吸附的气体解吸和在高能离子入射时产生辐射射线等。

除了靶材的中性粒子，即原子或分子最终淀积为薄膜之外，其他一些效应会对溅射膜层的生长产生很大的影响。必须指出，图 2.3.2-26 中所示的各种效应或现象，在大多数辉光放电镀膜工艺中的基片上，同样可能发生。因为在辉光放电镀膜工艺中，基片的自偏压和接地极一样，都将形成相对于周围环境为负的电位。所以也应将基片视为溅射靶。只不过二者在程度上有很大差异。

由于离子轰击固体表面所产生的各种现象与固体材料种类、入射离子种类及能量有关。表 2.3.2-4 示出了用 10~100eV 能量的 Ar^+离子对某些金属表面进行轰击时，平均每个入射离子所产生各种效应及其发生几率的大致情况。当靶材为介质材料时，一般溅射率比金属靶材的小，但电子发射系数小。

表 2.3.2-4 离子轰击固体表面所产生各种效应及其发生几率

效　　应	名　　称	发生几率
溅　　射	溅射率 S	S = 0.1~10
离子溅射	一次离子反射系数 ρ	ρ =10^{-4}~10^{-2}
离子溅射	被中和的一次离子反射系数 ρ_m	ρ_m =10^{-3}~10^{-2}
离子注入	离子注入系数 a	a =1-（ ρ - ρ_m ）
离子注入	离子注入深度 d	d=1~10nm
二次电子发射	二次电子发射系数 γ	γ =0.1~1
二次离子发射	二次离子发射系数 k	k =10^{-5}~10^{-4}

2．溅射粒子的迁移过程

靶材受到轰击所逸出的粒子中，正离子由于反向电场的作用不能到达基片表面，其余的粒子均会向基片迁移。大量的中性原子或分子在放电空间飞行过程中，与工作气体分子发生碰撞的平均自由程 λ_1 可用下式表示

$$\lambda_1 = \bar{c}_1 /(v_{11} + v_{12}) \qquad (2.3.2\text{-}12)$$

式中，$\bar{c}_1$ 是溅射粒子的平均速度；v11 是溅射粒子相互之间的平均碰撞次数；v12 是溅射粒子与工作气体分子的平均碰撞次数。

通常，可认为溅射粒子的密度远小于工作气体分子的密度，则有 v11 << v12，故

$$\lambda_1 \approx \bar{c}_1 / v_{12} \qquad (2.3.2\text{-}13)$$

v12 与工作气体分子的密度 n2、平均速度 c2、溅射粒子与工作气体分子的碰撞面积 Q12 有关，并可用下式表示

$$v_{12} = Q_{12}\sqrt{(\bar{c}_1)^2 + (\bar{c}_2)^2}\, n_2 \qquad (2.3.2\text{-}14)$$

或者，$Q_{12} \approx \pi(r_1 + r_2)^2$，这里 r1、r2 分别是溅射粒子和工作气体分子的原子半径。

由于溅射粒子的速度远大于气体分子的速度，所以，可认为式（2.3.2-14）$v_{12} \approx Q_{\bar{c}_1} n_2$，则溅射粒子的平均自由程可近似地由下式表示

$$\lambda_1 \approx 1/\pi(r_1 + r_2)^2 n_2 \qquad (2.3.2\text{-}15)$$

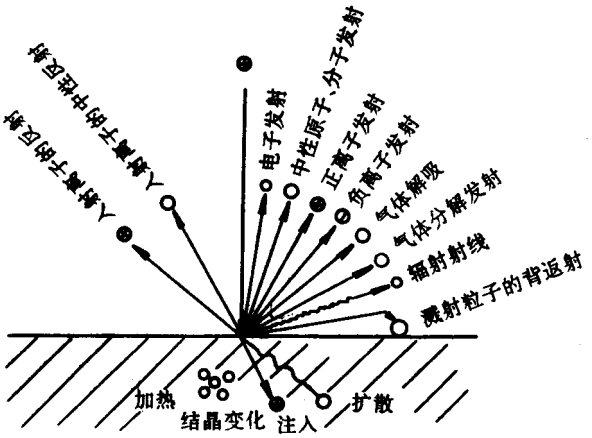


图 2.3.2-26 离子轰击固体表面所引起的各种效应

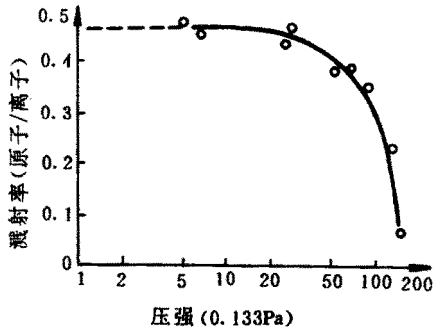


图 2.3.2-27 溅射率与 Ar 气压强的关系

例如，Ar+离子溅射铜靶时，r1 = 0.96×10-8cm，r2 = 1.82×10-8cm，n2 = 3.5×1016/cm3，（0℃，133Pa），由式（2.3.2-15）可算得 $\lambda_1 \approx 11.7\times10\text{-}3\text{cm}$。此值比中性气体分子间的平均自由程大得多。

溅射镀膜的气体压力为 101~10-1Pa，此时溅射粒子的平均自由程约为 1~10cm，因此，靶与基片的距离应与该值大致相等。否则，溅射粒子在迁移过程中将发生多次碰撞，这样，既降低了靶材原子的动能，又增加靶材的散射损失。

尽管溅射原子在向基片的迁移输运过程中，会因与工作气体分子碰撞而降低其能量，但是，由于溅射出的靶材原子能量远远高于蒸发原子的能量，所以溅射过程中淀积在基片上靶材原子的能量仍比较大，如前所述，其值相当于蒸发原子能量的几十至上百倍。

3．溅射粒子的成膜过程

关于薄膜的生长过程将在第七章中介绍，这里主要叙述靶材粒子入射到基片上在沉积成膜过程中应当考虑的几个问题。

（1）淀积速率

淀积速率 Q 是指从靶材上溅射出来的物质，在单位时间内淀积到基片上的厚度，该速率与溅射速率 S 成正比。即有

$$Q = CIS \qquad (2.3.2\text{-}16)$$

式中，*C*—与溅射装置有关的特征常数；*I*—离子流；*S*—溅射率。

上式表明，对于一定的溅射装置（即 *C* 为确定值）和一定的工作气体，

提高淀积速率的有效办法是提高离子电流 I。但是，如前所述，在不增高电压的条件下，增加 I 值就只有增高工作气体的压力。图 2.3.1-27 示出了气体压力与溅射率的关系曲线。由图可知，当压力增高到一定值时，溅射率将开始明显下降。这是由于靶材粒子的背返射和散射增大所引起的。事实上，在大约 10Pa 的气压下，从阴极靶溅射出来的粒子中，只有 10%左右才能够穿越阴极暗区。所以，由溅射率来选择气压的最佳值是比较恰当的。当然，应注意由于气压升高对薄膜质量的影响问题。

（2）沉积薄膜的纯度

为了提高淀积薄膜的纯度，必须尽量减少淀积到基片上杂质的量。这里所说的杂质主要指真空室的残余气体。因为，通常有约百分之几的溅射气体分子注入淀积薄膜中，特别在基片加偏压时。若真空室容积为 V，残余气体分压为 P_c，氩气分压为 P_{Ar}，送入真空室的残余气体量为 Q_c，氩气量为 Q_{Ar}，则有

$$Q_c = P_c V \qquad Q_{Ar} = P_{Ar} V$$

即

$$P_c = P_{Ar} Q_c / Q_{Ar} \qquad (2.3.2\text{-}17)$$

由此可见，欲降低残余气体压力 P_c，提高薄膜的纯度，可采取提高本底真空度和增加送氩量这两项有效措施。本底真空度应为 10^{-3}~10^{-4}Pa 较合适。

（3）淀积过程中的污染

众所周知，在通入溅射气体之前，把真空室内的压强降低到高真空区内（10^{-4}Pa）是很必要的。因此，原有工作气体的分压极低。即便如此，仍可存在许多污染源：

（a）真空室壁和真空室中的其他零件可能会有吸附气体、水汽和二氧化碳。由于辉光中电子和离子的轰击作用，这些气体可能重新释出。因此，可能接触辉光的一切表面都必须在淀积过程中适当冷却，以便使其在淀积的最初几分钟内达到热平衡；也可在抽气过程中进行高温烘烤。

（b）在溅射气压下，扩散泵抽气效力很低，扩散泵油的回流现象可能

十分严重。由于阻尼器各板间的间隔距离相当于此压强下的若干倍平均自由程，故仅靠阻尼器将不足以阻止这些气体进入真空室。因此，通常需要在放电区与阻尼器之间进行某种形式的气体调节，即在系统中利用高真空阀门作为节气阀，即可轻易地解决这一问题。另外，如果将阻尼器与涡轮分子泵结合起来代替扩散泵，将能消除这种污染。

（c）基片表面的颗粒物质对薄膜的影响是会产生针孔和形成淀积污染。因此，淀积前应对基片进行彻底的清洗，尽可能保证基片不受污染或携带微粒状污物。

（4）成膜过程中的溅射条件控制

首先，应选择溅射率高、对靶材呈惰性、价廉、高纯的溅射气体或工作气体。一般，氩气是较为理想的溅射气体。其次，应注意溅射电压及基片电位（接地、悬浮或偏压）对薄膜特性的严重影响。溅射电压不仅影响淀积速率，而且还严重影响薄膜的结构；基片电位则直接影响入射的电子流或离子流，如果对基片有目的地施加偏压，使其按电的极性接收电子或离子，不仅可净化基片表面，增强薄膜附着力，而且还可改变淀积薄膜的结晶结构。此外，基片温度直接影响膜层的生长及特性。如淀积钽膜时，基片温度在200~400℃范围内，温度对钽膜特性影响不大，然而在700℃以上高温时，淀积钽膜将成为体心立方结构，而700℃以下则成为四方晶格。靶材中杂质和表面氧化物等不纯物质，是污染薄膜的重要因素。必须注意靶材的高纯度和保持清洁的靶表面。通常在溅射淀积之前对靶进行预溅射是使靶表面净化的有效方法。

此外，在溅射过程中，还应注意溅射设备中存在的诸如电场、磁场、气氛、靶材、基片、温度、几何结构、真空度等参数间的相互影响，因为，这些参数均综合地决定着溅射薄膜的结构与特性。

四、溅射机理

溅射现象很早就为人们所认识，通过大量实验研究，对这一重要物理现象得屈以下几点结论：

（1）溅射率随入射离子能量的增加而增大；而在离子能量增加到一定程度时，由于离子注入效应，溅射率将随之减小；

（2）溅射率的大小与入射粒子的质量有关；

（3）当入射离子的能量低于某一临界值（阈值）时，不会发生溅射；

（4）溅射原子的能量比蒸发原子的大许多倍；

（5）入射离子的能量低时，溅射原子角分布就不完全符合于余弦分布规律。角分布还与入射离子方向有关。从单晶靶溅射出来的原子趋向于集中在晶体密度最大的方向。

（6）因为电子的质量小，所以，即使用具有极高能量的电子轰击靶材时，也不会产生溅射现象。

由于溅射是一个极为复杂的物理过程，涉及的因素很多，长期以来对于溅射机理虽然进行了很多的研究，提出过许多的理论，但都不能完善地解释溅射现象。尚未建立一套完整的统一的理论和模型能对所有实验结果作系统阐述和进行定量计算。这里，简单介绍比较成熟的两种理论：热蒸发理论和动量转移理论。

1．热蒸发理论

早期有人认为，溅射现象是被电离的敢体的荷能正离子，在电场的加速下轰击靶表面，而将能量传递给碰撞处的原子，结果导致靶表面碰撞处很小区域内，发生瞬间强烈的局部高温，从而使这个区域的靶材料熔化，发生热蒸发。

热蒸发理论在一定程度上解决了溅射的某些规律和溅射现象，如溅射率与靶材料的蒸发热和轰击离子的能量关系、溅射原子的余弦分布规律等。但是，这一理论不能解释溅射率与离子入射角的关系，单晶材料溅射时，溅射原子的角分布的非余弦分布规律，以及溅射率与入射离子质量的关系等。

2．动量转移理论

对于溅射特性的深入研究，各种实验结果都表明溅射完全是一个动量转移过程。现在，这一观点已成为定论，因而溅射又称为物理溅射。

动量转移理论认为，低能离子碰撞靶时，不能从固体表面直接溅射出原子，而是把动量转移给被碰撞的原子，引起晶格点阵上原子的链锁式碰撞。这种碰撞将沿着晶体点阵的各个方向进行。同时，碰撞因在原子最紧密排列的点阵方向上最为有效，结果晶体表面的原子从邻近原子那里得到愈来愈大的能量，如果这个能量大于原子的结合能，原子就从固体表面被溅射出来。动量转移理论能很好地解释热蒸发理论所不能说明如溅射率与离子入射角的关系，溅射原子的角分布规律等规律。

下面简单介绍这一理论近似的溅射模型和理论计算结果。如前所述，当入射离子的能量较低时，假定它与靶原子以及靶原子之间的相互作用是刚体弹性碰撞，用此模型可形象地描述溅射过程。如图 3-28 所示，当入射刚体原子球击发一堆排列整齐的刚体靶原子时，引起刚体球之间一系列相互碰撞，使靶原子球散向各方，靶原子的运动方向沿着原击发原子的逆方向时，就相当于逸出的靶原子。上述模型没有考虑原子之间存在的功函数，以及原子之间的碰撞性质随能量不同而异等问题，所以，它并不能完全反映溅射的实际过程。但在溅射淀积的能量范围内（0.1~1keV），仍可近似地阐明溅射过程。入射离子轰击所引起靶原子之间的一系列二级碰撞，称为级联碰撞。

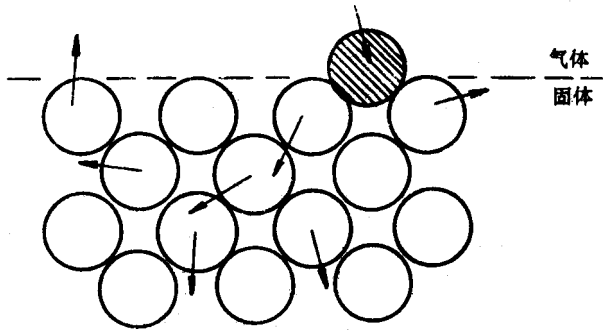


图 2.3.2-28 溅射原子的弹性碰撞模型

两球体间碰撞时有动量和动能的效换。若两个球体碰撞前后动能总和以及动量总和均保持不变，则弹性碰撞后能量就从一个球体转移到另一个球体。

设两个球体的质量分别为 m_1、m_2，若 m_2 静止，m_1 以速度 v_1 在以两个

球中心联线成θ角方向与 m_2 碰撞，如图 2.3.1-29 所示。碰撞前 m_1 的能量为 E_1，碰撞后 m_2 获得的能量为 E_2，则有

$$\frac{E_2}{E_1}=\frac{\frac{1}{2}m_2v_2^2}{\frac{1}{2}m_1v_1^2}=\frac{4m_1m_2}{(m_1+m_2)^2}\cos^2\theta \qquad (2.3.2\text{-}18)$$

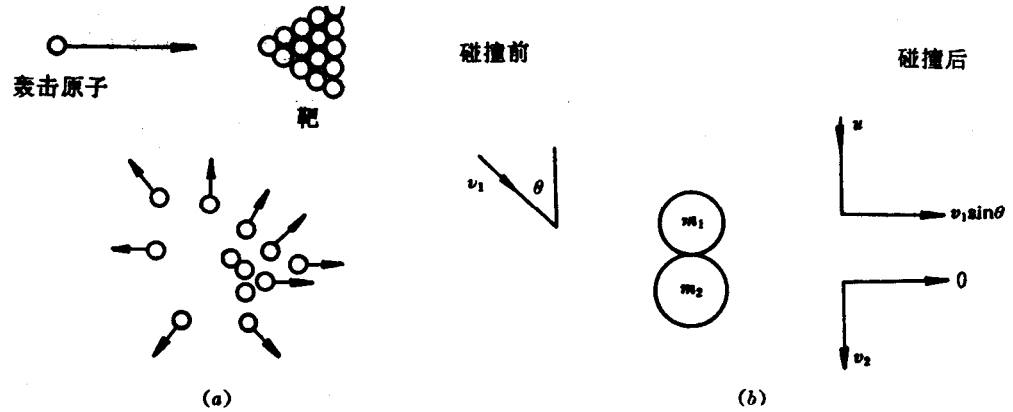


图 2.3.2-29 弹性碰撞前后的速度分量

如果碰撞发生在沿球体中心线方向，则θ=0，cosθ=1，则

$$E_2=\frac{4m_1m_2}{(m_1+m_2)^2}E_1=\lambda E_1 \qquad (2.3.2\text{-}19)$$

式中，　$\lambda=4m_1m_2/(m_1+m_2)^2$ 称为能量转移函数。当 $m_1=m_2$ 时，$\lambda=1$，此时 $E_2=E_1$，这说明两个相同粒子之间碰撞时，运动粒子的能量可以全部转移到静止粒子上去。即靶原子获得最大的能量。

若 $m_1<<m_2$ 时，$\lambda\approx 4m_1/m_2<<1$，或 $E_2=4\frac{m_1}{m_2}E_1<<E_1$。这说明如用电子等质量很轻的粒子作为轰击粒子进行溅射的话，则因电子质量与靶原子质量相差太悬殊，只有极少的电子能量转移到靶原子上去，这就说明了电子不能产生溅射作用。

另一种极端情况是 $m_1>>m_2$，即用重元素粒子轰击轻元素粒子，同样可以得到 $\lambda\approx 4m_1/m_2<<1$ 即

$$\frac{E_2}{E_1}=\frac{\frac{1}{2}m_v v_2^2}{\frac{1}{2}m_1 v_1^2}=\frac{4m_2}{m_1}$$

则化简后得到

$$v_2 = 2v_1 \qquad (2.3.2\text{-}20)$$

此结果表明轻粒子被重粒子碰撞后的速度为碰撞前重粒子速度的二倍。

溅射过程实质上是入射离子通过与靶材碰撞，进行一系列能量交换的过程。入射离子转移到从靶材表面逸出的溅射原子上的能量大约只有入射能量的 1%左右，而大部分能量则通过级联碰撞而消耗在靶的表面层中，并转化为晶格的热振动。

溅射率 S 是表征溅射特性最主要的物理量。根据能量转移关系式，可以估计到 S 与入射离子的能量 E_1、入射离子的质量 m_1 及靶原子的质量 m_2 有关。但如果考虑到入射离子能量转移到溅射原子的全过程，以及溅射原子只能从靶材表面逸出，则溅射率 S 必与聚积在近表面附近的一薄层中的能量成正比。可以用核阻止截面 S_n（ε）来表征聚积的能量。则应用输出理论并作若干假设后，当入射离子能量较低时有

$$S_n(\varepsilon)=12\pi a^2\lambda E \qquad (2.3.2\text{-}21)$$

式中，a 为原子之间相互作用的屏蔽半径。

应用输运理论并经简化后，可求得平面靶的溅射率表达式

$$S=\frac{aS_n(\varepsilon)}{16\pi^3 a^2 U_0} \qquad (2.3.2\text{-}22)$$

将式（3-21）代入后得到

$$S=\frac{3a\lambda E}{4\pi^2 U_0} \qquad (2.3.2\text{-}23)$$

a 为 m2/m1 的单调上升函数；U0 为表面势能。在入射能量 E>1keV 时，还必须计入原子间的相互作用，因而上式可修正为

$$S = 3.56a\frac{Z_1 Z_2}{Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3}} \cdot \frac{m_1}{(m_1 + m_2)} \cdot \frac{S_n(\varepsilon)}{U_0} \qquad (2.3.2\text{-}24)$$

式中，Z1、Z2 分别为入射离子和靶原子的原子序数。动量转移理论与实验结果在大多数情况下比较符合，目前已被普通接受。按式（2.3.2-23）和（2.3.2-24）的理论计算与实测结果如图 2.3.2-30 所示。

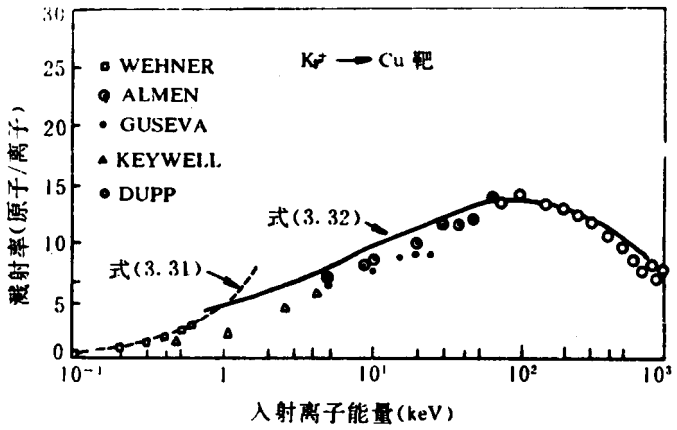


图 2.3.2-30 溅射率与入射离子能量关系的理论值与实测值

2.3.3 影响溅射镀膜质量的工艺参数

膜厚的均匀性是衡量薄膜质量和镀膜装置性能的一个重要指标。为了提高膜厚均匀性，可采取优化靶基距、改变基片运动方式、增加挡板机构和实行膜厚监控等措施。

一、二极溅射的膜厚均匀性

如前所述，溅射镀膜的厚度分布，与溅射粒子的角分布、溅射粒子与气体分子的碰撞情况以及靶的配置等因素有关。如果近似地认为溅射粒子角分布服从余弦规律，并忽略溅射粒子与气体分子的碰撞，对于如图 2.2.3-50（*a*）所示的平面形靶，基片内膜厚分布 d/d_0 可用下式表示

$$\frac{d}{d_0}=\frac{(1+R/h)^2}{2(R/h)^2}\left\{1-\frac{1+(l/h)^2-(R/h)^2}{\sqrt{[1-(l/h)^2+(R/h)^2]^2+4(l/h)^2}}\right\} \qquad (2.2.3\text{-}38)$$

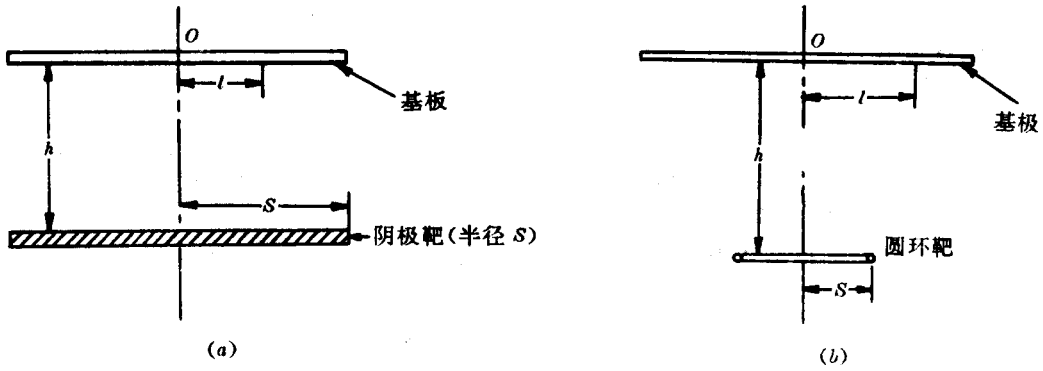


图 2.2.3-50 平行圆板靶与圆环靶

式中，R 是靶的半径，h 是靶基距，d_0 是阳极中心处的膜厚，d 是距阳极中心距离为 l 处的膜厚，l 是考察点与中心的距离。

若采用图 3-50（b）圆环靶时，则膜厚分布为

$$\frac{d}{d_0}=[1+(R/h)^2]^2\frac{1+(l/h)^2+(R/h)^2}{\{[1-(l/h)^2+(R/h)^2]^2+4(l/h)^2\}^{3/2}} \qquad (3\text{-}39)$$

根据式（3-39）的计算结果，不同 S/h 比值时的膜厚分布如图 3-51 所示。

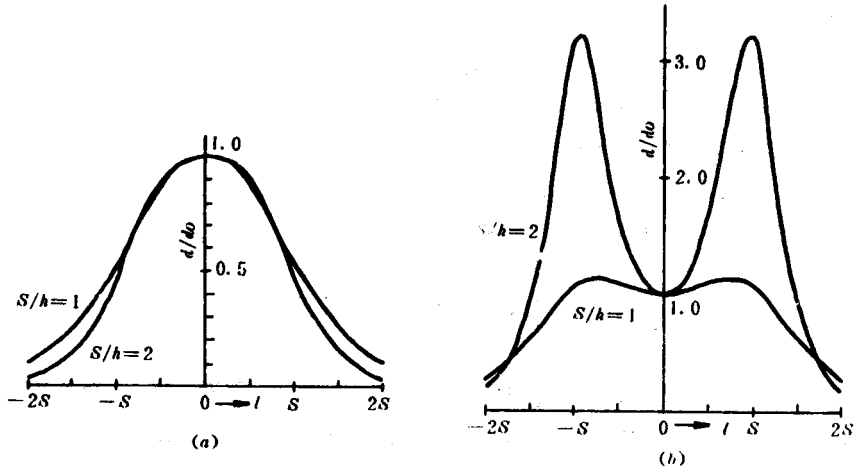


图 2.2.3-51 平行圆板靶与圆环靶的膜厚分布

（a）平行圆板靶的膜厚分布　　（b）圆环靶的膜厚分布

二、磁控溅射的膜厚均匀性

对于磁控油射镀膜，由于存在着电磁场的不均匀性，尤其是磁场的不均匀分布，所造成的不均匀的等离子体密度，将导致靶原子的不 均匀溅射和不均匀淀积。因此，膜厚不均匀性问题必须引起注意。

1．圆形平面磁控靶

圆形平面磁控靶的几何参数如图 2.2.3-52。由于磁控溅射镀膜存在着靶的刻蚀区，这时其膜厚分布为

$$d=\frac{2Sh}{\pi\rho_0(R_2^2-R_1^2)}\int\frac{(h^2+A^2+R^2)RdR}{[(h^2+A^2+R^2+2AR)(h^2+A^2+R^2-2AR)]^{3/2}} \tag{3-40}$$

式中，d—基片上 P 点的膜厚；S—磁控靶的溅射率；ρ_0—靶材密度；h—靶基距；R_1、R_2—刻蚀区的内、外半径（一般取为磁极间隙的内外半径）。

当 $A=0$ 时，即得基片中心处的膜厚 d_0

$$d_0=\frac{2Sh}{\pi\rho_0(R_2^2-R_1^2)}\cdot\frac{R_2^2-R_1^2}{2(h^2+R_1^2)(h^2+R_2^2)} \tag{3-41}$$

比较 d 与 d_0，即求出膜厚的相对变化 d/d_0，然后经过计算便可求出最佳的靶基距 h 值，通常 $h\approx 2R_2$。

2．S 枪磁控靶

对于倒锥形靶的 S 枪磁控靶可以简化为图 2.2.3-53 所示，看成为由若干个丝状环形源的集合，其膜厚分布

$$d=\frac{2S}{\pi\rho_0(R_2^2-R_1^2)}\int\frac{h_0^2(h_0^2+A^2+R^2)RdR}{[(h_0^2+A^2+R^2+2AR)(h_0^2+A^2+R^2-2AR)]^{3/2}} \tag{3-42}$$

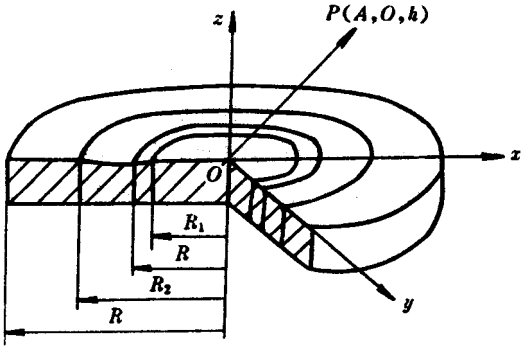


图 2.2.3-52 圆形平面磁控靶的几何参数

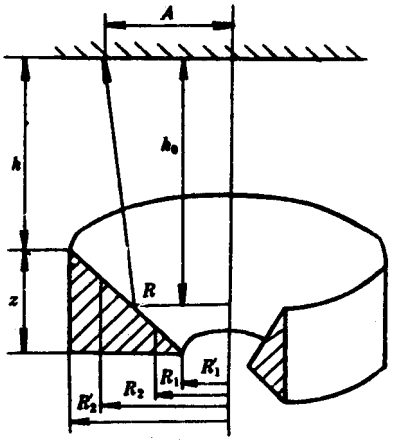


图 2.2.3-53 S 枪磁控靶的几何参数

式中 *S*—*S* 枪磁控靶的溅射率；ρ_0 —靶材密度；R_1、R_2—*S* 枪靶刻蚀区的内、外半径；*R*—丝状环形源半径；h_0—丝状环形源到基片的垂直距离，由该图

$$h_0 = aR + b \tag{3-43}$$

式中，$a=\dfrac{Z}{R_2'-R_1'}$，$b=h+\dfrac{Z}{R_2'-R_1'}R_2'$，*Z*—S 枪靶的高度；$R_1'$、$R_2'$—分别为 *S* 枪靶的内、外半径；*h*—靶基距。

根据 *S* 枪磁控靶的磁场分布及其结构，确定靶刻蚀区半径 R_1、R_2，利用上述公式可算出与轴线距离为任意点 *A* 处的膜厚 d_0。

当 *A* = 0 时，得到轴线处的膜厚 d_0 为

$$d_0=\frac{2S}{\pi\rho_0(R_2^2-R_1^2)}\int_{R_1}^{R_2}\frac{(aR+b)^2RdR}{[(aR+b)^2+R^2]^2} \tag{3-44}$$

比较 d 与 d_0 便得出膜厚的相对变化率 d/d_0。经计算可得出膜厚均匀的靶基距 h 值。通常，$h = 1.5\sim2R_2$。

但在 S 枪靶溅射中，靶原子散射较严重，故以圆环形理论计算的膜厚分布与实际值存在着一定偏差，尤其在小角度范围内偏差较大。但若保证溅射靶与基片的直径比小于 2，则可忽略小角度内的影响。

2.3 实训 离子束溅射制备高反射薄膜

一、实训目的

利用电子束蒸发制备技术制备高性能高反射薄膜。掌握真空系统工作的原理。掌握镀膜机操作流程及注意事项。

二、实训设备

离子束溅射镀膜机一台

三、实训内容

操作如下：

（一）镀膜材料选择

高折射率材料为 Ta_2O_5,低折射率材料为 SiO_2.

（1）执行开机步骤

r) 打开控制箱小门，打开冷水机电源，再打开冷水机（先按面板上 PUMP 按钮打开水泵，再按 COMP1 按钮打开压缩机）；待水温降到 17.5 度，再打开冷却水循环泵；

s) 打开冷却水进出口开关；

t) 打开电源控制柜开关；

u) 打开 UPS 电源起动 AFL-17C 和 AFL-17M 两台控制计算机；

v) 运行 AFL-17C 计算机中 startup tool 程序；

w) 进入 startup tool 程序下的 Runtime 选项，点击 Manual 和 Automatic 按钮，再 Cryo pump 界面下点击 cooling 按钮，启动冷泵制冷；

（2）镀膜准备

x) 在 Procedures 系统下，点击 Venting 按钮，自动关闭高阀,等待水温到达 50°C 时，放气开始，直至真空室门打开；

y) 点击基材转轴图标，将 Rotation 及 Position 调节到 Enable 挡，同时将 Position-substrate position-limit position 调节到-50.0

z) 点击靶材轴图表，将 Angle adjust 及 Axis 调节到 Enable 挡，同时将 Angle adjust-position 调节到 300（Ta2O5）或 120（HfO2）

aa) 分别调用 Pump down、presetting、coating-material side 1（Ta2O5）或 coating-material side 2（HfO2）、primary source、Neutralizer 的参数（parameter）。在 coating-design monitor path 中输入要调用的膜系文件夹路径，完成后点击 load。

bb) 清洁真空室，检查主离子源、辅助离子源及中和器组件同时完成真空腔清洁操作；主控制器中依次打开 primary source RF、primary source ACC、primary source Beam、Neutralizer RF、Neutralizer Keeper、Neutralizer collector。

cc) 将待镀基材放入转轴系统，确认三点接触，点击基材转轴图标，调节 speed 低转速 30rpm，点击 start 确认基材夹具转动平稳。确认平稳后，点击调节 speed 转速 60rpm。

dd) 打开 AFL-17M 计算机 BBM 光控软件，点击 option 中 scan substrate 点击 go，三条光控曲线：红色对应最高峰，白色对应次高峰，蓝色对应无峰位置。扫描完成后点击 update，完成扫描。点击基材转轴图标，Rotation 下 substrate rotation 点击 stop。

ee) 关闭真空室门。点击 Pump down 下 start 按钮，开始自动抽真空；同时点击膜系 load 完成高反射薄膜膜系调入。

ff) 在真空度达到 2.0×10^{-5}mbar 后，确认中和器或离子源是否开启，若未能开启手动点击中和器和离子源图标，点击 switch on 进行手动开启。

（3）工艺过程

gg) 清洁真空室，清洗基片并装夹；

hh) 关闭真空门，自动抽真空；

打开中和器和离子源，确认中和器和离子源的工作状态，根据工艺打开光控,算载入设计膜系文件，进行并完成镀膜操作;并保存过程有关文件,关闭中和器和离子源。

（4）关机

完成所有工作之后,按以下步骤关机:

ii) 镀膜完成后，等待半小时。点击中和器图标，点击 switch off 关闭中和器。

jj) 主控制器中依次关闭 primary source RF、primary source ACC、primary source Beam、Neutralizer RF、Neutralizer Keeper、Neutralizer collector。

kk) 关闭氩气阀门。

ll) 点击冷泵图标，点击 warm up，打开 N_2 气瓶，对冷泵进行回暖。当回暖结束后（温度达到室温 300K），关闭 N_2 气瓶。

mm) 关闭 AFL-17C 和 AFL-17M 两台控制计算机；

nn) 按下紧急开关（红色按钮），关闭主电源；

oo) 关 UPS 电源；

pp) 关闭电控柜内开关；

qq) 按面板上 COMP1 按钮关闭压缩机，再关闭冷却水循环泵，再关闭冷水机（先按 Off 按钮关水泵）打开控制箱小门，关冷水机电源；

rr) 关闭压缩空气阀门；

（5）紧急情况处理

ss) 遇到紧急情况,按下紧急开关关机；

项目 3 光学薄膜检测技术

任务 3.1 光学薄膜反射率和透过率测量

3.1.1 光谱分析测试系统原理

透射率与反射率是光学薄膜器件最基本的光学特性，因此薄膜器件透射率与反射率的测试是光学薄膜的基本测试技术。薄膜的透射率与反射率主要采用光谱测试分析仪进行测试。作为光谱仪的一种，用于光学薄膜测试的光谱仪可以按照测试波段的不同分成紫外-可见分光光度计、红外分光光度计以及红外傅立叶光谱仪等。前两者采用光谱分光原理的分析测试系统，后者则基于干涉原理的光谱分析系统。由于薄膜器件几何结构与形状的不同，虽然都是透射率与反射率的测量，但是对于不同几何形状的样品，或不同的精度，或不同的偏振要求，就可能需要不同的测试方法与技术。这些都要求我们必须对薄膜的薄膜透射反射

的基本测试方法与测试技术有一个较好的理解。

3.1.1.1 分光光度计的基本原理

单色仪型的分光光度计的主要组成部分如图 3.1.1-1 所示。光源发出要检测波段的光束，经过照明系统的光束整形后汇聚于单色仪的人射狭缝，经单色器分光后由出射狭缝出射单色

光，经过样品池后，为光电传感器接收，转化为电子信号后进入计算机处理。分光光度计的单色器可以放在样品池之前，也可以放在样品池之后。

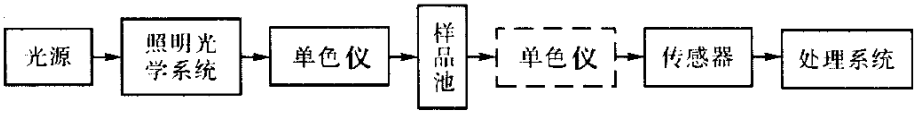


图 3.1.1-1 分光光度计基本原理图

分光光度计各部分的组成与作用分别为: 光源提供测量波段中所要求的各种波长的光束。为了得到准确的测试数据，光源的强度应保持不变，所以都使用稳压电源供电。一般情况下，在可见光波段，光源采用钨丝灯或卤钨灯，在紫外光区采用氛灯，在红外光区则采用卤钨灯和硅碳棒灯。单色仪由色散元件、狭缝机构以及色散元件的扫描驱动几个部分组成。常用的色散元件是棱镜和光栅。早期的产品多用棱镜，目前主要采用光栅作为色散元件。光栅的优点是色散大，分辨率大，并且光谱均匀排布。新型的凹面光栅还使光路系统得以简化并且能量损失减小。单色仪利用狭缝将色散元件产生的空间分

布不同波长的光分离开，狭缝具有一定的宽度，使得从单色器出来的单色光总是包含很窄波长范围的光带。狭缝的照明是否均匀对测量的准确性影响极大。随着薄膜器件性能的提高，特别是超窄带薄膜滤光片的应用日益广泛，因此分光光度系统中还往往采用双单色系统，以增加系统的波长分辨率并压制高级像差的噪声。这在目前高端分光光度仪系统中是十分常见的配置。

光电传感系统由光电探测器和处理电路组成。在紫外一可见光区域，光电接收器采用光电三极管、光电倍增管或阵列光电传感器(增强型 CCD 线阵或面阵)，在红外光区域用硫化铅光敏电阻、红外半导体传感器或热电偶等。近年来随着传感器技术的发展，分光光度仪中开始使用阵列光电传感器。在使用阵列传感器传感时，将单色仪的出射狭缝去掉，在它的位置上安装阵列传感器。

分光光度计按光路设计不同可以分为单光路分光光度计和双光路分光光度计。图 3.1.1-2 为单光路分光光度计的系统框图。在单光路系统中，样品透射率的测试需要进行两次测试，一次先测 100%透射光谱，另一次再测样品透射光谱，因此测试速度较慢，而且对光源的稳定性，以及系统的稳定性要求较高。

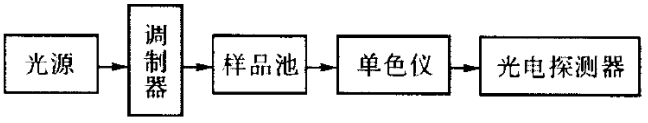


图 3.1.1-2 单光路分光光度计的基本构成

图 3.1.1-3 为双光路分光光度计的系统框图。在这种系统中，光源发出的光被分成两束，一束光束经过放置样品的样品池，另一束光束为参考光束，经过与样品池一样参考池，两束光束经过样品池之后再由光束选择调制器将两束光束分别射入光电传感器，这样光电传感器就可以交替探测到经过样品的探测光束的光强与参考光束的光强度，然后将两个光束光强信号进行相除，就可以得到样品的透射率。这样的分光系统可以降低光源稳定性对光谱测试精度的影响，同样也可以具有较快的测试速度。表 3.1.1-1 为常见双光路分光光度计的参数指标

表 3.1.1-1 目前国际上主要分光光度计的性能参数

仪器 / 性能	Lambda 900 PE 公司	Cary 5000	岛津 UV 365	Hitachi 4100
光谱范围	175 ～ 3300nm	175 ～ 3000nm	190 ～ 2500 nm	185 ～ 3300nm
光谱分辨率	0.08nm	0.1nm	0.1 nm	0.1nm
透射精度(可见区)	0.00008	0.0003	0.001	0.0003
反射测试	可以	可以		可以
偏振测试	可以	可以		可以

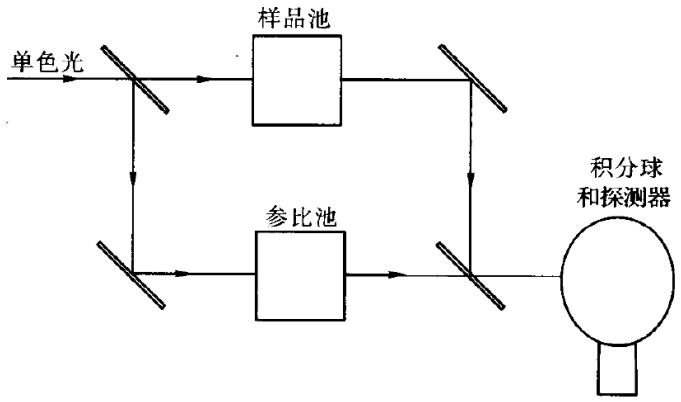


图 3.1.1-3 双光路分光光度计的光学结构原理框图

3.1.1.2 基于干涉型的光谱分析系统

红外光谱仪主要是指在光谱 2.5-25 微米区域进行光谱测试分析的仪器。在红外区域，人们往往采用波数来表示光波的波长(波数是波长的倒数，单位 cm^{-1})。色散型红外光谱仪器的主要不足是扫描速度慢，探测器灵敏度低，分辨率低。因此目前几乎所有的红外光谱仪都是傅立叶变换型的。红外傅立叶变换光谱仪(IR-FT)是基于干涉原理的光谱分析系统，主要应用于红外光谱区域，是红外波段的主要光谱分析仪器。红外傅立叶变换光谱仪的基本原理是:应用麦克尔逊干涉仪对不同波长的光信号进行频率调制，在频率域内记录干涉强度随光程差改变的完全干涉图信号，并对此干涉图进行傅立叶逆变换，得到被测光的光谱。图 3.1.1-4 为该类型仪器的工作原理示意图。

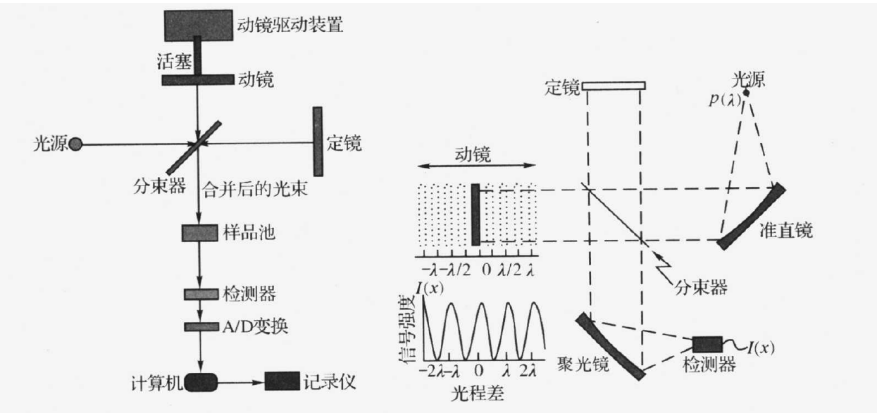


图 3.1.1-4 红外傅立叶光谱系统原理图

3.1.2 薄膜透过率测量

利用分光光度计测量薄膜元件的透射率操作十分简单，一般只要把待测元件插人样品室的测量光路中即可。在利用分光光度计进行透过率测量时，，仪器测量的是通过样品光路到达检测器的光强与通过参比光路到达检测器的光强的比值，称之为透射率

在实际测量过程中，不同的光谱仪有不同的测试步骤。一般光谱仪在开机后，都有一个初始化的过程，等到初始化完成之后，首先对光路进行校准，然后就可以进行样品测试参数的设定，放置样品，进行测试。一般而言，为了获得较高的测试精度，都要开机一段时间，等待光谱仪稳定后，再测试。

3.1.3 薄膜反射率测量

薄膜反射率的测量不如透射率那样方便和普及。反射率的测量比透射率要复杂和困难。其主要原因是:

1. 不容易找到在很宽波段范围中具有 100 环反射率性能的长期稳定的参考样品。

2. 在反射率测量中，由于反射光路的变化灵敏，有样品和无样品时，光斑在光电探测器光敏面上的位置往往会变动，这导致明显增加误差。

3. 各种薄膜元件对反射率测量的范围和精度都有不同的要求。例如减反射膜，希望测得低反射率的精度不低于 0.1%，而激光高反射镜要求在反射率高于的范围内，能够有优于 0.01%的测量精度。

下面介绍几种测量反射率时常用的方法，

相对反射率测量：相对反射率测量所用的光路示意图如图 3.1.1-5 所示

在相对反射率的测试中，关键点在于找到满足测量要求的参考样品，这种方法简单方便，适合于低反射率测量。

绝对反射率测量：绝对反射率测量一般采用 V-W 型，这种方法通过测量光的多次反射来提高测量精度，光路示意图如 3.1.1-6 所示。

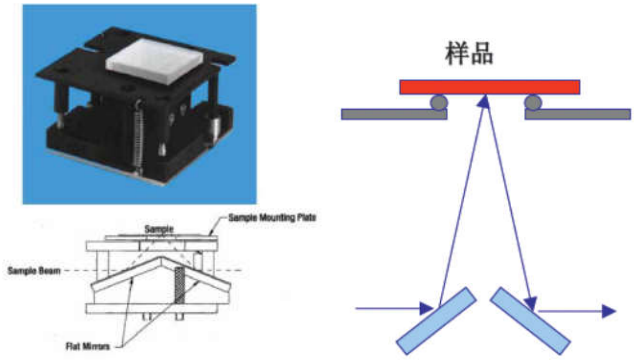


图 3.1.1-5 相对反射率测试光路示意图

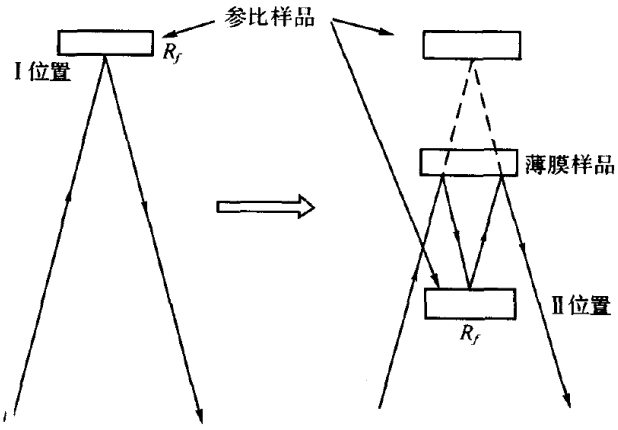


图 3.1.1-6 V-W 型测量反射率光路

利用 V-W 型光路测量薄膜反射率时需要一块反射率较高的(不必知道具体数值)参比反射镜 Rf。为了减低定位精度的要求，最好选用球面反射镜。在第一次测量中，参比反射镜 Rf，在位置 I，光线仅受到该镜的反射。如果人射

光强为 I_0 ,光电器件接收到的光强 I_1 为

$$I_1 = R_f I_0 \qquad (3.1.3\text{-}1)$$

在第二次测量中，将待测样品加入，Rf 在转至位置 II，位置 Q 时样品表面与位置 I 成

轴对称。光线在样品表面反射两次，在辅助反射镜上反射一次，然后沿与第一次相同的光路

投射到光电器件上。该时接收到的光强 I_2 为

$$I_2 = R_f R^2 I_0 \qquad (3.1.3\text{-}2)$$

其中 R 为样品的反射率。从上两式我们可以求出 R 的值

$$R = \sqrt{I_2 / I_1} \qquad (3.1.3\text{-}3)$$

从上式可知，反射率 R 与参比反射镜 R，的反射率 R 为绝对反射率。本方法适合于测量高反射膜，得到的反射率的精度可以高于光度测量的精度。由于在样品上反射两次，本方法不适合于测量低反射率，特别是减反射膜。另外，本方法要求样品有一定的面积，以保证光线可以在样品表面有两次反射。反射率 R 是这两个反射光斑处的样品反射率的几何平均值。

3.1.4 影响测量精度的因素

在利用分光光度计进行薄膜透过率和反射率的测量时，所需要注意的影响测量结果的主要因素有以下几点

1. 测量口径：测量中应保证光束全部穿过样品，不能全部贯穿则会造成测量误差。如果在实际测量中遇到样品小于光束的情况可以在光路中加入小孔径光阑来调节。

2. 测量样品厚度：许多分光光度计都把测试光束和参考光束会聚于样品室的中间。这样，当光路中插入了一块较厚的样品时，光束在接收器光敏面上的会聚状况会发生变化，引起误差，特别是基板的折射率较高或是采取倾斜入射时影响更大。克服这一误差的方法是用一块折射率和厚度与测试样品相同的空白基板作为参考样品插人参考光束，以保持两个光束的一致。对

于较厚的样品，为了获得高的光谱测试精度，最好使用带有积分球系统的光电传感单元，以克服厚样品带来的测试光斑的变化或移动。

3. 仪器光谱分辨率：分光光度计的分辨率常高于 10nm。在测定带宽小于 30 nm 的窄带滤光片或是截止特性很陡的截止滤光片时，必须充分考虑分辨率的影响。在这种情况下，由于测量光束包含的光谱区间不够窄，仪器所显示的数值实际上是待测元件在该段光谱区间内的平均透射率。

4. 空气中某些吸收成分影响： 在近红外区域，二氧化碳的吸收带常常会干扰测试结果，其特征是光谱曲线呈显示吸收光谱所特有的尖锐的透射起伏。当测试房间通风不佳时，室内二氧化碳的浓度可以随室内人员的增多而提高，从而使该项误差增大。在紫外区域，当波长小于 200nm 时，通常要充入氮气，以减小水蒸气吸收的影响。

5. 光线偏振的影响：由于光线在分光光度计中经过了多次反射，测量光束一般都带有偏振特性。高档的分光光度计为了克服偏振效应，采用了去偏或圆偏光检测的测量光束，但一些中、低档的分光光度计测量光束往往是部分偏振光。当测量斜入射下薄膜样品的透射率时，必须充分注意光线的偏振特性。

任务 3.2 光学薄膜厚度的测量

光学薄膜厚度的数值在很大程度上决定着薄膜最终的光学性质，对薄膜厚度的精确表征有助于镀膜工艺的改进。对薄膜厚度的测量可以采用多种方法，比如干涉仪、台阶仪等，下面将分别介绍。

3.2.1 干涉法测量薄膜厚度

干涉法是利用相干光干涉形成等厚干涉条纹的原理来确定薄膜厚度和折射率的。根据光干涉条纹方程，对于不透明膜，有

$$d = \left(q + \frac{c}{e} \right) \frac{\lambda}{2} \qquad (3.2.1\text{-}1)$$

对于透明薄膜，有

$$d=\left(q+\frac{c}{e}\right)\frac{\lambda}{2\left(n_{f-1}\right)} \qquad (3.2.1\text{-}2)$$

上两式中:q 为条纹错位条纹数，c 为条纹错位量。因此，若测得 q,c,e。就可求出薄膜厚度 d.

干涉法主要分双光束干涉和多光束干涉，后者又有多光束等厚干涉和等色序干涉。双光束干涉仪主要由迈克尔逊干涉仪和显微系统组成，其干涉条纹按正弦规律变化，测量精度不高，仅为十分之一到二十分之一波长，一般的干涉显微镜光路如图 3.2.1-7 所示。

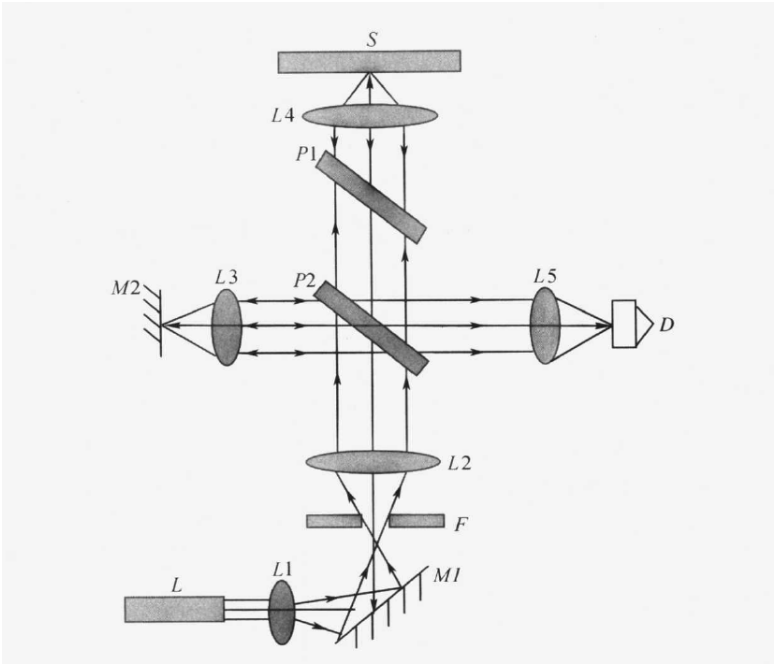


图 3.2.1-7 双光束干涉仪

干涉法不但可以测量透明薄膜、弱吸收薄膜和非透明薄膜，而且适用于双折射薄膜。一般来说，不能同时确定薄膜的厚度和折射率，只能用其他方法测得其中一个量时，可用干涉法求另一个量。另外，确定干涉条纹的错位条纹数 q 比较困难，对低反射率的薄膜所形成的干涉条，对比度低，会带来测量误差，而且薄膜要有台阶，测量过程调节复杂，容易磨损薄膜表面等，

这些都对测量带来不便。

3.2.2 轮廓法测量薄膜厚度

轮廓法就是应用一个微小的机械探针接触待测薄膜表面测试薄膜厚度的方法，又称为探针扫描法(Stylus Profilemetry)。由于探针很细小，仅为几个微米，因此探针在薄膜表面扫描移动时可以随着表面凹凸而上下移动。为此在薄膜样品制样的时候就必须制备出薄膜厚度的台阶以便测试用。如果没有膜层的台阶，用轮廓仪法是很难测出薄膜的厚度，因为没有比较物的高度，这样就需要人为制造一个台阶。

利用这种方法对薄膜厚度进行测试时需要探针与薄膜直接接触并有一定的压力，因此这种方法对有一定硬度的薄膜有比较好的效果（比如 SiO2,TiN 等），对于柔软薄膜需要采用较轻质量较大直径的触诊，才能不使薄膜划伤和避免因膜材粘附在触针针尖上而引起误差。

3.2.3 其他测量方法

利用椭偏仪也可以进行薄膜厚度的测量，椭偏仪的原理和使用将在 3.4.2 进行介绍。

任务 3.3 光学薄膜激光损伤阈值测量

3.3.1 光学薄膜损伤测量标准及判定

广义上讲，光学薄膜的激光损伤可定义为元件“由于激光的作用而使薄膜的性能或者结构发生了可观察的变化”。由此，光学薄膜的损伤可分为可逆性损伤与非可逆性损伤两类。非可逆性损伤指由于激光作用，元件局部或整体的结构/物性发生了可观察的变化，损伤通常是灾难性的，不可逆的。可逆性损伤指元件发生功能的变化，它通常是瞬态的、可逆的，能够用光学或其它方法观察到的微观瞬态过程。它可严重影响激光输出及传输特性，可诱发非可逆性损伤的产生。在本论文的讨论中，除非特殊声明，所讨论的光学薄膜的损伤一般指非可逆损伤。

损伤判断是与检测手段直接相关联的。按照 NASA 和 ISO11254-1,2 所推荐

的，损伤的判断应用 Nomarski 干涉偏光显微镜观察，并且放大倍数至少达到 100 倍以上。在上述条件下观察到的样品表面发生的永久性变化均界定为损伤，一般以层裂、熔融、形变和色斑等形式表现。

损伤阈值是指光学元件发生临界损伤时的激光能量密度，鉴于光学元件本身的不均匀性和激光输出特性的起伏等原因，损伤是有一定概率的。损伤阈值的定义通常有两种：50%几率破坏阈值和 0 几率破坏阈值。两种取值方法各有其特点，视需要而选择。对于用户而言，通过 0%损伤阈值可以确定激光的安全工作限；而对于薄膜制备人员来说，50%损伤阈值可以反映出该薄膜样品中的杂质、缺陷情况，以及可能获得的最佳的薄膜主体的抗激光强度。

3.3.2 几类激光损伤阈值测量方法介绍

激光损伤分脉冲激光损伤阈值和连续激光损伤。在脉冲激光损伤中，根据激光辐照方式的不同，光学薄膜激光损伤阈值的测试方法主要有以下四种：

1-on-1：又称为单脉冲损伤，体现的薄膜样品的初始状态，这是薄膜制备者比较关心的问题。在 1-on-1 测试中，每个样品点只接受一个激光脉冲辐照，不管出现损伤与否，样品移至一个未辐照点。

S-on-1：又称为多脉冲损伤，表现的是薄膜样品在重复率激光作用下的累积损伤效果，这是薄膜使用方比较关心的问题。在 s-on-1 测试中，同样能量的多个脉冲在较短时间内作用于同一区域，脉冲个数以及激光重复频率应根据具体情况约定。

R-on-1：对每个位置进行能量密度以斜坡式渐增的多次辐照。

N-on-1：每个位置多次辐照，每次辐照之间的能量密度增量比 r-on-1 大，其它方面相同。

对于这四种方法，阈值本身的概念及确定方法都基本相同，唯一不同的只是激光辐照的方式不同而已。

3.3.3 激光损伤测试装置

损伤测试实验标准装置如图 3-8 所示，采用的确定波长、脉宽、偏振态及 TEM00 工作模式的高能量脉冲激光器作测试激光器，激光器被放置在固定光学平台上，光束垂直入射到薄膜样品，通过衰减器调节损伤激光辐照到样品的能量大小。另一台 He-Ne 激光用来作为光路准直之用。

在测试光路上，采用分束镜分出一束光束使之进入光束探测装置，以实现观测损伤激光器的输出能量、波形、脉宽、偏振态等参数。另外，还需要配备光学检测系统对激光辐照前后的样品表面进行观察以判断损伤与否。

在损伤测试中，光学薄膜样品被放置在垂直于入射光束的 x-y 精密调整架上，以实现被测薄膜样品不同辐照点之间获得统一的间隔距离。为了防止激光被样品反射再次进入激光源，应该保留 1°~2° 的离轴误差。

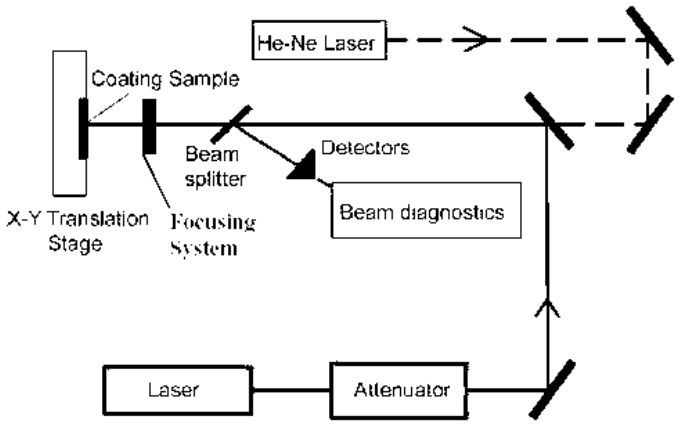


图 3.3.3-1 光学薄膜损伤标准测试装置示意图

3.3.41-on-1 损伤测试标准过程

测试前的准备工作：

需要根据样品的正常使用条件确定测试参数，如波长、入射角、偏振方向，如果给定了这些参数的范围，那么可以在确定范围内任意组合这些参数。

样品的储存、清洗等需要根据样品提供者给定的使用说明，如果没有相应的说明，则应该下述方法处理：测试前样品需要在相对湿度小于 50%的环境下存放 24 小时，并要根据 ISO/DIS 10110-7 的要求利用 Nomarski 显微镜对样品表面质量和清洁程度进行观察，如果表面有污染物则需要进行清洁工

作，清洁方法需要在测试报告中注明。当污染物不能被清除时，则需要在测试前用光学或电子学方法对其进行记录。测试环境应该经过空气过滤，相对湿度小于 50%，并需将实际情况记录在测试报告中。

阈值测试过程：

在测试之初，首先要粗测出损伤阈值的大概范围，这时每次辐照的激光能量由大到小分成若干台阶，直到阈值附近（即不出现损伤为止），每个台阶能量密度大约降低 2-5J/cm^2。

在确定的阈值的大概范围后，就要较为精细的测出阈值的确切值。此时在粗测阈值的附近更细地分出 4-5 个台阶（在我们的实际测试中，为了增大数据的可信度，我们常常取 10 个台阶），每个台阶辐照 5 到 10 个点，各台阶的能量密度增幅为 0.25J/cm^2，重复测试直到测试数据中包含：连续两个台阶能量密度辐照不引起样品损伤（即零破坏几率），以及至少一个能量密度台阶上损伤几率在 60%以上终止。

测试时每个辐照点之间的间隔至少是 3 倍于激光的光束直径，以保证任何辐照点的损伤状况不受相邻辐照点影响，辐照各点的阵列排列以及能量密度分级排列如图 所示。

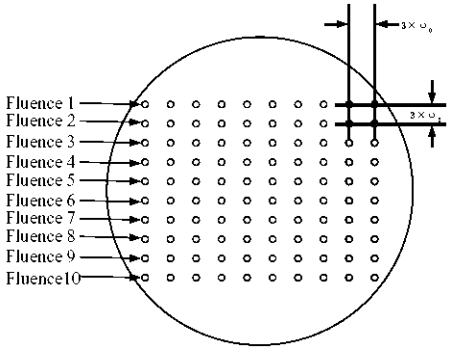


图 3.3.4-1 损伤阈值测试能量台阶及测试点分布示意图

损伤的判别

光学薄膜的损伤的判别应通过具有 Nomarski 干涉偏光效果的显微镜观

察，并且放大倍数至少达到 100 倍以上。在上述条件下观察到的样品表面发生的永久性变化均界定为损伤，一般以层裂、熔融、形变和色斑等形式表现。

阈值的确定

阈值的确定是通过损伤几率的方法得出的。计算出每一个能量密度台阶辐照的 10 点中的损伤几率，然后以能量密度为横坐标，损伤几率为纵坐标，做出能量密度与损伤几率图，再对图中 0%~60%损伤几率的数据做线性拟合，拟合线与横坐标交点处的能量密度即为 0%损伤几率。

任务 3.4 光学薄膜其他参数测量

3.4.1 薄膜的吸收和散射测量

吸收和损耗是薄膜的主要两种损耗机制，对于薄膜器件而言，有:R+T+L=0，其中，L 为损耗，L = S+A 是吸收与散射损耗的总和，因此对于损耗较大的薄膜器件，我们可以通过测试样品的反射率与透射率的方法，间接地测试出薄膜的损耗。但对于微弱损耗的薄膜（薄膜的损耗$<10^{-3}$）而言，就必须考虑更为灵敏的方法来分别研究测试薄膜器件的吸收与散射损耗。

当薄膜用于高能激光系统时，微量的吸收就会导致薄膜的破坏。薄膜吸收光能后，温度会升高，因此测量热效应是研究薄膜吸收的基本方法。薄膜的散射损耗是光学薄膜另外一种主要的光学损耗。散射损耗可以大致分为界面的粗糙度所致与薄膜体内的折射率颗粒状不均匀性所致。散射损耗的后果是反射与透射能量减低，同时带来杂散光，影响整个光学系统的性能。下面介绍几种检测薄膜弱损耗的主要方法

3.4.1.1 激光量热计测量薄膜弱吸收

激光量热法的原理是让一束激光照射到薄膜样品上，通过热电偶热敏电阻及高灵敏热释电检测器直接测量样品的温升，进而推算样品吸收的数值。

对于常见的透明薄膜，其吸收率很小，所以样品受到瓦级激光的光照后，温度的升高不超过 1 摄氏度。在这种情况下，为了提高测量灵敏度，必须尽量减少各种形式的热损失。根据

对热损失处理的不同方案，激光量热计可以分为速率型量热计和绝热型量热计两种类型。

速率型量热计：其装置原理框图如图 3-10 所示。在测量中选用一定厚度的样品，其温度变化曲线可以分三部分：a 段，样品受到光照后，吸热大于损耗，温度不断上升。b 段，假定环境温度严格保持不变，样品温度越高，散热越快，当样品吸收的热量等于发散到环境的热量时，样品的温度达到动态平衡状态。这时有

$$\alpha LP = hT_0 \qquad (3.4.1\text{-}1)$$

其中 α 为吸收系数，L 为样品厚度，P 为入射功率，T_0 是样品的温度升高，h 为比例系数，与散热快慢有关。为了求出系数 h，进一步考察图 3.4.1-10 的 c 段，在这段时间里激光光闭，样品的温度 T 按牛顿自然冷却定律下降

$$-\frac{dQ}{dt} = hT, dQ = cmdT \qquad (3.4.1\text{-}2)$$

其中 Q 是样品的热量，c 为比热，m 是质量，t 为时间。

从上式可以得出

$$-\frac{dT}{T} = \frac{h}{cm}dt, T = T_0 e^{-\frac{h}{cm}t} \qquad (3.4.1\text{-}3)$$

此公式可测出该温度下降过程的时间常数 e，即温度下降到原来温度 T_0 的 0.368 所经历的时间，由于

$$\iota = \frac{cm}{h} \qquad (3.4.1\text{-}4)$$

进而可以得到，

$$\alpha = \frac{cmT_0}{LPt} \tag{3.4.1-5}$$

对于速率型量热计，其温升值是在吸收等于损耗的动态平衡状态下测得的。热损耗越小，温度升高越大，可以测量的吸收值越小，灵敏度就越高动。环境温度的波动越小，下降曲线就越精确，误差就越小主要的误差因素是环境温度的波因此实验装置的热损耗应尽量减小，而样品外面的绝热套应该具有很高的温度稳定性(小于 0.01 摄氏度)。

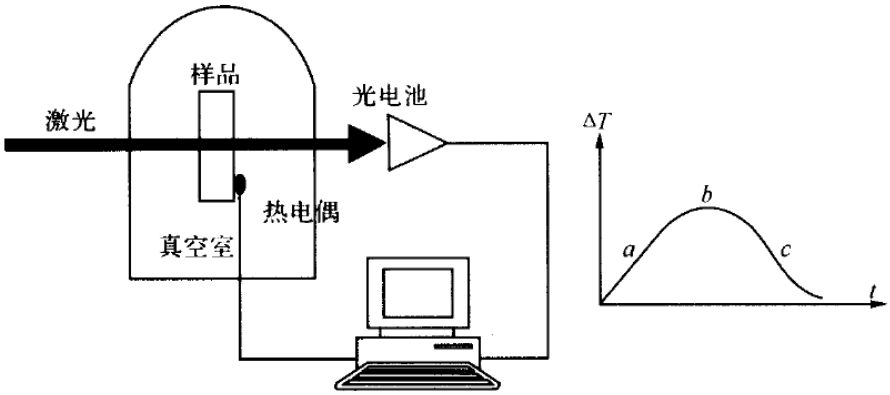


图 3.4.1-1 速率型量热计原理框图

绝热型量热计：绝热型量热计的原理很简单，假定实验装置的热损耗可以忽略不计。当激光照射样品一段时间后，样品吸收的热量全部用于升高温度，显然，温升△T 与吸收率 A，入射功率 P 之间有以下关系

$$PAt = cm\Delta t \tag{3.4.1-6}$$

其中 t 为加热时间，c,m 是样品的比热和质量，从上式可以得到

$$A = cm\,\Delta t / Pt \tag{3.4.1-7}$$

3.4.1.2 光声光热偏转法测量薄膜吸收

光声光谱法

光声法检测薄膜吸收的原理为:光源发出的光束经调制后入射到密闭池中的样品上，薄膜样品吸收的辐射能将以热能的形式释放出来，其中一部分传递给池中气体而转化为气体的热膨胀，另一部分则直接转化为膜层内部的热膨胀，两者最终都导致了密闭池内气压的增加。由于光强是周期性调制的，

因此密闭池中的气压也以同样的频率变化，由此就形成声压信号。用微音器检测出这个信号，并通过检测系统加以放大和滤波，就得到与膜层吸收成正比的光声信号。

若入射单色光波长可变，则可测到随波长而变的光声信号图谱，这就是光声光谱。若入射光是聚焦而成的细束光并按样品的 x-y 轴扫描方式移动，则能记录到光声信号随样品位置的变化，这就是光声成像技术。

在图 3.4.1-2 中，光源采用 40mW 的 He-Ne 激光，调制频率为 120Hz，锁相放大器可以探测到 nV 级的极小信号。从测量薄膜吸收的角度出发，我们可以认为接收器得到的光信号 V_S 正比于薄膜的吸收,即

$$V_S = I_0 AK * PAS \qquad (3.4.1\text{-}8)$$

其中 I。是入射光强，K 是与仪器有关的常数，而 PAS 是光声压力振幅系数。光声光谱信号与样品的光学性质(如吸收系数)和热学性质(如比热)以及密度等多种因素有关。因此光声方法易于进行相对测量，进行绝对测量时必须先定标。

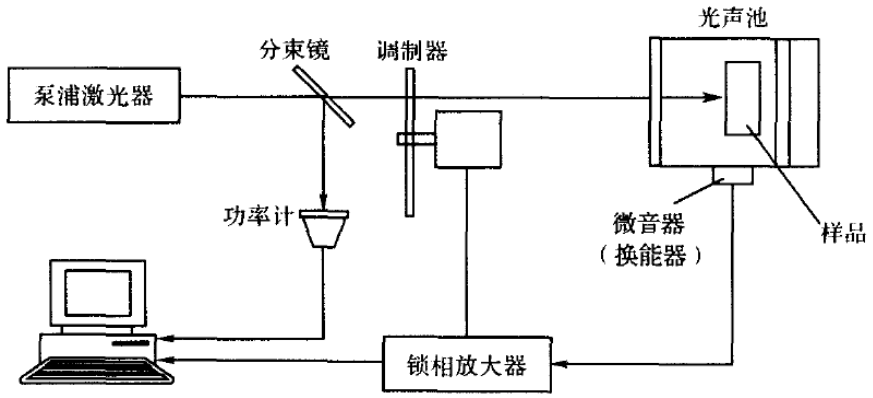


图 3.4.1-2 光声光谱法测试薄膜的吸收光热偏转光谱法

光热偏转法的原理为：当样品吸收激励光后温度会升高，因热传导而在样品以及周围介质中形成温度场。折射率是温度的函数，由此就产生了折射率梯度场。当另一束探测光束穿过该区域时，光线因受到折射率梯度场的影响而发生偏转，该偏转可以用位置传感器探测出来。从偏转值中即可以推算样品的吸收系数。

另外，光热偏转法可以进一步拓广用于测试或评估薄膜的吸收损耗与基

板的吸收损耗。其基本原理为:薄膜的吸收大小与入射的光束单位体积的能量有关。我们可以调节泵浦激光聚焦位置来选定吸收的主要探测位置。因此在测试系统中，假设固定探测激光与泵浦激光的空间位置，而将样品沿泵浦激光光束方向扫描移动，我们探测的光热信号就是随泵浦光聚焦点位置的变化吸收，这样就可以对薄膜样品沿厚度方向的吸收变化做一个全面的分析。

3.4.2.薄膜材料折射率测量

薄膜材料的折射率有两部分参数组成，即折射率实部 n 和消光系数 k，薄膜材料的折射率在很大程度上决定了薄膜的透过率，反射率，吸收等光学特性，其数值的测试是一个十分重要的内容。常用的测试薄膜材料的折射率的方法是光度法、椭偏仪测量法、布儒斯特角和棱镜耦合法等，本章节重点介绍椭偏仪测试法，这是对薄膜折射率测试比较精确而且认可度较高的一种方法。

椭偏法测量的基本思路是:起偏器产生的线偏振光经取向一定的四分之一波片后成为特殊的椭圆偏振光，把它投射到待测样品表面时，只要起偏器取适当的透光方向，被待测样品表面反射出来的将是线偏振光．根据偏振光在反射前后的偏振状态变化，包括振幅和相位的变化，便可以确定样品表面的许多光学特性。

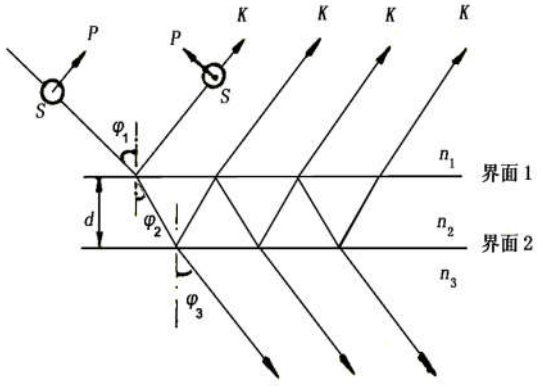


图 3.4.2-1 薄膜光学特性

图 3.4.2-1 所示为一光学均匀和各向同性的单层介质膜．它有两个平行的界面，通常，上部是折射率为 n1 的空气(或真空)．中间是一层厚度为 d

折射率为 n2 的介质薄膜，下层是折射率为 n3 的衬底，介质薄膜均匀地附在衬底上，当一束光射到膜面上时，在界面 1 和界面 2 上形成多次反射和折射，并且各反射光和折射光分别产生多光束干涉。其干涉结果反映了膜的光学特性。

设 φ1 表示光的入射角，φ2 和 φ3 分别为在界面 1 和 2 上的折射角。根据折射定律有

$$n_1 \sin\phi_1 = n_2 \sin\phi_2 = n_3 \sin\phi_3 \qquad (3.4.2\text{-}1)$$

光波的电矢量可以分解成在入射面内振动的 P 分量和垂直于入射面振动的 s 分量. 若用 Eip 和 Eis 分别代表入射光的 p 和 s 分量，用 Erp 及 Ers 分别代表各束反射光 K0，K1，K2，…中电矢量的 p 分量之和及 s 分量之和，则膜对两个分量的总反射系数 Rp 和 Rs 定义为

$$E_{rp} = \frac{r_{1p} + r_{2p} e^{-i2\delta}}{1 + r_{1p} r_{2p} e^{-i2\delta}} E_{ip} \qquad E_{rs} = \frac{r_{1s} + r_{2s} e^{-i2\delta}}{1 + r_{1s} r_{2s} e^{-i2\delta}} E_{is}$$

$$R_P = E_{rp}/E_{ip} \quad , \quad R_s = E_{rs}/E_{is} \qquad (3.4.2\text{-}2)$$

经计算可得

式中，r1p 或 r1s 和 r2p 或 r2s 分别为 p 或 s 分量在界面 1 和界面 2 上一次反射的反射系数. 2δ 为任意相邻两束反射光之间的位相差. 根据电磁场的麦克斯韦方程和边界条件，可以证明

r_{1p}=tan(φ1−φ2)/ tan(φ1+φ2)，r_{1s}=−sin (φ1−φ2)/ sin(φ1+φ2)；

r_{2p}=tan(φ 2−φ3)/tan(φ 2+φ3),r_{2s} =−sin (φ 2−φ3)/ sin(φ 2+φ3). (3.4.2-3)

由相邻两反射光束间的程差，不难算出

$$2\delta = \frac{4\pi d}{\lambda} n_2 \cos\varphi_2 = \frac{4\pi d}{\lambda} \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2\varphi_1} \qquad (3.4.2\text{-}4)$$

式中，λ 为真空中的波长，d 和 n_2 为介质膜的厚度和折射率.

在椭圆偏振法测量中，为了简便，通常引入另外两个物理量 ψ 和 Δ 来描述反射光偏振态的变化. 它们与总反射系数的关系定义为

$$\tan\psi . e^{i\Delta} = R_p/R_s = \frac{(r_{1p} + r_{2p}\, e^{-i2\delta})(1 + r_{1s} r_{2s}\, e^{-i2\delta})}{(1 + r_{1p} r_{2p}\, e^{-i2\delta})(r_{1s} + r_{2s}\, e^{-i2\delta})}$$

（3.4.2-5）

上式简称为椭偏方程，其中的 ψ和 Δ 称为椭偏参数（由于具有角度量纲也称椭偏角）. 上述公式可以看出，参数 ψ和 Δ 是 n_1，n_2，n_3，λ和 d的函数. 其中 n_1，n_2，λ和Φ_1可以是已知量，如果能从实验中测出 ψ和 Δ 的值，原则上就可以算出薄膜的折射率 n_2和厚度 d. 这就是椭圆偏振法测量的基本原理。

在参数 ψ和 Δ 实际测量中所用到的光路图如 3-13 所示，其中 S 为薄膜样品，L 为光源，D 为探测器，P 为起偏器，Q 为四分之一波片，A 为探测器。在完成对参数 ψ和 Δ 的测量后，采用计算机软件对其数据进行建模拟合，以得到折射率数据

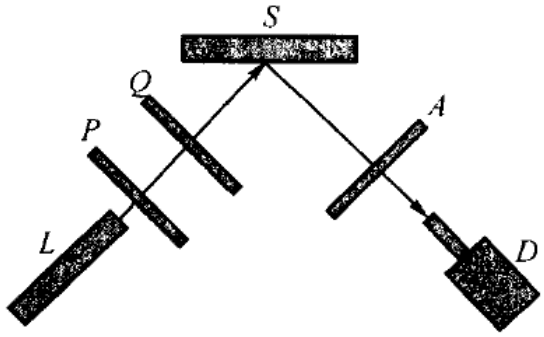


图 3.4.2-2 椭偏仪光路示意图

椭偏法具有很高的测量灵敏度和精度 ψ和 Δ 的重复性精度已分别达到 0.01°和 0.02°，人射角可在 30°-90°内连续调节，以适应不同样品;测量时间达到 ms 量级，已用于薄膜生长过程的厚度和折射率监控。但是，由于影响测量准确度因素很多，如人射角、系统的调整状态、光学元件质量、环境噪声、样品表面状态、实际待测薄膜与数学模型的差异等，都会影响测量的准确度。特别是当薄膜折射率与基底折射率相接近(如玻璃基底，SiO_2 表面薄膜)，薄膜厚度较小和薄膜厚度及折射率范围位于(n,d)-(ψ, Δ)函数斜率较大区域时，用椭偏仪同时测得薄膜的厚度和折射率与实际情况有较大的偏差。因此，即使对于同一种样品，不同厚度和不同折射率范围、不同的人射角和波长都存在不同的测量精确度。

实训 3.4 椭偏光法测量薄膜的厚度和折射率

一、实训目的：

1、了解椭偏光法测量原理和实验方法。

2、熟悉椭偏仪器的结构和调试方法。

3、测量介质薄膜样品的厚度和折射率。

二、测量原理：

采用椭圆偏振法原理进行测量，通过测量椭偏参数 ψ 和 Δ，计算得到薄膜的折射率和厚度。椭偏法测量 Δ 和 Ψ 的实验光路如图 1 所示。平面偏振光通过四分之一波片，使得具有 ± π /4 相位差。使入射光的振动平面和四分之一波片的主截面成 45° 。

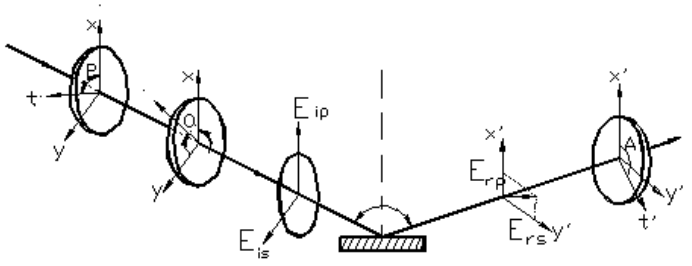
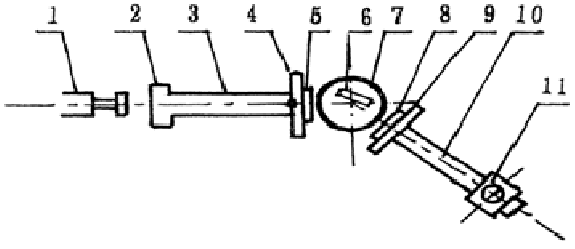


图 1 椭偏法测量光路

三、实训设备：

实训设备使用多功能激光椭圆偏振仪，由分光计和激光椭圆偏振装置两部分组成，仪器安装调试后如图 2 所示，其各部件功能如下：



1. He-Ne 激光管　2. 小孔光闸　3. 平行光管　4. 起偏器　5. 1/4 波片

6. 被测样品　7. 载物台　8. 光孔盘　9. 检偏器　10. 塑远镜筒　11. 白屏镜

图 2 激光椭圆偏振仪结构

其各部件功能如下：

光源：包括激光管和激光电源。激光管装在激光器座上，可以作水平、高低方位角调节和上下升降调节，发射 632.8nm 的单色光

小孔光闸：保证激光器发出的激光束垂直照射在起偏器中心。

起偏器：产生线偏振光，读数头度盘刻有 360 个等分线，格值为 1°，游标度数为 0.1°，随度盘同步转动，其转角可在度盘上读出。

1/4 波片：将线偏振光补偿为等幅椭圆偏振光，装在起偏器前端，与起偏器共用游标。其读数为读数头度盘内圈刻度值。

载物台：支承被测样品，其使用调节方法见分光计说明书。

光孔盘：为防止杂散光进入检偏器而附设，可自由转动，并具有读数标尺，但它的方向对实验并无影响。

检偏器：与起偏器结构相同。

望远镜筒与白屏目镜：观察反射光状态。

四、实训内容：

1、按调分光计的方法调整好主机。

2、水平度盘的调整。

3、光路调整。

4、检偏器读数头位置的调整和固定。

5、起偏器读数头位置的调整与固定。

6、$1/4$ 波片零位的调整。

7、将样品放在载物台中央,旋转载物台使达到预定的入射角 70°即望远镜转过 40°,使反射光在白屏上形成一亮点。

8、分别用快速法，建表法，作图法测量硅衬底的薄膜折射率, 薄膜基厚度和厚度周期。

9、改变入射角，在入射角为 60°，50°时再测两次。

五、实验数据处理：

1、入射角为 50 度时：

	快速法	绘图法	建表法
折射率			
厚度/nm			

2、入射角为 60 度时：

	快速法	绘图法	建表法
折射率			
厚度/nm			

3、入射角为 70 度时：

	快速法	绘图法	建表法
折射率			
厚度/nm			

求平均值：

六、注意事项：

1、光路调节要轻缓细心。要注意避免激光损伤眼睛。

2、样品表面要避免玷污。

3.4.3 薄膜散射测量

薄膜元件中的散射损耗一般是很小的(<1%)。但是在一些膜系中，散射损耗的大小对薄膜的质量起举足轻重的作用。例如在 He-Ne 激光器高反射镜中，总的损耗为 0.7%~0.3%，其中吸收损耗约为 0.02%~0.05%，而散射损耗约为 0.25%。可见要提高激光高反射镜的反射率，就必须降低薄膜的散射损耗。另外，在大功率激光系统中，光线经历了一系列的放大，如果光学元件有少量背散射光产生，就会破坏光泵的功能而引起危险。

光学薄膜的散射可以分为体内散射和界面散射(或表面散射)。

体内散射起因于薄膜内部折射率的不均匀性。由于蒸发薄膜都具有柱状结构，其孔隙和柱体的折射率差异很大，因而产生散射。体内散射对入射光线的影响与体内吸收相仿，它使薄膜中的光强度随着薄膜厚度的增加而按指数规律衰减。它们两者对于透射光或反射光的影响难以区别。故我们在用光度法或椭偏法推算得到的薄膜消光系数，实际上包含了吸收和散射两项损

耗，其值应大于用激光量热计测量得到的消光系数，因为后者仅反映了吸收的大小。

引起光学薄膜表面散射的有两类主要表面缺陷。一类是表面的气泡、裂缝、划痕、针孔、麻点、微尘和蒸发时喷溅的微小粒子。它们的线度一般均远大于可见光波长。原则上说，这种相对比较大的缺陷引起的散射，可以用 Mie 理论来处理。Mie 理论可以计算分立的、非相关粒子的散射。它假定粒子具有简单的几何形状，诸如球形或椭球形。这些粒子具有有限的尺寸和一定的介电常数。但是在实际计算中，由于散射粒子的形状、分布和介电常数无法知道，故难以得到定量的结果。由于这些粒子或缺陷的线度比较大，故它们的散射在紫外和可见区
影响不大，而对红外波段影响较大。

另一类缺陷就是薄膜表面的微观粗糙度。由表面粗糙度引起的表面不平整的线度远小于一个波长，并服从统计规律。对于高精度光学表面上制备的光学薄膜器件，除了一些喷点引起的薄膜散射，一般薄膜的散射均属于表面或多层膜界面的微粗糙现象造成的。目前处理这些微粗糙度引起的光散射的理论主要有标量理论和矢量理论两种。

在标量理论中，主要研究薄膜在 4π 立体角之内的散射光总和—总积分散射(TIS)，与薄膜表面微观量——均方根粗糙度 σ 之间的关系。标量理论产生于 20 世纪 60 年代，理论值与实验结果得到较好的符合。但是由于忽略了散射光线的方向和偏振等因素，只考察总积分散射这一项物理量，就不易从 TIS 中得到较多的关于表面微观物理量的信息。

测量基板或薄膜表面方根粗糙度的主要方法是利用轮廓仪测量，其能达到的最高分辨率为 1nm。一般光学车间中大批量加工的玻璃基板的均方根粗糙度为 2~10nm，而实验室里经仔细加工的表面，其 σ 值可以小至 0. 5~1nm。测量总积分散射的基本方法是采用积分球进行相对测量。其装置的示意图如图 3.4.1-1 所示。样品一般置于积分球中心，He-Ne 激光从直径很小的入射光孔进入积分球，照射在样品上，样品的反射光从反射光孔中穿出，被角状衰

减器吸收。透射光也从透射光孔中射出，也被角状衰减器吸收。积分球的一侧装有光电倍增管，光电信号经过放大器放大后用数字电压表读数。为了调节光强大小，光路中有可插入和退出的衰减片。测量时先用散射率为 η 的标准散射板予以校正。由于该时光强较大，故宜插人衰减片。设该时电压表的读数为 I_0。然后退出衰减片，再对样品进行测量，设再得到的电压表读数为 I_A，那么样品的散射率 S_R 为

$$S_R = \frac{\eta I_A}{K I_0} \qquad (3.4.3\text{-}1)$$

其中 K 是衰减片的衰减系数。

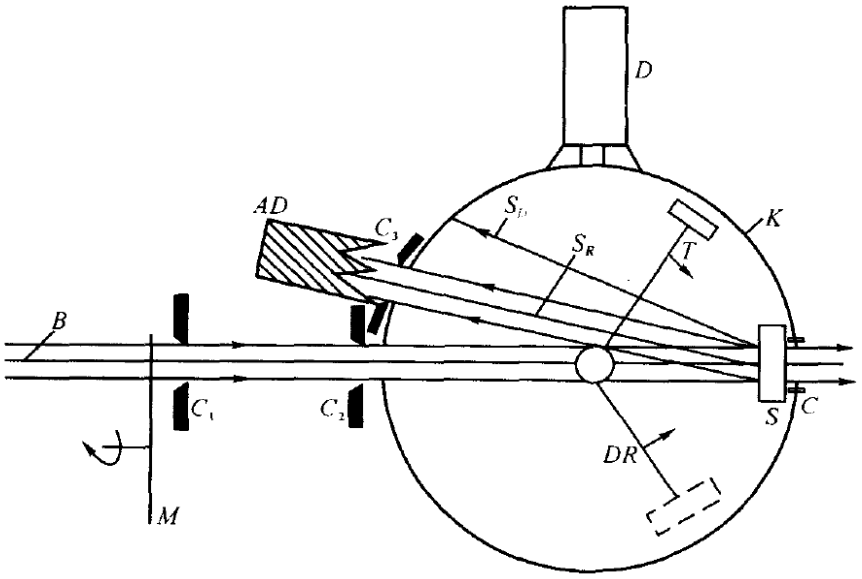


图 3.4.3-1 积分散射的测试系统

B—激光束；M—光调制器；C_1，C_2，C_3—狭缝；S—待测样品；K—积分球；AD—黑体；D—光电倍增管；T—标准片；D_R—转臂；S_D—散射光；S_R—镜向反射光

矢量理论则是 20 世纪 70 年代提出的新理论。它弥补了标量理论的不足，在分析计算中考虑了散射光的方位和偏振特性。利用矢量理论能计算出薄膜表面散射光在空间各方向的强度分布图。因此矢量散射理论是与角度微分散射测试系统相联系的，它能够较好地体现表面各种空间频率的微粗糙度的大

小与状态，能够体现出更多的表面结构特征。

虽然散射角分布的理论十分复杂，但是测量散射角分布的装置原理却直观而简单，然而要能检测出极小的散射量，则必须精心设计和制作。在这类测量装置中，通常以样品为中心，光电探测器可以围绕样品在人射平面内作接 180°或 360°的转动。性能较好的仪器还可以在以样品为中心的整个球面上转动，以测得非人射平面内的散射光。样品一般能转动和平动，以测量斜入射下的散射特性和扫描样品上各点的散射系数。在测量中，因散射信号很小，通常采用锁相放大器。此外，由于测量数据很多，所以常常采用计算机进行自动采样和分析

数据。图 3.4.1-2 即是一种测量散射角分布的仪器。

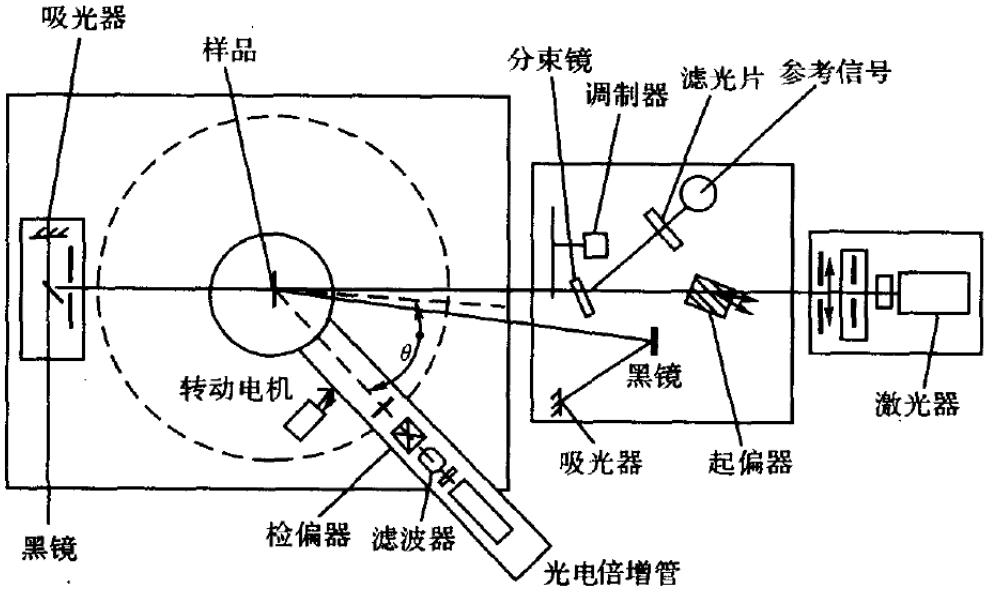


图 3.4.3-2 散射光角分布测试系统

3.4.4 薄膜折射率测量

最常用的薄膜折射率 测量方法为阿贝法 (又称布儒斯特角法)，是基于光波在界面上的布儒斯特效应而建立的薄膜光学常数测试方法。其基本原理为，当一束平行光以某一角度人射时，空白基板表面与镀模表面 p 偏振光的

反射率是相同的。这个特殊的人射角叫做膜层.的布儒斯特角(θ_{iB})。当 P 偏振光以 θ_{iB} 从 n_0 媒介入射到 n_1 媒介时(折射角为 θ_1)，空气/膜层界面消失，振幅反射系数为零，即

$$r_p = \left(\frac{n_0}{\cos\theta_{iB}} - \frac{n_1}{\cos\theta_1} \right) \Bigg/ \left(\frac{n_0}{\cos\theta_{iB}} + \frac{n_1}{\cos\theta_1} \right) = 0 \qquad (3.4.4\text{-}1)$$

于是

$$\frac{n_0}{\cos\theta_{iB}} - \frac{n_1}{\cos\theta_1} = 0 \qquad (3.4.4\text{-}2)$$

由斯涅耳定律得

$$n_0 \cos\theta_{iB} = n_1 \cos\theta_1 \qquad (3.4.4\text{-}3)$$

由(3.4.4-2)和(3.4.4-3)式，当 n_0=1 时有

$$n_1 = \tan\theta_{iB} \qquad (3.4.4\text{-}4)$$

这时：膜层与基板界面的 p 偏振光的反射为：

$$r_{2p} = \frac{\tan\left(\theta_{1B} - \theta_1\right)}{\tan\left(\theta_{1B} + \theta_1\right)} = \frac{\tan\left(90^\circ - \theta_{iB} - \theta_1\right)}{\tan\left(90^\circ - \theta_{iB} + \theta_1\right)} = \frac{\tan\left(\theta_{iB} - \theta_1\right)}{\tan\left(\theta_{iB} + \theta_1\right)} \qquad (3.4.4\text{-}5)$$

完全等于空气/基板界面的反射率，因此膜区与无膜区的反射率相等。

这就是阿贝法测量折射率的依据。因此只要测试出当 p 偏振光在薄膜表面的反射率消失时的角度，就可以计算出薄膜的折射率。

基于阿贝法的检测系统基本上有以下结构组成：

如图 3.4.4-1 所示，光束经分束板分成两束光，经过偏振片，起偏为 p 偏振光，分别照射在薄膜与基板表面上，反射的光束经反射镜反射进人积分球，并由光电倍增管接收。光束调制器使得照到薄膜样品与基板的光束分别为光电探测器所探测，这样转动转台，就可以改变光束的入射角。由于反射镜与样品之间构成二面角，可以减小由于转动转台造成积分球位置的转动，仅有少量的移动就可以测得光束的反射率。当光电探测器的输出为一个方波信号时，说明入射角尚未等于布儒斯特角，但薄膜与基板两者反射率相等时，

即光电探测器的输出为一直流分量时，对应的角度就为薄膜的布儒斯特角。

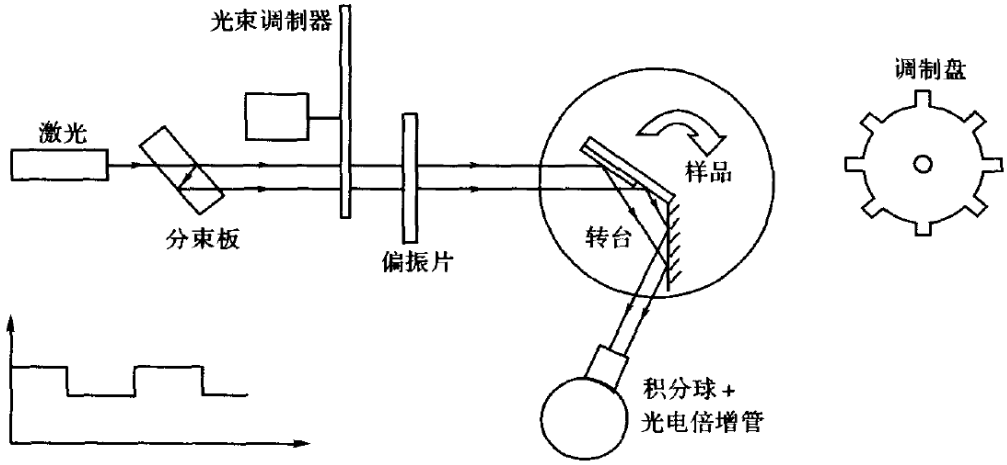
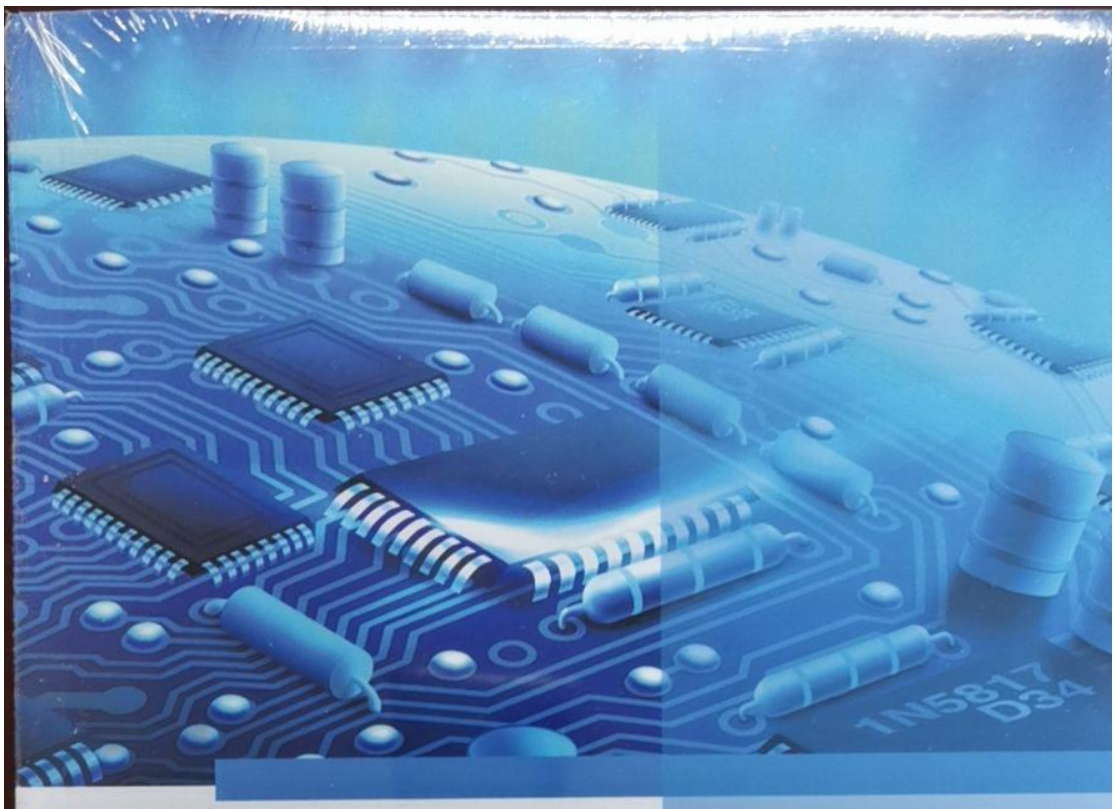


图 3.4.4-1 阿贝法测试原理图

参考文献

1. 唐晋发 顾培夫 刘旭 李海峰. 现代光学薄膜技术。杭州：浙江大学出版社，2006
2. 高本辉 崔素言 真空物理。北京：科学出版社，1983.
3. 唐晋发，顾培夫. 薄膜光学与技术. 北京：机械工业出版社，1989.
4. 金原粲著，杨希光译. 薄膜的基础技术. 北京：科学出版社，1982.
5. E. D. Palik. Handbook of Optical Constants of Solids. Academic Press，Inc.，1985.
6. H. A. Macleod. Thin-Film Optical Filters. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2001.
7. D. Smith. Thin-Film Deposition. MaGraw-Hill, Inc., 1995
8. J. E. Mahan. Physical Vapor Deposition of Thin Film. John Wiley and Sons Inc., 2000.
9. G. Exarhos. Prepararion of Thin Films. Marcel Dekker, Inc., 1992.
   Arnon and P. W. Baumeister. Versatile high-precision multiple-pass reflectometer(E). Appl. Opt., 1978, (17): 2913~2915.
10. V. Sanders, High-precision reflectivity measurement technique for low-loss laser mirrors. Applied Optics, 1977, (16): 19~20
11. Pinnow D. A. and Rich T.C. Development of a calorimetric method for making precision optical absorption measurement. Appl. Opt., 1973, (12): 984~985.
12. Atkinson R.. Development of a wavelength scanning laser calorimeter. Appl. Opt., 1985, (24):464~466.
13. Hoffman R. A. . Apparatus for the measurement of optical absorptivity in laser mirrors. Appl. Opt. 1974(, 13):1405
14. 顾培夫. 薄膜技术. 杭州：浙江大学出版社，1990.
15. Hall. J.F . Optcial properties of zinc sulfide and cadminum sulfide in the ultraviolet. Opt. Soc. Am., 1956, (46): 1013~1014
16. 李正中. 薄膜光学与镀膜技术. 北京：艺轩出版社，2001.
17. 杨邦朝，王文生. 薄膜物理与技术. 成都：电子科技大学出版社，1994.



LED封装与检测技术

主编　陈慧挺　吴姚莎

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

摘要

本讲义的主要内容包括 LED 封装和 LED 检测两个部分。

第一部分介绍 LED 封装技术，主要内容包括 LED 封装企业中生产线上的固晶、焊线、封胶和分光等工序的岗位任务介绍、各岗位的操作流程解释与示例、仪器设备的工作原理等。

第二部分介绍 LED 检测技术，主要内容包括 LED 灯珠及灯具光色电综合特性检测，LED 灯珠热性能检测，荧光粉激发特性检测等。

目录

引言：LED 封装与检测简介……3
预备知识：LED 技术中的基本概念……5
项目一：固晶……20
项目二：焊线……27
项目三：封胶……33
项目四：分光……42
项目五：LED 检测技术……46
项目六：EX-1000 荧光粉激发光谱与热猝灭分析系统……60

引言：LED 封装与检测简介

LED 产业链是指 LED 从上游的芯片制造，到中游的灯珠封装，直至下游的产品成品应用各个环节的相关产业，并且包括了各个环节中的生产和检测设备等一系列产业。以下的图引言 1 是 LED 产业链各环节以及相关工艺过程的示意图，图中上半部分为芯片制造、下本部分为灯珠封装以及成品应用。

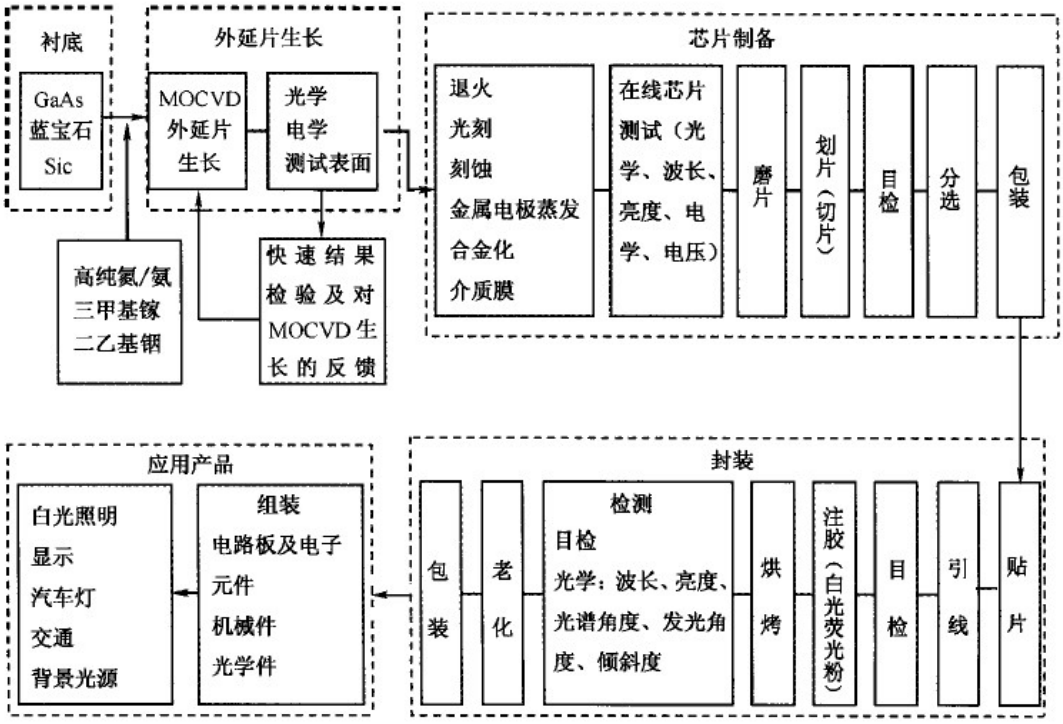


图 引言 1 LED 产业链示意图

从图引言 1 中可见，LED 产业链主要分为芯片制造、封装和应用三大环节，其中芯片又分为衬底形成、外延片生长以及芯片制备成型三个部分，LED 封装产业是一个相对独立的技术环节，而 LED 的应用主要包括显示和照明两大模块，此外、LED 产业链中，还包括 LED 驱动电源产业，以及为以上各个环节的生产提供设备和原材料的设备提供商和原材料和耗材提供商。

LED 封装属于产业链的中游，LED 封装一般分为固晶、焊线、封胶、分光等几个工艺环节。

固晶就是在 LED 支架的特定位置处涂上银胶或绝缘胶，并将 LED 芯片粘贴在支架的相应位置上的过程。目前，LED 企业大规模生产一般都采用高速自动固晶机进行固晶，手工固晶主要用于修补和试样。

焊线就是在固晶完成的支架上，把 LED 芯片（即 PN 结）的正负极和支架电极对应的正负极用金线焊接，令它们在电路上连接起来的过程。目前一般也是在采用高速自动焊线机进行焊线。

封胶：LED 灯珠通常需要经过封胶环节，将硅胶注入盖有透镜的灯珠内以保护焊点等内部结构；白光 LED 的原理是采用蓝光芯片激发黄光荧光粉而得到白光，因此，在封胶环节之

前，还必须经过配点荧光粉环节。

分光是将前面各工序生产出来的 LED 灯珠按照其光通量（亮度）、波长（或色温）以及电学特性进行检测和分批，以将某一批次的产品划分为本批次合格品、等外品以及次品的过程。

而 LED 检测则是贯穿于整个 LED 产业链各工艺环节而进行的对 LED 芯片、灯珠以及成品灯具的各种参数进行检测的步骤：LED 作为一种新型光源，具有各种各样的特性参数，不同应用场合对各种参数的要求不同，主要涉及 LED 的光、色、电、热等参数测试。

本课程所述的 LED 检测技术则是指运用各种检测设备，对 LED 灯珠成品或灯具的光、色、电、热等参数进行检测的技术。

LED 光色电综合测试系统是针对 LED 光通量、色温、波长、显示指数、色纯度、电流、电压、电功率、光效率等全性能的检测设备。通过模拟视觉函数对不同颜色的谱线自动修正，达到最精确测试，且对不同功率 LED 测试速度都在 ms 级。LED 光色电参数综合测试系统主要由积分球、测试系统柜和计算机测试软件组成。其中，大积分球适用于灯具光色电综合测试，小积分球适用于灯珠光色电综合测试。

荧光粉激发光谱与热猝灭分析系统基于 GBT23595-2009、GBT14633-2010 及 SJ/T11397-2009 标准，能够测量荧光材料处于不同恒温条件（从室温至 200℃）下，受不同波长（200nm-800nm）的光辐射激发，发射光的光谱功率分布，从而分析荧光材料的最佳工作条件，控制和判定荧光粉的品质。

LED 热阻结构分析系统集 LED 热、电、光等多项测试功能于一体，利用计算机专用软件，不仅可以准确获得 LED 的总热阻，还可以获得其积分和微分结构函数，呈现 LED 热流传导路径（芯片至封装各器件）上的热容和热阻分布信息。该系统完全满足 EIA/JESD51、MIL-STD-750D、SJ20788-2000、QB/T4057-2010 等国际国内标准。

0 LED 技术中的基本概念

要掌握 LED 检测技术，首先要了解描述 LED 的光色电特性的参数和相关基本概念

0.1 LED 的光度学特性

光学特性包括描述其发光强弱以及其光强空间分布情况的光度学特性如光通量、发光强度、亮度、光束发散角等，以及描述其颜色（色光 LED）或颜色倾向性（白光 LED）的色度学特性参数如波长或颜色（光谱特性）、色温、显色指数等。

光源的光度学特性主要包括它发出的光的总量多少、它发出的光在某一个特定方向上的强弱、以及它发出的光强随空间的分布情况等。

0.1.1 辐射度学与光度学的基本概念

①辐射量与光学量

（1）辐射量

尽管位于可见光波长范围之外的电磁辐射不能为人眼所感知，但作为一种能量的发射，它依然是客观存在的，不同波长的辐射能够被相应的探测仪器所探测到，而且对人体也是有影响的，有些辐射、特别是高频辐射，对人体有极大的危害、甚至可以致命。因此，对电磁辐射，抛开其波长的差异，应当有一些通用的参数来衡量其辐射的强弱，这些用来衡量电磁辐射强弱的参数就是辐射量。

辐射量包括**辐射能、辐射通量**、辐射出射度、辐射强度、辐射亮度、辐射照度等六个。其中主要掌握辐射能和辐射通量。

1）辐射能Q_e

辐射能（通常用Q_e表示）是以辐射形式发射或传输的电磁波能量。当辐射能被其它物质吸收时，可以转变为其它形式的能量，如热能、电能等。显然，辐射能的量纲就是能量的量纲、其单位是焦耳（J）。

2）辐射通量Φ_e

辐射通量Φ_e又称为辐射功率，是指以辐射形式发射、传播或接收的功率。其定义为单位时间内流过的辐射能量。即：

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \qquad (0\text{-}1)$$

辐射通量的量纲就是功率的量纲，单位就是瓦特（W）。

除了以上两个主要的辐射量之外，还有以下四个辐射量：

辐射出射度：辐射出射度是用来反映物体辐射能力的物理量。其概念为辐射体单位面积向半球面空间发射的辐射通量。

辐射强度：其概念为点辐射源在给定方向上发射的在单位立体角内的辐射通量。

辐射亮度：其概念为面辐射源在某一给定方向上的辐射通量。

辐射照度：其概念为照射在某面元 dA 上的辐射通量与该面元的面积之比。与以上几个概念不同的是辐射照度是在辐射接收面上定义的概念，而以上几个则是在辐射发射面（或点）上定义的概念。

（2）光学量

由于可见光的波长只占整个电磁波谱中一段很狭窄的范围，如果某一辐射的波段落在这一范围之外，那无论辐射功率如何的大，人眼也是无法感知的。换言之，对于非可见光波段的电磁辐射而言，无论其辐射量的大小如何，其对应的光学量都为零。

因此，为了描述人眼所能够感受到的光辐射的强弱，必须在辐射量的基础上再建立一套参数来描述可见光辐射的强弱，这就是光学量。光学量包括**光通量**、光出射度、光照度、**发**

光强度、光亮度等。

1）光通量Φ_v（单位：**流明**、即 lm）

光通量Φ_v是衡量可见光对人眼的视觉刺激程度的量，光通量的大小就是总的辐射通量中能被人眼感受到的那部分的大小。光通量的量纲与辐射通量一样仍是功率的量纲。但因为人的视觉对光辐射的感受还与光的波长（颜色）有关，所以光通量并不采用通用的功率单位瓦特作为单位，而是采用根据标准光源及正常视力而特殊定制的 **“流明”**作为单位、用符号表示则是 **lm**。波长为 555 纳米的单色光（黄绿色）每瓦特的辐射通量对应的光通量等于 683 流明，如图 2.1 所示。

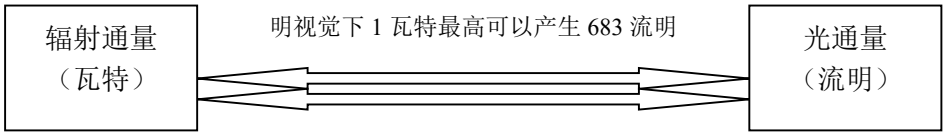


图 0.1 辐射通量与光通量的关系

由于人眼对不同波长光的相对视见率不同，所以不同波长光的辐射通量相等时，其光通量并不相等。例如，当波长为 555nm 米的绿光与波长为 650nm 米的红光辐射通量相等时，前者的光通量为后者的 10 倍。

光通量是光学量的主要单位之一。由光通量这一主要光学量可以引出以下两个光学量：光出射度、光照度。

2）光出射度M_v

光源单位面积发出的光通量称为光源的光出射度，通常用符号表示为为M_v。即：

$$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \qquad (0\text{-}2)$$

光出射度的单位为流明每平方米（lm/m^2）。

3）光照度E_v

被照表面单位面积接受的光通量称为光照度，通常用符号E_v表示。即：

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \qquad (0\text{-}3)$$

光照度和光出射度的区别在于一个是（光源）单位面积发出光通量，另一个是（被照表面）单位面积接受的光通量，显然，光照度和光出射度的应当具有相同的量纲。当用来描述被照表面的光照度时，流明每平方米又被称为**勒克斯（*lx*）**。

4）发光强度I_v

点光源在单位立体角内发出的光通量称为**发光强度**。即：

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \qquad (0\text{-}4)$$

发光强度是用来描述**点光源**发光特性的光学量，引入发光强度的意义是为了描述点光源在某一指定方向上发出光通量能力的大小：在指定方向上的一个很小的立体角元内所包含的光通量值，除以这个立体角元，所得的商即为光源在此方向上的发光强度。

值得注意的是发光强度是国际单位制中的七个基本量之一，也是基本的光学量。发光强度的单位是**坎德拉**（**cd**）又可称“烛光”。根据国际单位制的规定：一个波长为 555nm 的单色光源（黄绿色），在某方向上的辐射强度为$\frac{1}{683}W/sr$（式中 *sr* 为立体角的单位：球面弧度，或简称球面度），则该点光源在该方向上的发光强度为 1 坎德拉。由于发光强度是国际

单位制的基本单位，光通量的单位流明也可以视为从坎德拉中导出：发光强度为 1cd 的匀强点光源，在单位立体角内发出的光通量即为 1lm。

显然，点光源的发光强度是和发光方向有关的，对于发光强度各向异性的点光源，其总的光通量可用下式求得：

$$\Phi_v = \int_\Omega I_v d\Omega \qquad (0\text{-}5)$$

而对于各向同性的点光源，其总的光通量就简单了：如果发光强度为 I_v 则光通量为：$\Phi_v = 4\pi I_v$。

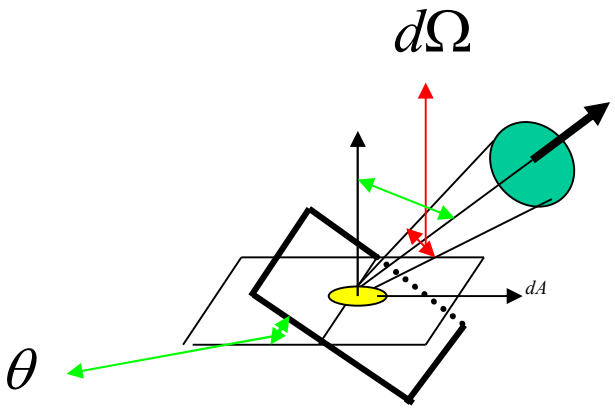


图 0.2 面元 dA 在 θ 方向上的光亮度示意图

5）光亮度 L_v

光亮度又简称亮度，是指某发光面元 dA 在某方向 θ 上单位面积的发光强度。根据发光强度和光通量之间的关系，也可以指光源单位面积在某一方向上单位立体角内的光通量。即：

$$L_v = \frac{I_v}{\cos\theta dA} = \frac{d\Phi_v}{\cos\theta dA d\Omega} \qquad (0\text{-}6)$$

上式中 θ 是面元 dA 的法线方向与考察方向的夹角。以上公式的说明如图 0.2 所示：

光亮度的单位是坎德拉每平方米（cd/m^2），坎德拉每平方米又称为尼特（nit）。

光亮度虽不是基本的光学量，但却是体现包括光源和被照表面在内的任意发光表面在人眼看上去的表观明暗程度的重要光学量。以下的表 0.1 列出了常见发光表面的发光亮度：

表 0.1 常见发光表面的发光亮度

表面名称	光亮度(cd/㎡)	表面名称	光亮度(cd/㎡)
在地面上看到太阳表面	$(1.5\sim2.0)\times10^9$	100 瓦白炽钨丝灯	6×10^6
日光下的白纸	2.5×10^4	6 伏汽车头灯	1×10^7
白天晴朗的天空	3×10^3	放映灯	2×10^7
在地面上看到的月亮的表面	$(3\sim5)\times10^3$	卤钨灯	3×10^7
月光下的白纸	3×10^2	超高压球形汞灯	$1\times10^8 \sim 2\times10^9$
蜡烛的火焰	$(5\sim6)\times10^3$	超高压毛细管汞灯	$2\times10^7 \sim 1\times10^9$

以上各光学量的单位除了本节介绍的标准单位之外，还有非标准的一些单位，如发光强度的单位可用“国际烛光”等，相见相关参考资料。

②光学量和辐射量之间的关系

（1）光谱光效率函数

具有相同辐射通量而波长不同的可见光分别作用于人眼，人眼感受到的明亮程度即光学

量是不同的，这表明人的视觉对不同波长的光具有不同的灵敏度。人眼对不同波长的光的灵敏度是波长的函数，这一函数称为光谱光效率函数（或称光谱光视效率）。实验还表明，在观察视场明暗程度不同的情况下，光谱光效率函数也会稍有不同。这是由于人眼的明视觉和暗视觉是由不同类型的视觉细胞来实现的：

1）明视觉

在光亮(几个 cd/m^2 以上)条件下，人眼的锥体细胞起作用。

明视觉条件下，锥体细胞能分辨物体的细节，很好地区分不同颜色。

2）暗视觉

在暗条件下，亮度约在百分之几 cd/m^2 以下时，人眼的杆体细胞起作用。

在暗视觉条件下，杆体细胞能感受微光的刺激，但不能分辨颜色和细节。

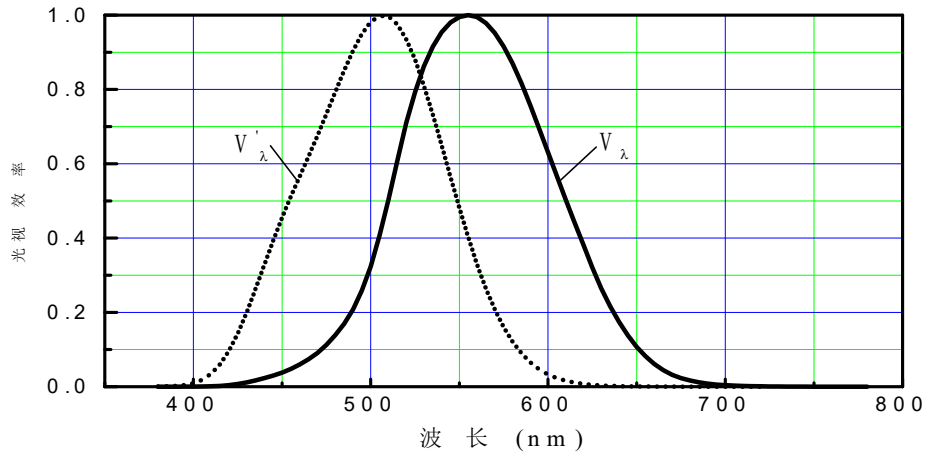


图 0.3 明视觉和暗视觉情形下的光谱光效率函数

0.2 LED 的色度学特性

LED 的色度学特性是其光学特性的另一个重要方面，由于 LED 灯具对颜色要求的多样性，有些灯具对颜色的要求比较严格，于是，其色度学特性需要用包含波长（包括峰值波长、主波长、质心波长等次级概念）、色温、显色指数等来综合描述。

0.2.1 颜色的描述与 RGB 颜色空间

人眼可见的光是波长在 380 ~ 760 nm 范围内的电磁波，电磁波的波长超出这一范围人眼将无法感受到的，在这一波长范围内，不同波长的光会引起人眼不同的“颜色”感觉，这就是颜色形成的机理，通常认为可见光包括 7 种不同颜色的单色光，具体为：红色 760 ~ 620 nm，橙色 620 ~ 590nm，黄色 590 ~ 545 nm，绿色 545 ~ 500 nm，青色 500 ~ 470nm，蓝色 470 ~ 430 nm，紫色 430 ~ 380nm，这 7 种单色光带给人眼 7 中不同的颜色感受。事实上，除了这 7 种颜色之外，人眼还可以感受到在可见光波长范围内由波长连续变化而引起的连续变化彩色感受。除此之外，人眼还可以感受到黑色、白色、灰色等无色彩的颜色感受，以及粉红、暗红、土黄等颜色感受。

①混色与三基色原理

在进行混色实验时，人们发现只要选取三种不同颜色的单色光按一定比例混合就可以得到自然界中绝大多数彩色，具有这种特性的三个单色光叫基色光，对应的三种颜色称为**三基色**，由此我们得到一个重要的原理：三基色原理。

在实际情况当中，通常选取红、绿、蓝三种颜色作为三基色，由此而形成了所谓的 RGB 颜色空间。

（2）相加混色法和相减混色法

把三基色按照不同的比例混合获得彩色的方法称为混色法。混色法有相加混色和相减混色之分。彩色电视系统以及各种类型的计算机监视器等显示屏幕中，使用的是相加混色法。而印刷、美术等行业以及计算机的彩色打印机等输出设备使用的是相减混色法。

1）相加混色法

相加混色一般采用色光混色，色光混色是将三束圆形截面的红、绿、蓝单色光同时投影到屏幕上，呈现一幅品字形三基色圆图。如下图 0.4 所示：

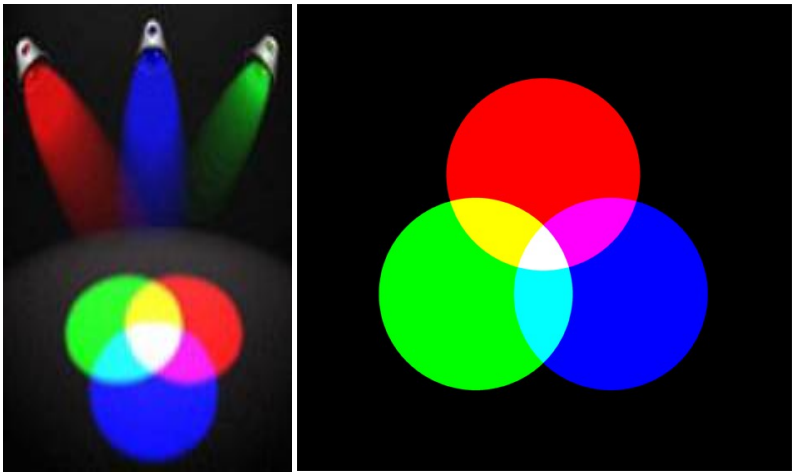


图 0.4 .相加混色法

由图 0.4 可见：

红光+绿光=黄光

红光+蓝光=紫光（品红光）

绿光+蓝光=青光

红光+绿光+蓝光=白光

2）相减混色法

相减混色法主要用于描述颜料的混色：指不能发光，却能将照来的光吸掉一部分，将剩下的光反射出去的色料的混合。色料不同，吸收色光的波长与亮度的能力也不同。色料混合之后形成的新色料，一般都能增强吸光的能力，削弱反光的亮度。在投照光不变的条件下，新色料的反光能力低于混合前的色料的反光能力的平均数，因此，新色料的明度降低了，纯度也降低了，所以又称为减光混合。

相减混色法中的三原色为黄、青和品红（即某种紫色）。这三种原色分别对相加混色中的三基色蓝、红和绿具有极高的吸收率。因此三原色按不同的比例混合也能得到各种不同的颜色。

②RGB 颜色空间

根据以上相加混色法的思想，把 R（红）、G（绿）、B（蓝）三种基色的光亮度作一定的归一化之后，作为直角坐标系三维空间的三个坐标轴，可以构成一个颜色空间，颜色空间中不同的坐标点就表示了不同的颜色。这样表示颜色的方法即为 RGB 颜色空间，由于 RGB 颜色空间是计算机等数字图像处理仪器设备所采用的表示图像颜色的基本方法，故 RGB 颜色空间通常也称基础颜色空间。

从理论上，RGB 颜色空间可以表示出任意的颜色。

0.2.3 CIE 标准色度学系统

国际照明委员会(CIE)规定了一套标准色度系统，称为 CIE 标准色度系统，这一系统是近代色度学的基本组成部分，是色度计算的基础，也是彩色复制的理论基础之一。

CIE 标准色度学系统是一种混色系统，是以颜色匹配实验为出发点建立起来的。用组成每种颜色的三原色数量来定量表达颜色。

①颜色匹配

建立 CIE 的标准色度学系统的一个重要原因是为了解决当时在颜色混合和颜色匹配中出现的一些问题。

把两种颜色调节到视觉上相同或相等的过程称为**颜色匹配。**以下的图 0.5 是颜色匹配的一种实验装置图：

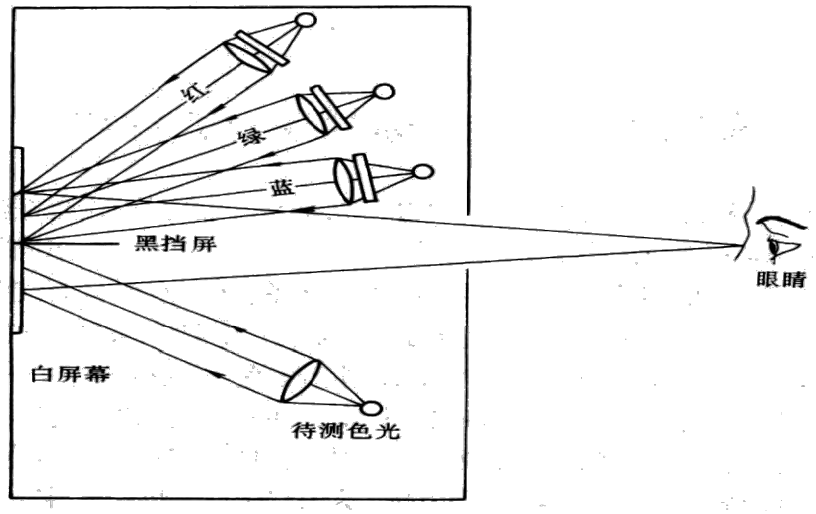


图 0.5 颜色匹配实验示意图

在以上的颜色匹配实验中，黑挡板下方是被匹配的颜色，即目标颜色，而黑挡板上方则是 RGB 颜色空间中的三基色红、绿和蓝。在实验中，CIE 首先规定了这三种基色光的波长，分别为：700nm（R）、546.1nm（G）、435.8nm（B）然后就用这三种基色光进行不同配比的颜色匹配实验，试图配出在观察者看来和黑挡板下方的目标颜色一致的颜色。

②CIE1931-RGB 系统

CIE 标准色度系统的第一个版本叫做 CIE1931-RGB 系统，是 CIE 在 1931 年发布的。这一色度系统是在类似于以上图 2.9 的实验装置上，以标准色度观察者在 1°-4° 的视场下的基本颜色视觉实验数据为基础而产生的。

在 CIE1931-RGB 系统的实验中，为了确切地描述颜色匹配中三种基色的相对比例，首先必须定出基色单位这样一个概念，即定出多大亮度的基色光为该基色光的“一个单位”。为此，需要提出“等能白光”这样一个概念，即假想的在整个可见光谱范围内光谱辐射能相等的光源的光色，称为等能白色，等能白光的辐射通量谱函数为整个可见光范围内的一条平行于横轴（波长轴）的直线。显然，如果波长分别为 700nm（R）、546.1nm（G）、435.8nm（B）的红、绿蓝光可以作为三基色而混合匹配出任意颜色的话，则此三基色配出等能白色时它们的辐射通量是相等的。由于人眼视觉效率函数依波长变化，三基色的光通量之间的关

系如下表 0.3（这里，取 1 流明红光的光通量作为一个单位）：

表 0.3 三基色单位亮度的光通量关系表

颜色	红	绿	蓝	混合（等能白）
波长（nm）	700	546.1	435.8	—
单位量流明数	1.0000	4.5907	0.0691	5.6508

采用以上的三基色单位量作为标准，就可通过实验测定出混合配比出任意颜色所需要的三基色的量了。

颜色匹配实验中，当与待测色达到色匹配时所需要的三基色的量，称为**三刺激值**，记作 R、G、B。一种颜色与一组 R、G、B 值相对应，R、G、B 值相同的颜色，颜色感觉必定相同。三基色各自在 R+G+B 总量中的相对比例叫做色度坐标，用小写的符号 r，g，b 来表示。即：

$$\begin{cases} r = \dfrac{R}{R+G+B} \\ g = \dfrac{G}{R+G+B} \\ b = \dfrac{B}{R+G+B} = 1-r-g \end{cases} \qquad (0.7)$$

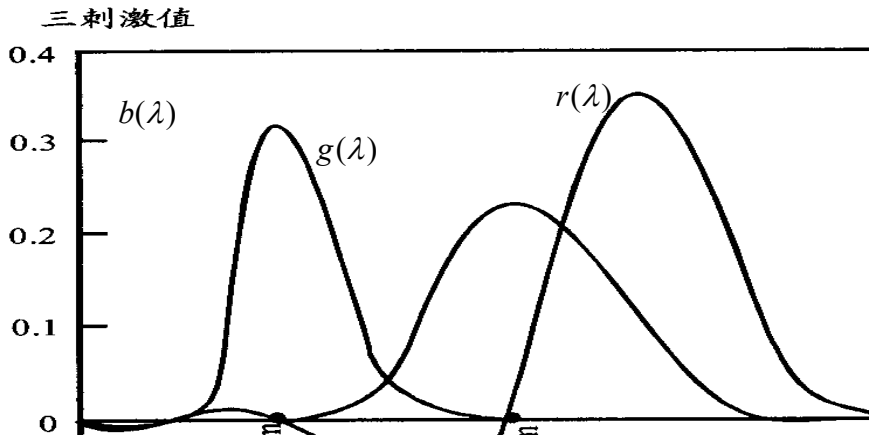


图 0.6 CIE1931-RGB 色度系统颜色匹配光谱三刺激值曲线

基于 CIE1931-RGB 系统的实验证明：几乎所有的颜色都可以用三原色按某个特定的比例混合而成。如果用上述规定单位量的三原色，在可见光 380nm~780nm 范围内每隔波长间隔（如 10nm)对等能白色的各个波长进行一系列的颜色匹配实验，可得每一光谱色的三刺激值。实验得出的颜色匹配曲线如图 0.6 所示, 图2.10 中的 CIE1931-RGB 配光曲线也称为 CIE1931-RGB 标准色度观察者。

从图 0.6 中可以得到：任一波长的光，都可以由三基色的光按图中的比例匹配而成，但图中曲线表明，如要配出 500nm 附近某一段波长的光，需要的红色基色的光量为负值，即在实验中，要把这一数量的红光照射于被匹配光的一侧（即图 0.5 的黑挡板下

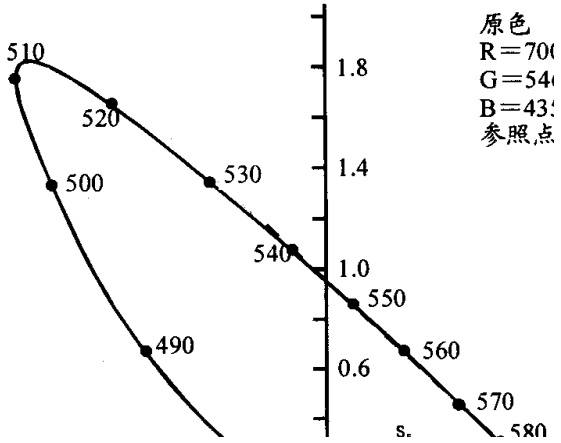


图 0.7 CIE1931 -RGB 系统色度图

方）才行。这对配光的物理意义以及数学计算而言，都是个不太完善的结果。

根据配光的三刺激值色度坐标的公式，r、g、b 三个色度坐标中只有两个是独立的，通常可选取 r、g 分别作为横坐标和纵坐标，可绘制出如上图 0.7 所示的 1931 CIE-RGB 系统色度图。从图 0.7 中也明显可见，配出许多颜色所需要的红色基色分量的刺激值是负的。

③CIE1931-XYZ 标准色度学系统以及其它 CIE 色度学系统

如上所述、CIE1931-RGB 系统存在着一些缺点：在某些场合下，例如被匹配颜色的饱和度很高时，三色系数就不能同时取正；而且由于三原色都对混合色的亮度有贡献，当用颜色反方程计算时就很不方便。

因此，希望有一种系统能满足以下的要求：

三刺激值均为正；

某一原原色的刺激值，正好代表混合色的亮度，而另外两种原色对混合色的亮度没有贡献；

当三刺激值相等时，混合光仍代表标准（等能）白光。

这样的系统在以实际的光谱色为三原色时是无法从物理上实现的，CIE 通过研究提出了以以下假想色作为逻辑上的三基色的 XYZ 表色系统，即 CIE1931-XYZ 标准色度学系统。

CIE1931-XYZ 标准色度学系统中的三基色 X、Y、Z 实质上是 CIE1931-RGB 色度学系统中三基色 R、G、B 的线性组合。两者之间的转换关系如下式所述：

$$X = 2.7689R + 1.7517G + 1.1302B \qquad (0.8)$$

$$Y = 1.0000R + 4.9507G + 0.0691B \qquad (0.9)$$

$$Z = 0.0000R + 0.0565G + 5.5943B \qquad (0.10)$$

根据上式，可得到以下用于描述色品图的三刺激值：

$$\begin{cases} x = \dfrac{X}{X+Y+Z} \\ y = \dfrac{Y}{X+Y+Z} \\ z = \dfrac{Z}{X+Y+Z} = 1-x-y \end{cases} \qquad (0.11)$$

由此可得到如下图 0.12 的 CIE1931-XYZ 标准色度系统颜色匹配光谱三刺激值曲线。又称 CIE1931XYZ 标准色度观察者。

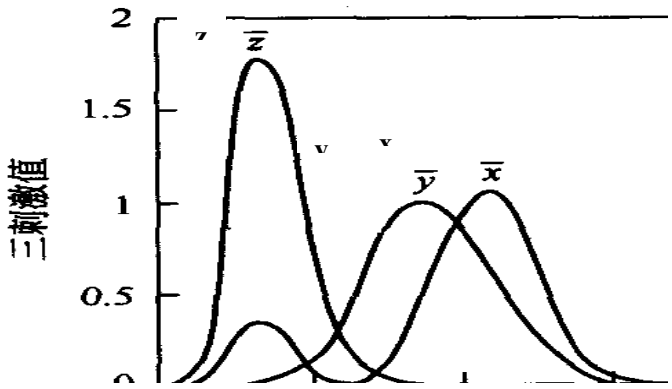


图 0.12 CIE1931-XYZ 标准色度系统颜色匹配光

从图 0.12 中可见配光所用的三基色色品坐标 x、y、z 值没有出现负值。由图 0.12 色品坐标的实验数据可以画出以下图 0.13 所示的 CIE1931XYZ 系统色品图。

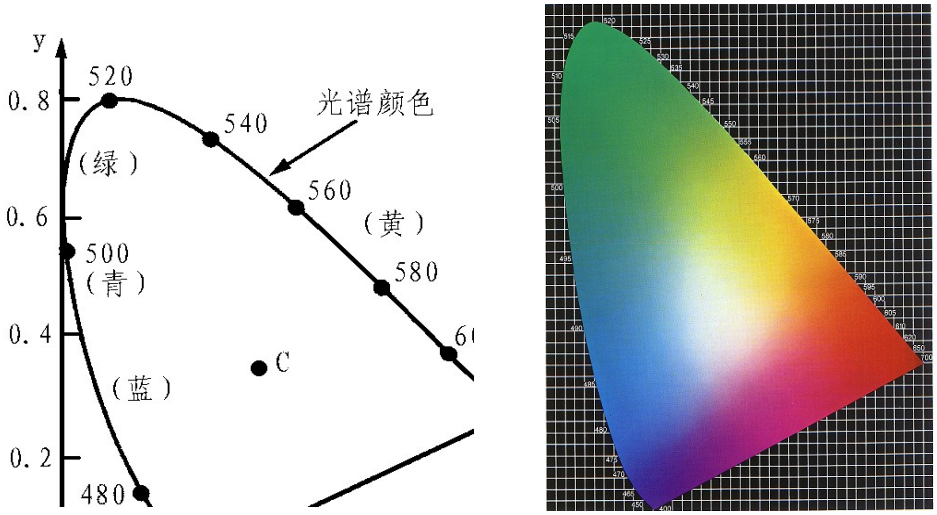


图 0.13 CIE1931-XYZ 标准色度系统色品图

从以上色品图中可见颜色刺激的值全为正值了。

CIE1931XYZ 标准色度系统是国际上色度计算、颜色测量、和颜色表征的统一标准，是所有测色仪器的设计与制造依据。

0.2.4 描述LED色度学特性的几个重要概念及其关系

在了解了颜色描述的基本概念之后，以下对描述 LED 色度学特性的几个重要概念及其关系进行介绍和分析。

①光源的波长与颜色

发光的颜色是色光 LED 的一个重要参数，对单色光而言，颜色的差异是由波长的不同而引起的：可见光的波长不同，引起人眼的颜色感觉就不同。

但实际上，任何光源包括 LED，发出的光都不可能是绝对严格的单一波长的单色光，而是发出以某一波长为中心的一定波长范围的光，某一光源发光的相对强弱和波长的函数关系称为该光源的光谱特性，色光光源的光谱特性曲线通常是类似高斯分布（即正态分布）的曲线。光谱特性曲线如图 0.14 所示：

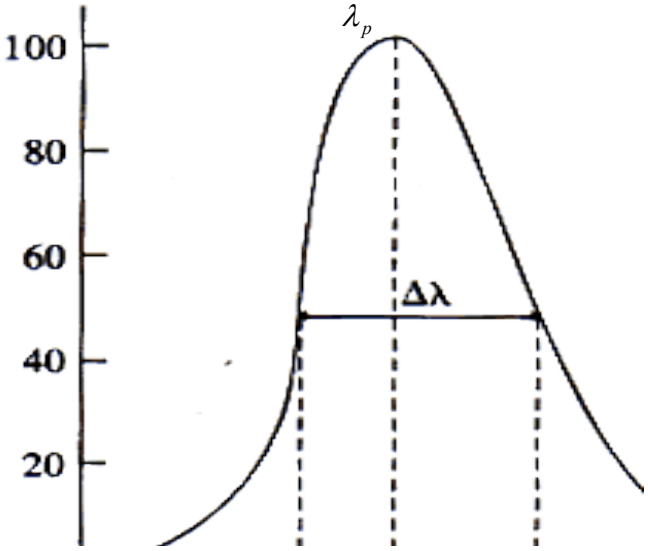


图 0.14 光源光谱特性曲线（黄绿色光）

图 0.14 是黄绿色光的光谱特性曲线，在图中，可以引出几个常用的光学特性参数：

（1）峰值波长

图中曲线的最高点对应的波长称为峰值波长：无论什么材料制成的LED，都有一个相对光强度最强处（光输出最大），与之相对应有一个波长，通常叫做峰值波长，用 λp 表示。通常峰值波长主要用来描述单色光的颜色特性。

（2）谱线半宽度

图中的 $\Delta\lambda$ 通常称为谱线的半宽度，指相对光强为峰值波长一半时对应的曲线上两个点的波长间隔。半宽度反映谱线宽窄，是衡量光源单色性好坏的参数，各种单色光LED发光的

谱线半宽度小于40nm，单色性较好。

（3）主波长

主波长：有的光源发出的光不仅有一个峰值波长；甚至有多个高低不同峰值，并非单色光。为此描述此光源的色度特性，需要引入主波长的概念。主波长描述的是人眼所能观察到的由此光源发出的光的颜色倾向所对应的单色光的波长。

主波长的概念通常不是用来描述单色光，而是描述多个峰值的色光混合起来所呈现的颜色。例如GaP 材料可发出多个峰值波长，而主波长只有一个，它会随着LED 长期工作，结温升高而主波长偏向长波。

主波长的数值可用如下方法来确定：

用某一光谱色，按一定比例与一个确定的标准照明体（如CIE标准照明体A,B,C或D65)相混合而匹配出样品色，该光谱色的波长就是样品色的主波长。任何一个颜色都可以看作为用某一个光谱色按一定比例与一个参照光源（如CIE标准光源A、B、C等，等能光源E，标准照明体D65等）相混合而匹配出来的颜色，这个光谱色就是颜色的主波长。颜色的主波长相当于人眼观测到的颜色的色调（心理量）。

如果光源的单色性很好，则峰值波长 λp 的数值上也就基本上等于主波长。对于蓝光LED 芯片，峰值波长是要比主波长小一点（5nm 左右）。

（4）色品坐标

如前分析 CIE1931－XYZ 系统是所述，某种颜色在 CIE1931－XYZ 色度图中的色品坐标（或称色度坐标）是描述该颜色的色度特性的重要参量，颜色色品坐标的不同对应着颜色的差异。在实际 LED 封装中的分光等应用场合需要用到色品坐标的概念，此时通常用色度图中 X 和 Y 坐标的至来表示。对于白光 LED 的分光，色品坐标的 X、Y 值均为接近 0.33 的一个数值，表明白光中 X、Y、Z 三个颜色分量的比例接近，根据 X、Y 具体数值的不同，体现出一定的颜色偏向性。

色品坐标还可以用于说明主波长的概念：CIE1931－XYZ 色度图边沿的舌型曲线代表饱和度为 1 的纯光谱色，假若已知某光的色品坐标电为 A，则从色品坐标图中等能白（0.33，0.33）处引一线段指向 A，再将该线段延长，则延长线和色度图边沿的交点对应的波长则为该色光的主波长。

②光源的色温

色光光源的色度特性用波长来表示，但在LED或其它光源的制造和应用中，白光光源也是非常重要的一种类型。理想的白光是各种波长色光的“均匀”或“等能”的组合，因而无法用波长表示白光的颜色。

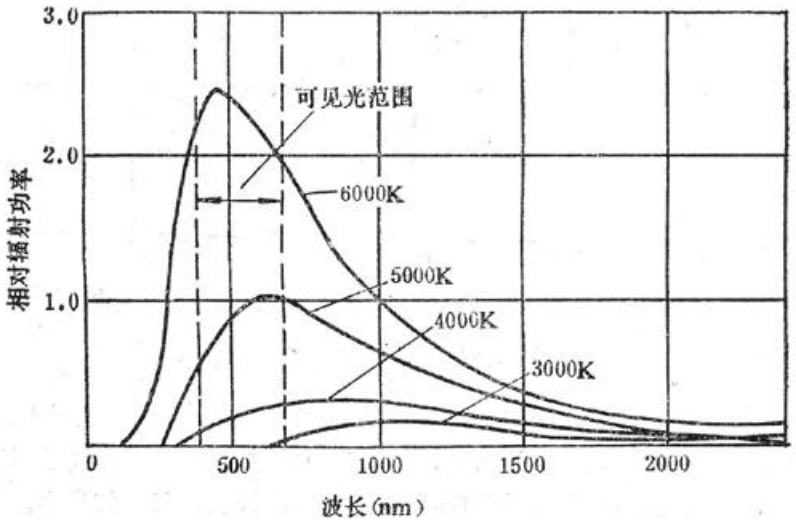


图 0.15 黑体辐射的温度特性

实际的白光总带有一点微弱的颜色偏向性，如偏红或偏蓝。由于白光的这种颜色偏向性和单色光的颜色明确性而言，是比较微弱的，所以实际的白光其颜色偏向性也不用感觉上偏向的那种颜色的波长来表示，而是借助于黑体辐射峰值波长随温度变化的特性，用“色温”这个参数来表示的。黑体辐射随温度变化的特性可用图0.15表示：

光源的色温定义如下：如果光源发出的光的颜色与黑体在某一温度下辐射的光颜色相同时，则此时黑体的温度称为该光源的色温。

色温是用来描述白光的颜色偏向性的，单色光的颜色不用色温来描述。

色温计算采用绝对温标，以 K（开尔文）为单位，黑体幅射的 0K＝-273 ° C 做为计算的起点。将黑体加热，随着能量的提高，便会进入可见光的领域。例如，在 2800 K 时，发出的色光和灯泡相同，我们便说灯泡的色温是2800K。

光源色温不同，光色也不同。

色温<3300K：光色为 温暖（带红的白色），稳重的气氛效果；

色温在3300-5000K：光色为 中间（白），爽快的气氛效果；

色温>5000k：光色为清凉型（带蓝的白色），冷的气氛效果。

不同色温对应的颜色可用图0.16表示：

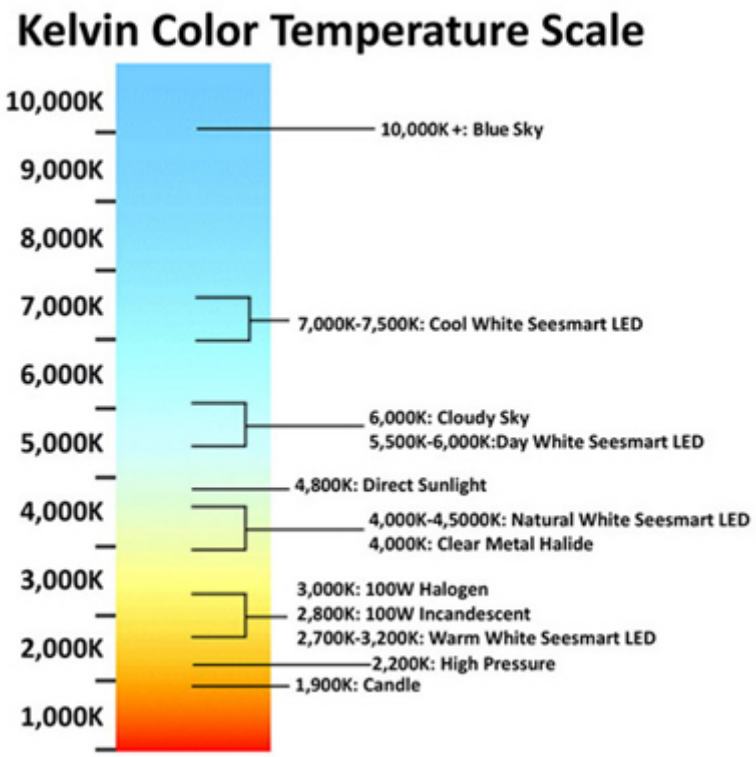


图 0.16 色温示意图

从图中可见，不同的色温对应于不同的颜色，必须强调的是色温是用来描述白光颜色偏向是暖色还是冷色的一个概念，对应于正白的色温表示该颜色恰好位于暖色和冷色的平衡点，即该颜色不偏暖也不偏冷，这个平衡点大概再5000多K左右。此时，与该色温对应的温度下，黑体辐射的峰值波长会取555nm左右的一个数值，该波长对应的单色光颜色为黄绿色。但此时绝对不能说和5000多K色温对应的颜色为黄绿色，因为色温不是描述单色光色度的参量，色温是描述白光色度特性的参量，它体现了白光中暖色和冷色的平衡程度。

③光源的显色性

显色性是用于描述白光光源综合色度特性的一个参数。

原则上，人造光源应与自然光源相同，使人的肉眼能正确辨别事物的颜色。

光源对于物体颜色呈现的程度称为显色性，通常用“显色指数（Ra）”来描述，它表示物体在某一光源照明下的颜色与基准光（太阳光）照明时颜色的偏离。显色性能较全面反映光源的颜色特性，它描述了事物的真实颜色（其自身的色泽）与某一标准光源下所显示的颜色关系。

Ra 值的确定，是将 DIN6169 标准中定义的 8 种测试颜色加上其它 7 种试样，在标准光源和被测试光源下做比较，色差越小则表明被测光源颜色的显色性越好。Ra 值为 100 的光源表示，事物在其灯光下显示出来的颜色与在标准光源下一致。代表性试样的选择如下：1－8 号：中彩度色：如 深红、深黄、深绿、深蓝等（明度为 6）；9－12 号：高彩度的红色、黄色、绿色、蓝色；13 号：白种人女性肤色，14 号：叶绿色，15 号：中国女性肤色(日本

女性肤色）。

显色性是通过与同色温的参考或基准光源（白炽灯或日光）下物体外观颜色的比较。光所发射的光谱内容决定光源的光色，但同样光色可由许多，少数甚至仅仅两个单色的光波组合而成，对各个颜色的显色性亦大不相同。相同光色的光源会有相异的光谱组成，光谱组成较广的光源较有可能提供较佳的显色品质。当光源光谱中很少或缺乏物体在基准光源下所反射的主波时，会使颜色产生明显的色差（color shift）。色差程度愈大，光源对该色的显色性愈差。

实际应用中对光源显色指数的要求见表 0.4：

表 0.4 不同场合下对光源显色指数的要求。

指数（CRI）	等级	显色性	应用场合
90-100	1A	优良	需要色彩精确对比的场所
80-89	1B		需要色彩正确判断的场所
60-79	2	普通	需要中等显色性的场所
40-59	3		对显色性的要求较低，色差较小的场所
20-39	4	较差	对显色性无具体要求的场所

各种不同光源的显色指数如下的表 0.5：

表 0.5 各种光源的显色指数

光源	白炽灯	荧光灯	卤钨灯	高压汞灯	高压钠灯	金属卤化物灯
指数	97	75-94	95-99	22-51	20-30	60-65

2.3 LED 的电学特性参数

LED 作为一种 PN 结发光的电光源，显然，其电学特性参数也是非常重要的。LED 的电学特性参数主要是伏安特性（曲线），以及根据对该曲线的分析而提取出来的正向工作电流、正向压降、反向电流、反向压降、功率等。此外，作为一个电光源，显然发光效率也是其重要的联系电、光特性的参数。

①伏安特性曲线

器件的伏安特性是指流过器件的电流和器件两端施加的电压之间的函数关系。伏安特性是一切电阻型电子器件的主要特性，LED 属于这一范畴，因此，伏安特性是 LED 主要的电学特性。LED 的伏安特性曲线如下的图 2.17 所示：

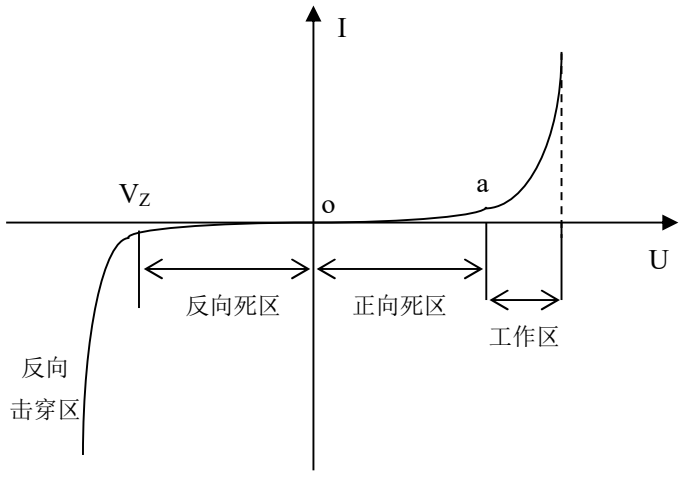


图 0.17 LED 伏安特性曲线

伏安特性也是表征 LED 芯片 PN 结制备性能主要参数。LED 的伏安特性具有非线性、

单向导电的特点，即外加正偏压表现低接触电阻，反之为高接触电阻。

从图 0.17 中可见伏安特性曲线分为四段。

（1）正向死区：这是正向电压太低，LED 还没有开启工作的状态（图 oa 段），a 点对应的 V_a 为开启电压，当 V＜Va，外加电场尚克服不少因载流子扩散而形成势垒电场，此时 R 很大；开启电压对于不同 LED 其值不同，GaAs 为 1V，红色 GaAsP 为 1.2V，GaP 为 1.8V，GaN 为 2.5V。

（2）正向工作区：这是 LED 正常工作的发光状态，电流 I_F 与外加电压呈指数关系：

实际工作室，一般令处于一个合适的当然，如果正向电压加很高，或者电流很大，LED 也能发光，但是处于超负荷高发热工作状态，寿命将大大缩短。

（3）反向死区 ：V＜0 时 PN 结加反偏压，这是加上一个较小的反向电压的情形，LED 反向电流很小，处于反向截止状态

（4）反向击穿区：$V＜－V_Z$ ，V_Z 称为反向击穿电压，这是反向加上一个很高的电压的情形，反向电压 V_R 对应 I_R 为反向漏电流。当反向偏压一直增加使 $V_R＜－V_Z$ 时，则出现 I_R 突然增加而出现击穿现象。由于所用化合物材料种类不同，各种 LED 的反向击穿电压 V_R 也不同。反向击穿会对 LED 造成损坏。

②几个常用的重要参数

根据 LED 的伏安特性曲线，可以较为全面地分析 LED 的电学特性，在 LED 芯片制造、封装以及不同应用场合的器件选型和设计时，通常需要强调以下几个参数的。

（1）正向工作电流 I_F（mA）

正向工作电流包括以下几种情形：

1）额定工作电流 I_F（mA）： LED 在理想的线性工作区域，在此电流下可安全地维持正常的工作状态，一般情况下，小功率 LED 的额定工作电流为 20mA 上下；

2）最小工作电流 I_{FL}（mA）： LED 在小于此电流工作时，由于超出理想的线性工作区域，将无法保证 LED 的正常工作状态（尤其是在一致性方面）；

3）最大容许正向电流 I_{FH}（mA）： LED 最大可承受的正向工作电流，在此电流下，LED 仍可正常工作，但发热量剧增，LED 的使用寿命将大大缩短；

4）最大容许正向脉冲电流 I_{FP}（mA）： LED 最大可承受的一定占空比的正向脉冲电流的高度。

（2）正向压降 V_F（V）

伏安特性曲线中正向工作电流所对应的电压称为正向压降或正向电压。

正向电压 V_F 是指额定正向电流下器件二端的电压降，这个参数既与材料的禁带宽度有关，同时也标识了 PN 结的体电阻与欧姆接触电阻的高低。V_F 的大小一定程度上反映了电极制作的优劣。相对于 20 毫安的正向电流，红黄光类 LED 的 V_F 值约为 2 伏，而 GaN 基兰绿光类 LED 器件的 V_F 值通常大于 3 伏。

（3）反向电流 I_R（μA）：

LED 在一定的反向偏压（通常取 V_R=5V）下的反向漏电流。

反向漏电流 I_R 是指给定的反向电压下流过器件的反向电流值，这个值的大小十分敏感于器件的质量。通常在 5 伏的反向电压下，反向漏电流应不大于是 10 微安，I_R 过大表明结特性较差。

反向击穿电压是指当反向电压大于某一值时，反向漏电电流会急剧增大，反映了器件反向耐压的特性。对一个具体器件而言，漏电流大小的标准有所不同，在较为严格的情况下，要求在规定电压下，反向漏电流不大于 10 微安。

（4）反向电压 V_R（V）：

LED 在指定反向电流下所对应的反向电压。

（5）最大容许反向电压 Vz（V）：

LED 所能承受的最大反向电压，即反向击穿电压超出此电压使用，将导致 LED 反向击穿。

（6）耗散功率 P_D（W）：

LED 的耗散功率 $P_D=I_F \cdot V_F$，耗散功率既是 LED 消耗的电功率多少。根据耗散功率的大小通常把 LED 划分为小功率和大功率，一般以 0.5W——1W 作为分界线。

（7）发光效率 η_e

发光效率简称光效，光源的发光效率定义为其光通量与所消耗功率的比值。即：

$$\eta_e = \frac{\Phi_v}{P_D} \qquad (0.12)$$

光效的单位是 lm/w（流明每瓦）。

通常白炽灯与荧光灯的光效分别为 15lm/w 与 60lm/w，灯泡的功率越大，光通量越大。对于一个性能较高的 LED 器件，光效为数十 lm/w，实验室水平达到 100lm/w 以上。为使 LED 器件更快地用于照明，必须进一步提高 LED 器件的发光效率，目前，LED 的光效可达 200lm/w。人类将会迎来一个固态光源全面替代传统光源的新时代。

0.4 LED 热学及其它特性参数

除了以上描述 LED 工作瞬时状态的光学和电学特性参数之外，在应用的角度， LED 的使用寿命以及工作状态的稳定性和可靠性等参数，以及与寿命和稳定性密切相关的热学特性，也是非常重要的特性参数。

①LED 的使用寿命与可靠性

LED 与传统光源相比较的一个重要优势就是其使用寿命长：一般而言，LED 的使用寿命在 50,000 小时以上，还有一些生产商宣称其 LED 可以运作 100,000 小时左右。LED 之所以持久，是因为它不会产生灯丝熔断的问题。LED 不会直接停止运作，但它会随着时间的流逝而逐渐退化。理论预测以及实验数据表明，高质量 LED 在经过 50,000 小时的持续运作后，还能维持初始灯光亮度的 60%以上。假定 LED 已达到其额定的使用寿命，实际上它可能还在发光，只不过灯光非常微弱罢了。通常，LED 的寿命结束不是指其不能发光的时间，而是指其光通量（或额定电流）下降到最初使用时一半的时间。

可靠性是在 LED 的工作（发光）期间，其各个主要特性参数保持在额定范围内的几率，这也是衡量 LED 产品优劣的一个重要指标。

②LED 的热学特性

影响 LED 寿命长短的最重要因素是散热的好坏，要想延长 LED 的使用寿命，就必须降低 LED 芯片的温度。对于单个 LED 而言．如果热量集中在尺寸很小的芯片内而不能有效散出．则会导致芯片的温度升高．引起热应力的非均匀分布、芯片发光效率和荧光粉激发效率下降。当温度超过一定值时．器件的失效率将呈指数规律攀升。

（1）结温及其对 LED 性能的影响

结温就是 LED 中 PN 结的温度，这是影响 LED 光学特性、电学特性以及寿命的最重要和最根本的参数。

据分析：元件温度每上升 2℃，可靠性将下降 l0％。为了保证器件的寿命，一般要求 PN 结的结温在 110℃以下。而且，随着 PN 结结温的升高，白光 LED 器件的发光波长将发

生红移。在 110℃的温度下．波长可以红移 4～9 nm，从而导致 YAG 荧光粉吸收率下降，总的发光强度会减少，白光色度变差。在室温附近，温度每升高 1℃．LED 的发光强度会相应减少 1%左右．当器件从环境温度上升到 l50℃时．亮度下降多达 35%。当多个 LED 密集排列组成白光照明系统时，热量的耗散问题更严重。因此解决散热问题已成为 LED 应用，尤其是功率型 LED 应用的首要问题。

（2）降低 LED 结温的途径

LED 的输入功率是元件热效应的唯一来源，能量的一部分变成了辐射光能，其余部分最终均变成了热，从而抬升了元件的温度。显然，减小 LED 温升效应的主要方法，一是设法提高元件的电光转换效率（又称外量子效率），使尽可能多的输入功率转变成光能，另一个重要的途径是设法提高元件的热散失能力，使结温产生的热，通过各种途径散发到周围环境中去。降低结温所采取的主要的途径如下：

1）减少 LED 本身的热阻；

2）良好的二次散热机构；

3）减少 LED 与二次散热机构安装介面之间的热阻；

4）控制额定输入功率；

5）降低环境温度

1 固晶

LED 封装生产主要分为固晶、焊线、封胶、分光与包装等几个生产环节。

固晶就是在 LED 支架的特定位置处涂上银胶或绝缘胶，将 LED 芯片放置于银胶（或绝缘胶）位置，令芯片被银胶（或绝缘胶）粘贴在支架的相应位置上，并经过烘烤而使之粘牢的过程。

由于固焊岗位操作是采用专用的自动化机器设备来进行，有时还需要配备较为复杂的手动固晶和焊线设备来进行辅助或补充的固晶焊线操作，对操作员的技术要求较高，因此，固焊岗位群是 LED 封装产线中重要的技术性岗位群。

8.1 固晶

目前，由于生产效率的要求，以及仪器设备自动化程度的提高，固晶工序一般是在高速自动固晶机上进行、固晶岗位操作人员的主要任务就是操作自动固晶机完成固晶操作。而在自动固晶进行之前，需先进行一个辅助工序——扩晶的操作。

8.1.1 扩晶

扩晶是固晶前的一项准备工作，其目的是将粘附于晶膜上的 LED 芯片（或称晶片）阵列中各粒晶片之间的距离拉大，以适于固晶机吸晶嘴吸晶的扩展状态。

扩晶操作在半自动的扩晶机上进行，扩晶机的外形以及扩晶前后芯片间距对比如图 1.1 所示。从图 1.1 中可见，扩晶后、芯片之间的间距比扩晶前大约扩大了一倍。

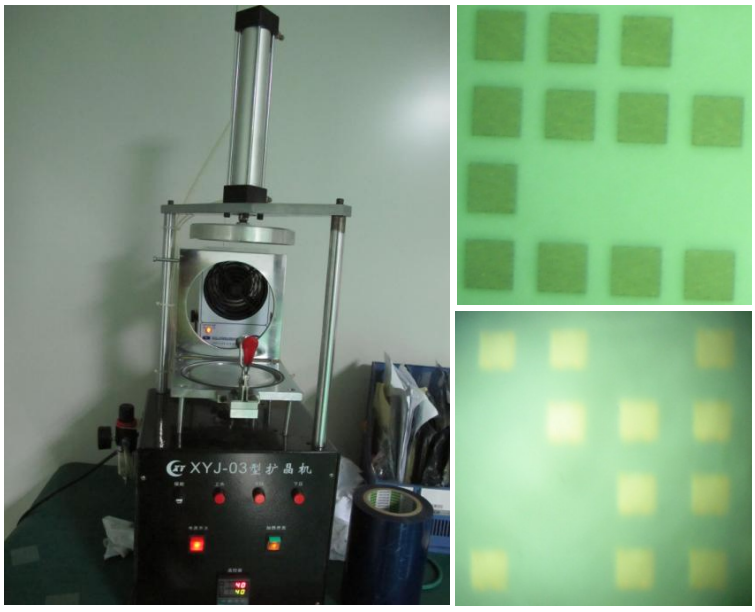


图 1.1 扩晶机（左）及扩晶前（右上）后（右下）晶膜

扩晶操作一般按如下步骤进行：

①开启机器；

②机器热板预热（按照所用机器的说明书设定预热温度）；

③放置待扩晶胶膜；

④胶膜预热（按照说明书规定的温度和时间预热）；

⑤扩晶操作；

⑥除去子母晶环外的多余膜片；

⑦取出子母晶环晶环，完成扩晶。

扩晶后的晶膜即可直接用于自动固晶，当然，也可用于手动固晶的环节。

8.1.2 自动固晶机结构原理

固晶的方法可采用手动固晶或自动固晶两种。目前，由于手动固晶效率低下，通常只在作为修补和实验之用。为了提高生产效率从而具备基本的竞争力，企业的实际生产线上固晶工序绝大多数都是采用自动化程度较高的高速自动固晶机来进行。

①自动固晶过程中的机器动作

高速固晶机自动固晶的过程是一个机器智能化程度较高的自动化生产过程。在生产过程中，机器需要完成以下一系列的动作或过程：从物料入口单元自动运送支架；自动识别出支架上的点胶位置；自动将银胶（或绝缘胶）点在支架上的点胶位置；自动运送芯片膜；自动识别芯片膜上芯片的位置；自动吸取芯片；自动将吸取的芯片运送至支架上已点上银胶（或绝缘胶）的位置并将芯片粘固在银胶（或绝缘胶）上；在机器上的支架全部完成固晶后自动暂停并提示更换支架；在晶圆上的芯片用完后提示更换芯片等等。

②自动固晶机结构原理

高速自动固晶机的生产厂商国内外皆有，比较著名的如国外的 ASM、国内的晶驰等品牌。以下以晶驰高速自动固晶机为例描述自动固晶机的结构原理。图 1.2 是晶驰高速自动固晶机



图 1.2 晶驰高速自动固晶机

的外形图。

为了能够自动完成以上描述的自动固晶工艺环节的各个动作，自动固晶机一般包括以下主要部件或功能模块，各部件或模块及其功能如下：

（1）固晶头及固晶臂：其上安装吸嘴，完成拾晶（吸晶）和固晶的动作；

（2）晶圆工作台：用于固定晶圆及带动晶圆移动到拾晶位；

（3）载板工作台及夹具：用于固定被固工件（即支架）及带动工件移动，根据所需固晶的支架类型不同、夹具也需要和其匹配订制；

（4）顶针及顶针环工作台：顶针工作台上安装顶针，其作用是将所要被拾取的晶片顶起，并通过顶针环真空吸晶圆使其脱离蓝膜，以便固晶臂拾取；

（5）晶圆子母环及切换工作台：晶圆子母环用于卡紧晶圆，晶圆切换工作台用于选择及切换当前工作晶圆；

（6）银浆头及银浆臂：其上安装点胶头，完成取浆和固浆（喷胶）动作；

（7）银浆盘：用于盛载及搅拌银浆或绝缘胶；

（8）显示器及触摸屏：用于显示及操作屏幕菜单，同时也显示工件及晶圆两侧的图像；

（9）载板镜头：用于摄取载板工作台上的工件图像；

（10）晶圆镜头：用于摄取晶圆工作台上的晶片图像；

（11）载板镜头 X-Y 调节基座：用于固定和调节载板镜头的位置；

（12）晶圆镜头 X-Y 调节基座：用于固定和调节晶圆镜头的位置；

（13）电源控制面板：开启机器及马达总电源；

（14）操控面板及抽屉：控制工作台位置及选取操作菜单；

（15）显示面板：显示机器一些主要受控部件当前工作状态；

（16）三色信号灯：提示操作员当前机器状态；

（17）主控箱：电脑控制部分；

（18）漏晶检测传感器组建：用于检测固晶臂在拾晶后吸嘴端部是否有晶片，以及在固晶后吸嘴顶部是否无晶片。

8.1.3 自动固晶岗位任务解析

要使得自动固晶机自动完成固晶过程，自动固晶岗位的操作技术员首先必须将机器各零部件调至正确的位置和状态，然后再设定好机器需要做的各个动作的位置与先后顺序，机器才能按照设定好的程序（通常称为程式以和计算机程序相区别）运行、进而完成整个固晶工作。

①机器设定与“三点一线”调节

机器设定除了包括正常的开机、关机维护和配套软件运行、以及常规的参数设定这些较为简单之外，主要的工作之一就是“三点一线”调节。

自动固晶机的自动固晶动作主要有两组：一组是吸晶、另一组是固晶，三点一线就是和这两组动作密切相关的机器部件之间位置的调节对准过程。

（1）吸晶过程的三点一线

吸晶（也称为拾晶）就是固晶臂摆动至晶片位置的正上方，然后安装了吸嘴的固晶头通过吸嘴的负压将晶片吸起的过程。但由于晶片是粘贴于晶膜上的，吸晶头的负压显然是不会大到足够克服晶膜的粘力而将晶片吸起这种程度的。所以机器设置了顶针这一部件，在吸晶之前，先从晶膜下面用顶针往上顶一段微小的距离，使顶针对正的晶片脱离晶膜，同时吸晶头进行吸取，这样就能完成吸晶的过程。显然，如果在吸晶时，顶针顶的位置和吸晶头吸取的位置没有对准、即两者不在同一条竖直线上，那吸晶动作肯定将会失败。因此，要进行机器的顶针和吸晶头的位置对准调节，此外，在机器运作的整个过程，吸晶动作都是被摄像头（即上文所述的晶圆镜头）全程监控的，通常令顶针和吸晶头的位置位于晶圆镜头的视场中心处，故称这一调节过程为吸晶过程的三点一线。简而言之就是顶针，吸嘴取晶位置，摄像头，这三者必须在同一条垂直线上。

（2）固晶过程的三点一线

固晶就是银浆臂摆动点胶头（银浆头），运动至银浆盘完成取浆、然后摆动到支架上将银奖点下（喷胶）完成固浆动作；其后固晶臂摆动吸晶头至支架上刚才固浆的位置并取消负压放下晶片，令其粘贴于银浆上从而完成固晶的过程。显然、如果点胶头固浆的位置和吸晶头固晶的位置没对准，固晶动作将会失败。因此，要进行机器的点胶头固浆位置和吸晶头固晶位置的对准调节，同样，在机器运作的整个过程，固晶动作都是被摄像头（即上文所述的载板镜头）全程监控的，通常令点胶头固浆位置和吸晶头固晶位置都位于晶圆镜头的视场中心处，故称这一调节过程为固晶过程的三点一线。简而言之就是顶针，吸嘴取晶位置，摄像头，这三者在同一条垂直线上。简而言之就是摄像头，点胶头点胶位置，吸晶头固晶位置，这三个点必须在同一条垂直线上。

以上两步的调节，即是自动固晶机的三点一线调节。

②固晶程式的设定（做 PR）

（1）固晶程式设定的步骤

一般而言，在一批产品即将批量生产之前，需要进行固晶程式的设定。因为不同规格的产品，使用的支架和芯片一般不会都是相同的，因此不能套用其它产品的固晶程式，而需进行新的设定。

固晶程式设定的步骤如下。

1）设置对点（设定固晶区域的大致范围）

这是固晶程式设定的第一个步骤，属于支架方的设定步骤，其意义为设定固晶区域的大体位置范围，其方法为设定两个对点（在晶驰自动固晶机配套软件中的术语称为“设置对点一”和“设置对点二”，也是软件设置界面该步骤的设置按钮名称）分别作为表示固晶范围的矩形区域的左上角和右下角，机器首先找到这两个对点，初步确定固晶区域的位置。

2）设置矩阵（设置各个固晶点位置）

这也属于支架方的设定步骤，其意义为设置好机器需要固晶的各个固晶点的具体位置。由于机器一般只能设置矩形的矩阵形式固晶点阵列，所以位置的设定首先是通过设置第一、第二和第三点来进行的，在单颗灯珠支架的情形下，第一点为左上角支架中心、第二点为右上角支架中心、第三点为左下角支架中心。这样，便设定了矩阵的大小，即行和列的最小、最大值位置所在。三点设定后，输入正确的行、列数中分别为 2 和 10，点击“计算矩阵”按钮就可设定出固晶点的矩阵各元素，即每一个固晶点的位置。

3）组群矩阵

这也属于支架方的设定步骤。因为一个夹具上可能有若干块支架片（例如通常的四行一列四块支架片竖排），因此要在各块支架片中把第（2）步的设置“克隆”一遍。这是通过组群矩阵功能来实现的，具体的做法与第（2）步类似，也是设置三个点：第一点为组群矩阵中左上角支架片的第一点、第二点为组群矩阵中右上角支架片的第一点、第三点组群矩阵中为左下角支架片的第一点，亦即个支架片的左上角支架的中心，如果是通常的四行一列四块支架片竖排，则第一点而第二点重合。设置好后，按“计算组群矩阵”按钮，机器即会把第（2）步的设置克隆到其余各块支架片中。

4）确认对点和各个固晶点

这也属于支架方的设定步骤。完成以上设置后，需在软件“程式重温”界面中对一块支架片上的各设定点进行确认，先确认对点，进而确认各固晶点。

5）确认组群

这也属于支架方的设定步骤。内容为组群中个支架块第一点的确认。

6）位置设定

完成了以上设置后即可进入“位置设定”界面进行点胶头和吸晶头正确高度的确认等工作，通常而言，三点一线也可放在这个步骤进行。

7）晶片设定

这是属于晶片方的设定步骤，可视为让机器能够识别晶片的 PR 过程。其目的是令机器能找到芯片的位置以完成吸晶动作，并指定机器在完成一次吸晶后搜索下一晶片的方向和间距。步骤有三个，分别为设定晶片一、晶片二和晶片三，这三块晶片是晶片阵列中相邻的三块晶片，相对位置分别为左上角、右上角和右下角。在晶圆镜头的视场中，用鼠标框住整块晶片的图像，其中心点即为相应的晶片设定点。

8）机器参数的再确认

完成晶片设定后即可进入“机器参数”界面进行机器参数的确认或设置，这一界面主要是吸晶动作相关的参数设置，例如晶片搜索范围等。

9）自动固晶界面的设置

之后进入自动固晶界面的设置。这一步骤首先再次确认对点一和对点二，定固晶点准确无误，其次设定吸晶动作的起始晶片（一般为角上），然后，需进行单个补浆操作，如补浆位置偏差较大需调节固晶点的位置，如补浆位置很正则进入下一步单步补晶，位置有误需再次调节固晶点的位置，如正确则重复两到三次即可完成整个 PR 设置工作。下一步就可进入自动固晶的生产流程了。

固晶机做 PR 可参考如下视频

自动固晶机做 PR 演示视频(二维码)(视频文件)

http://101.71.249.92/nz_rms/sites/default/files/mat_resource/led-zshj-ldfj-flv-01-0010zuo_pryu_wei_zhi_diao_jie_er_wei_ma__0.flv

③自动固晶运作流程

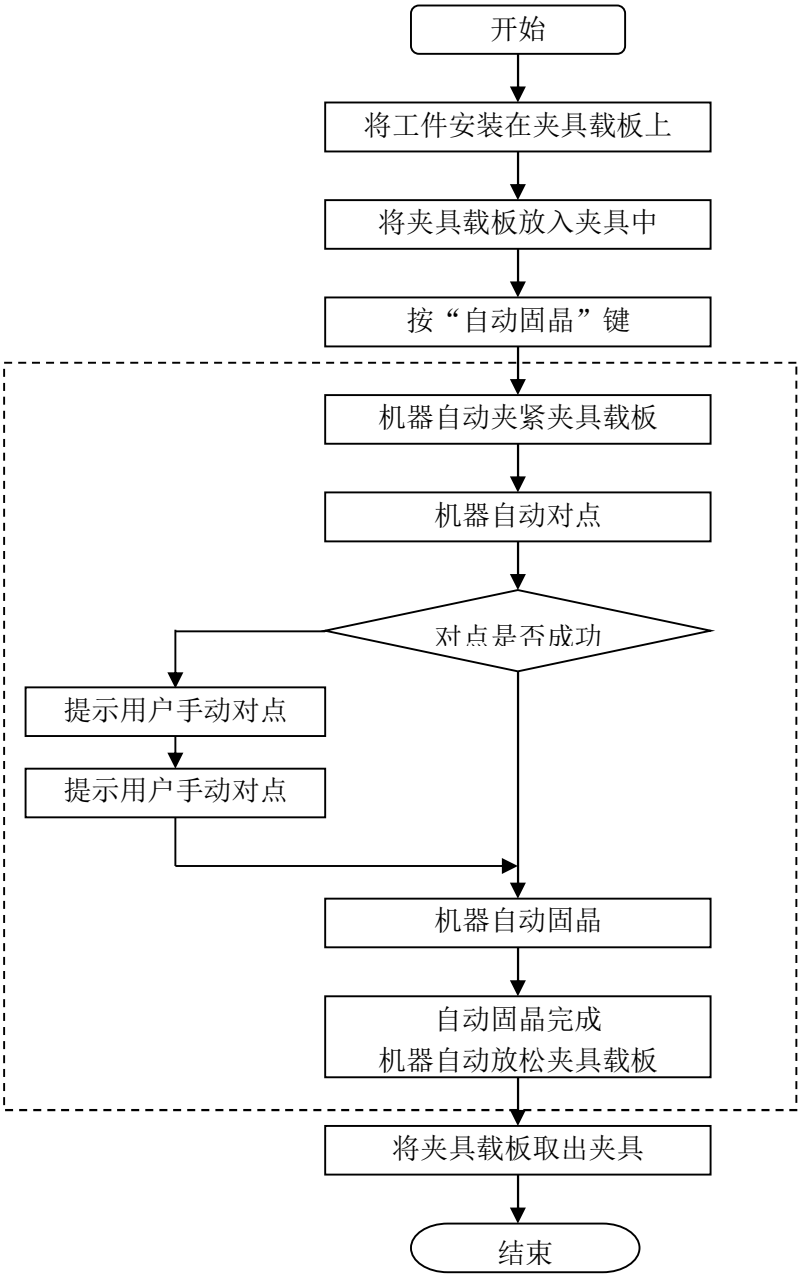


图 1.3 自动固晶流程图

在固晶机台安装及按以上步骤进行参数设置并完成后即可交由自动固晶岗位的操作人员使用而进行自动固晶的生产。

自动固晶的操作流程如下的图 1.3 所示，其各个步骤的说明如下：

（1）将工件安装在夹具载板上。安装时注意线路板定位孔的方向，且一定要工件在夹具载板上放平整，以免夹具夹紧时不能将工件压平。

（2）将夹具载板放入夹具中。正常情况下，此时夹具气缸应在松开位置，因此可将夹具载板直接放入夹具中，如果之前进行过其它操作，夹具气缸处于顶上的位置，则需先按“更换载件”按钮将气缸降下，然后再插入夹具载板。

（3）按屏幕上的“自动固晶”键或“开始固晶”按钮，使机器进入自动固晶流程。（注意：按此按钮之前，一定要使手以及身体其他部位离开机器夹具及其它运动部件，以免意外伤害）

（4）机器自动将夹具载板夹紧：夹具气缸将升起以夹紧夹具载板。

（5）机器自动对点：机器将根据程式的对点位置分别将载板工作台移动到第一和第二对点位进行自动对点，如自动对点不成功，机器将提示出现提示对话框，要求用户手动对点。用户可用推杆将工作台带到对点位，按“对点确认”输入手动对点；若由于载板影响校正做得不好而造成对点对不过，还可按“载板映像标定”按钮重做映像校正。

（6）机器自动固晶：正常情况下，机器将连续完成拾晶、固晶和取浆、固浆的动作。当出现漏拾晶或漏固晶时， 通过漏晶检测传感器进行检测，并重新拾晶或报警。在固晶过程中如需停下查看或进行其它操作，可按键盘上的“+”键停止固晶。

（7）固晶完成，机器自动将夹具载板放松：夹具气缸将下降松开夹具载板。

（8）更换夹具载板：从夹具中取出已完成固晶的夹具载板换上待固夹具载板，然后按“开始固晶”按钮开始下一次固晶循环。在机器进行自动固晶过程中，操作员可将固好晶的工件从刚取下的载板上取出，载板以备下次使用。

④自动固晶过程的主要被动暂停与解决方法

在自动固晶机自动固晶运行过程中，一切条件正常的情况下，机器会在支架用完以及芯片用完这两种情况下发生被动暂停，并提示操作员更换支架或芯片。

但在以下几种机器不能正常固晶的情形下，也会发生被动暂停。

（1）吸嘴堵塞

由于动作非常频繁，吸晶嘴有可能在生产过程中发生堵塞，此时，机器将会自动停下并提示操作员清晰吸嘴，此时，应在操作软件界面中设置将吸晶头摆至清洗位，清洗完毕后检验三点一线是否仍对准，如发生偏移需进行校正，其后再继续启动自动固晶流程。

（2）吸晶或点胶位置偏移

在吸晶或点胶位置发生偏移的时候，可能需要重做三点一线、或者重做 PR、或者两者都需要重做。

（3）芯片辨认时常出错暂停

原因之一是扩晶操作时参数不一致，导致前后各晶环中晶片间距之间的差别过大，这样，根据前一晶环所做的晶片 PR 在机器对后一晶环中的晶片进行识别时困难较大，导致无法识别而发生被动暂停，这时，可视暂停出现的频繁度决定重做 PR 或者手动操作。

2 焊线

固晶结束后的下一个工序就是焊线，也称引线焊接、压焊、键合等。焊线是 LED 封装生产中非常重要的一个环节，它通常是采用热超声键合工艺，利用热和超声波，在压力、热量和超声波能量的共同作用下，使焊丝焊接到 LED 芯片电极和 LED 的支架引脚上，完成 LED 芯片的内外电气连接，通电使之发光。焊线操作完成后，要求在显微镜下进行检查及拉力测试等，检测合格后才可进入下一站——封胶工序。

焊线需要通过焊线机才能完成。焊线机的发展经历了：手动焊线机——半自动焊线机（改装机）——低速全自动焊线机——高速全自动焊线机。目前全自动焊线机在 LED 行业应用已经很普遍，是 LED 行业封装不可缺少的设备，手动和半自动焊线机由于在产能上满足不了市场的需求，已经逐步被全自动焊线机所取代，只是作为补线用的辅助设备，用得较少。

2.1 全自动焊线机

全自动焊线机是一种集计算机控制、运动控制、图像处理、网络通信、由多个高难度 XYZ 平台组成一个非常复杂的光、机、电一体化设备，他对设备要求高响应、低振动、高效率、稳定的超声输出和打火系统、高精准的图像捕捉，焊接材料通过全自动上下料系统实现全自动循环焊接。广泛应用于生产发光二极管（LED LAMP）、SMD 贴片、大功率 LED、三极管、数码管（DIGITAL DISPLAY）、点阵板（DOTMATRIX）、背光源（LED BACKIGHT）和 IC 软封装（COB）CCD 模块和一些特色半导体的内引线焊接。

以目前使用比较普遍的全自动焊线机——ASM iHawk 自动焊线机（新加坡进口）为例，给予介绍，机台如图 2.1 所示。它主要有 PR 系统和 PC 系统两大系统组成，除此之外，还有其它辅助设备。



图 2.1　ASM 自动焊线机

①PR 系统

PR（Pattern Recognition）即模式识别，编辑图像黑白对比度（做 PR），目的是对点、点数、功能和动作的设定，它决定了焊线机生产过程中能否高效、精确以及自动化的程度。

②PC 系统

自动焊线机的 PC 系统主要是对信息数据进行处理并加以控制的作用，在焊线机中由多个控制模板构成。

③金线

LED 封装焊线主要是采用金线。封装不同光电器件所使用的材料有所不同，焊丝的材料大致有三类：金线、铝线和铜线。由于铜线和铝线在 LED 焊线中制程问题，焊线不太顺畅，质量不好，而金线和 LED 芯片上的金电极接合性较好，并且金线不易氧化，所以 LED 封装主要常用金线作为焊丝。

LED 金线是由纯度 99.99%以上的金（Au）材质拉丝而成，它在 LED 封装中起到导线连接的作用，将芯片表面电极和支架连接起来。安装在焊线机上的成卷金线如图 2.2 所示。

图 2.2 金线

④瓷嘴和打火杆

瓷嘴也叫陶瓷劈刀，是焊线机的一个重要组成部件，金线通过焊线机的送线系统最后到达瓷嘴，在瓷嘴上下移动的过程中完成烧球、压焊等操作。瓷嘴和打火杆在焊线机上的外形和位置如图8.16所示。

打火杆的高度、位置和水平度要设置好，要求：焊线窗 Window clamp 打开后，不会碰到打火杆；尖端低于劈刀尖一定程度；劈刀下降后，不会碰到打火杆；打火杆尖端应该保持水平。





图 2.2 金线　图 2.3 瓷嘴和打火杆

⑤进料盒和出料盒

进料盒一般在焊线机的左侧，出料盒一般在其右侧。如图 2.4 所示。进料盒和出料盒的升降都会与焊线进度很好配合，达到送料和出料及时不待机。





图 2.4 进料盒（左）和出料盒（右）

⑨其它辅助设备

焊线过程中还需要用到的工具设备有：拉力计、防静电环、镊子、挑晶笔、酒精、螺丝刀、夹具、铁盘、显微镜等等。它们在 LED 焊线过程中是不可缺少的。例如，检测 LED 焊线拉力大小的拉力计就是焊线环节中非常重要的一个 QC 工序；显微镜用于焊线结束后检查是否虚焊、松焊和焊歪等。

2.2 焊线机机台基本调整

①编程

当在磁盘程序〈DISK UTILITIES〉中，无法找到所需适用的程序时，就必须重新建立新的程序步骤如下：

（1）设置参考点（对点）
（2）编辑图像黑白对比度（做 PR）
（3）焊线设定（编线）
（4）复制
（5）设定跳过的点
（6）做瓷咀高度（测量高度）及校准可接受容限（即容差值）
（7）一焊点脱焊侦测功能开关设定

②校准 PR

PR 校正必须在有程序的情况下才能进行，当我们在焊线途中出现搜索失败或 PR 不良时，有必要重新校正图像对比度（即 PR 光校正）。它所包含以下 3 个步骤：

（1）焊点校正（对点）
（2）PR 光校正(做光)
（3）焊线次序和焊位校正

③升降台的调整（料盒部位）

2.3 焊线机机台更换材料时调机步骤

正常换单时，首先了解芯片及支架型号后再按照以下步骤进行调机：

①调用程序
②轨道高度调整
③支架走位调整
④PR 编辑（做 PR）
⑤测量焊接高度（做瓷嘴高度）
⑥焊接参数和线弧的设定

焊线机操作讲解视频 01 做 PR（二维码）(视频文件)

http://101.71.249.92/nz_rms/sites/default/files/mat_resource/led-zshj-ldfj-mp4-02-0002han_xian_ji_cao_zuo_jiang_jie_shi_pin_01zuo_prer_wei_ma__0.flv

2.4 焊线工艺规范要求

①焊接位置

（1）键合第一焊点焊接面积不能有1/4以上在芯片压点之外，焊线金球合格与不合格对比图如图8.28所示。

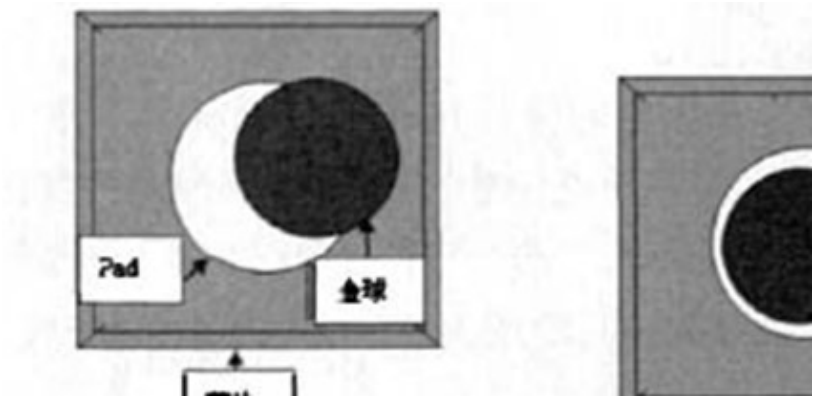


图8.28　第一键合点位置规范

（2）第二焊点不得超出支架键合小区范围，合格与不合格对比图如图8.29所示。

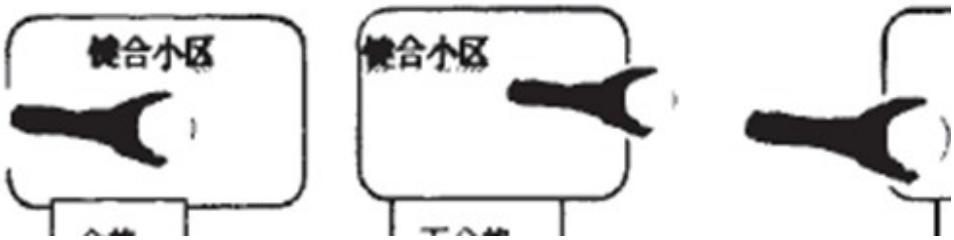


图8.29　第二键合点位置规范

（3）在同一焊点上进行第二次焊接时，重叠面积不能大于之前焊接面积的1/3；

（4）引线焊接后与相邻的焊点或芯片压点相距不能小于引线直径的1倍。

②焊点状况

（1）键合面积的宽度不能小于引线直径的1倍或大于引线直径的3倍；

（2）焊点的长度不能小于引线直径的的 1 倍或大于引线直径的 4 倍；

（3）不能因为缺尾而造成键合面积减少1/4，丝尾的总长度不能超出引线直径2倍；

（4）键合的痕迹不能小于键合面积的2/3，且不能有虚焊和脱焊；

（5）焊球大小：焊球的直径应该大于2倍金线直径，小于4倍金线直径；

（6）焊球厚度：焊球的厚度应该大于 1.2 倍金线直径，小于 2.5 倍金线直径。

③弧度要求

（1）最低：第一点的高度应该高出第二点的高度，形成第一点到第二点的抛物线形状；

（2）最高：不能高出晶片本身厚度的2倍。

④拉力控制

（1）0.8----1.0 金线：拉力>=5g

（2）1.0----1.2 金线：拉力>=6g

⑤引线要求

（1）引线不能有任何超过引线直径1/4的刻痕，损伤，死弯等；

（2）引线不能有任何不自然拱形弯曲，且拱丝高度不小于引线直径的6倍，弯屏后拱丝最高点预屏蔽罩的距离不应小于2倍引线直径；

（3）不能是引线下塌在芯片边缘上或其距离小于引线直径的1倍；

（4）引线松动而造成相邻两引线间距小于引线直径的1倍或穿过其他引线和压点；

（5）焊点预引线之间不能有大于30度的夹。

⑥芯片外观

（1）不能因为键合而造成芯片的开裂，伤痕和铜线短路；

（2）芯片表面不能因为键合而造成的金属熔渣，断丝和其他不能排除的污染物；

（3）芯片压点不能缺丝，重焊或未按照打线图的规定造成错误键合。

⑦其它

框架不能有明显的变形，管脚、基底镀层表面应该致密光滑，色泽均匀呈白色，不允许有沾污、水迹、异物、发花、起皮、起泡等缺陷。

2.5 焊线常见品质异常分析

①虚焊、脱焊

查看时间Time、功率Power、压力Force是否设定正确，预备功率是否过低，搜索压力是否过小或两个焊点是否压紧等。

A. TIME （时间）：一般在8-15MS之间。

B. POWER （功率）：第一焊点一般45-75之间， 第二焊点一般120-220之间。

C. FORCE （压力）：第一焊点一般45-65之间， 第二焊点一般120-220之间。

②焊球变形

第二焊点是否焊上或焊接功率是否设得过大，烧球时间或线尾是否设得过长， 支架是否压紧或瓷嘴是否过旧？

③错焊、位置不当

焊接程序和PR是否有做好,焊点同步是否设定正确,搜寻(Search)范围是否设得太大等?

④球颈撕裂

检查功率压力是否设得过大， 支架是否压紧？或者适当减小接触功率，瓷嘴是否破裂或用得太久？

⑤拉力不足

焊点功率、压力是否设得太大，支架有否压紧，瓷嘴是否已超量使用而过旧？（瓷嘴目标产能双线 800K/支）。

2.6 瓷嘴更换

需在主菜单界面下更换，将扭力扳手放在 2 公斤力矩下，松开磁嘴定位螺丝，取下磁嘴，左手用镊子将磁嘴放于磁嘴上表面与换能器上表面持平状态，用扭力扳手上丝时应旋转用力，不可前推，换完磁嘴后，校准磁嘴按 cha cap 键，依提示校准后，再做一下瓷嘴高度（详见 8.2.1 部分内容），然后穿线，再按 EFO 键烧球。进入焊线作业前要进行切线！

8.2.7 焊线过程中常见问题与解决方法

①虚焊

解决方法：将时间、功率、压力参数调大

②焊线弧度过高

解决方法：清洗瓷嘴并扭紧线夹

③断线

解决方法：调整机台工作稳定

④PR 认不到

解决方法：找相似度，重新对点

⑤焊不上线

解决方法：清洗线夹、更换瓷嘴，或更变焊线参数，直至更换金线

⑥尾线过长

解决方法：用镊子夹掉线尾并刮掉金球再单步焊接

⑦拉力不足

解决方法：调整拱丝参数，减小一焊、二焊参数，清洗送线系统

⑧塌线

解决方法：调整焊线弧度参数标准

⑨掉电极

解决方法：降低温度和功率参数，或芯片问题及时反馈给供货商

⑩金球过大

解决方法：调整机台功率压力参数合理

3 封胶

LED 灯珠须经过封胶环节，将硅胶注入盖有透镜的灯珠内，待硅胶凝固后即可保护焊点等内部结构，使 LED 灯珠在实际应用环境中，能够抵抗各种外界力量的冲击而保持其结构和功能的稳定性。

对于白光 LED 而言，与以上原因相同，也必须经过封胶环节。而且，作为灯具的白光 LED 采用色光（通常是蓝色光）激发其互补色（黄色）荧光粉而得到白光。因此，在封胶环节之前，还必须经过添加荧光粉的环节，将适量的黄色荧光粉通过配胶环节混溶于硅胶中，并将硅胶覆盖于蓝光芯片之上，这就是点粉环节。

3.1 LED 封胶原物料知识

封胶岗位群中用到的主要原物料是 LED 封装胶及用以产生白光的荧光粉。

3.1.1 LED 封装胶

①成分及主要特性

LED 封装中采用的胶水一般为有机硅胶或环氧树脂胶，两者相比较而言，硅胶的性能更佳。LED 封装中采用的硅胶一般由两种组分构成，分别称为 A 胶和 B 胶，A 胶为主胶，B 胶为固化剂，使用时将两者按一定比例（通常为 1：1）混合即可的得到 LED 封装所用的胶水。其主要特性如下：

（1）混合后粘度低，脱泡性好，颜色有透明，黑色，白色以及彩色等，一般根据需要采用，通常采用透明的胶水。

（2）常温下使用期长，中温固化速度快 2-3 小时，能受温度之变动及挠曲撕剥应力，无腐蚀性；

（3）固化后机械性能和电性能优秀，收缩率小，固化物透光性好。

②使用方法及要点

LED 封装胶在选型设计和使用时需要注意以下一些问题。

（1）从工艺的角度要考虑胶水和该批次的 LED 产品在混合后的黏度、固化后的硬度、混合后的操作时间、固化条件以及粘结力等方面是否匹配。

（2）从功能的角度要考虑折射率、透光率、耐热性能、抗黄变性能等方面的问题。

（3）使用的时候要注意以下问题。

1）注意要封胶的产品表面需要保持干燥、清洁；

2）按配比取量，且称量准确，请切记配比是重量比而非体积比；

3）A、B 剂混合后需充分搅拌均匀，以避免固化不完全；

4）搅拌均匀后请及时进行灌胶，并尽量在可使用时间内使用完已混合的胶液；

5）有些 A、B 胶可搭配扩散剂和色膏使用，添加剂用量一般为 2%-6%

（4）以下是封装胶使用的一些典型数据。

1）混合比例：A：B = 100：100（重量比）

2）混合粘度 25℃： 650-900cps

3）凝胶时间：150℃×85-105 秒

4）可使用时间：25℃×4 小时

5）固化条件：初期固化 120℃-125℃×35-45 分钟，后期固化 120℃×6-8 小时或 130℃×6 小时

3.1.2 荧光粉

20 世纪 90 年代中期，日本日亚化学公司的 Nakamura（中村修二）等人经过不懈努力，突破了制造蓝光发光二极管（LED）的关键技术，并由此开发出以荧光材料覆盖蓝光 LED 产生白光光源的技术，开创了半导体照明的新纪元。

①白光 LED 的荧光粉实现方法

目前所采用的方法是在蓝色 LED 芯片上涂敷能被蓝光激发的（YAG）黄色荧光粉，芯片发出的蓝光与荧光粉发出的黄光互补形成白光。该技术被日本 Nichia 公司垄断，而且这种方案的一个原理性的缺点就是该荧光体中 Ce3+离子的发射光谱不具连续光谱特性，显色性较差，难以满足低色温照明的要求，同时发光效率还不够高，需要通过开发新型的高效荧光粉来改善。

②LED 荧光粉的特性

LED 用荧光粉的重要特性需求包含：适当的激发光谱、适当的放射光谱、高能量转换效率、高安定性等。其中以前两项最重要。

（1）激发（Excitation）特性

荧光材料在白光 LED 的应用当中，激发波段与发光颜色的匹配，是最重要的先决条件，目前应用荧光材料所制作的白光 LED，其 LED 之放射波长多属于近紫外线或紫、蓝光范围，是故荧光材料之适用激发特性为在 350～470 nm 之波段范围内，可以被 UV-LED or Blue-LED 所激发者。

（2）发光（Emission）特性

荧光材料之发光特性可以其发光光谱（Photoluminescence Spectrum；PL）来判断，其亦可利用荧光光谱仪量测获得。除此之外，发光特性亦可应用色度坐标分析仪所量测之色度坐标（CIE Chromaticitycoordinates）值，进行辅助判断，如此更能完整了解荧光材料之发光特性。

③白光 LED 荧光粉配比浅析

萤光粉在 LED 制造过程起着至关重要的作用。白光 LED 的显色指数（CRI）与蓝光芯片、YAG 萤光粉、相关色温等有关，其中最重要的是 YAG 粉，不同色温区的 LED，用的粉及蓝光芯片不一样。目标色温越低的管子用的粉发射峰值要越长，芯片的峰值也要长，低于 4000K 色温，还要另外加入发红光的粉，以弥补红成分的不足，达到提高显色指数的目的，在保持的芯片及粉不变的条件下，色温越高显色指数越高。

在生产中总结出来的经验来看，白光 LED 中，蓝光芯片与 YAG 荧光粉的最佳匹配关系如表 9.1 所示。

表 3.1 蓝光芯片峰值波长与 YAG 荧光粉发射峰值波长的最佳匹配关系

YAG 发射峰值/nm	蓝光峰值波长/nm
530±5	450-455
540±5	455-460
550±5	460-465
555±5	465-470

按照表 3.1 的配比做出的白光 LED 色度比较接近正白，即色温适中，不偏暖色也不偏冷色。

一般芯片厂家提供的都是主波长，峰值波长要用专门仪器测试，测出来的值一般都比主波长短 5nm 左右。萤光粉与芯片波长决定了色座标中一条直线，确定了萤光粉与芯片波长，只要增加减少配比就可以调节色座标在此直线上，这就是白光 LED 制作中荧光粉配比的基本原理。

荧光粉的需要添加并调匀在硅胶中才能正常使用。YAG 萤光粉和 AB 胶之比例一般为 1：6 ~ 10（重量比）。至于 AB 胶应为 6 ~10g 之间的多少数量，必须视蓝色芯片的功率大小做调整。芯片功率大者，在萤光粉数量固定不变下，AB 胶数量应较为少（例如 1：6）。反之，功率小者 AB 胶数量应较为多（例如：1：10）。

3.2 LED 封装封胶岗位群工序与岗位任务介绍

LED 封装中封胶的工序和具体工艺步骤因 LED 的类型（封装形式）不同而有一定区别，以下以工序较为完整的大功率白光 LED 的封胶为例，说明 LED 封装中封胶岗位群的主要工作步骤和相关知识。

大功率白光 LED 封胶岗位群包括配胶、自动点粉、补粉（补粉后需烘烤）、盖透镜及压边、灌胶（灌胶后需经短烤和长烤两个步骤的烘烤）等 5 个工序的不同岗位，如图 9.1 所示。

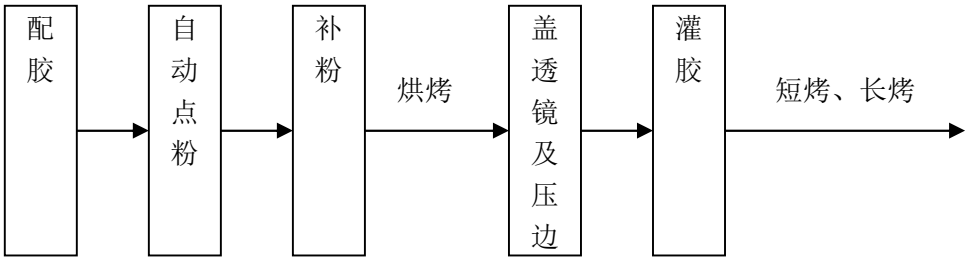


图 3.1 大功率 LED 封胶岗位群工序流程图

大功率色光 LED 的封胶环节不需要点粉工序，将其相应步骤略去即可。

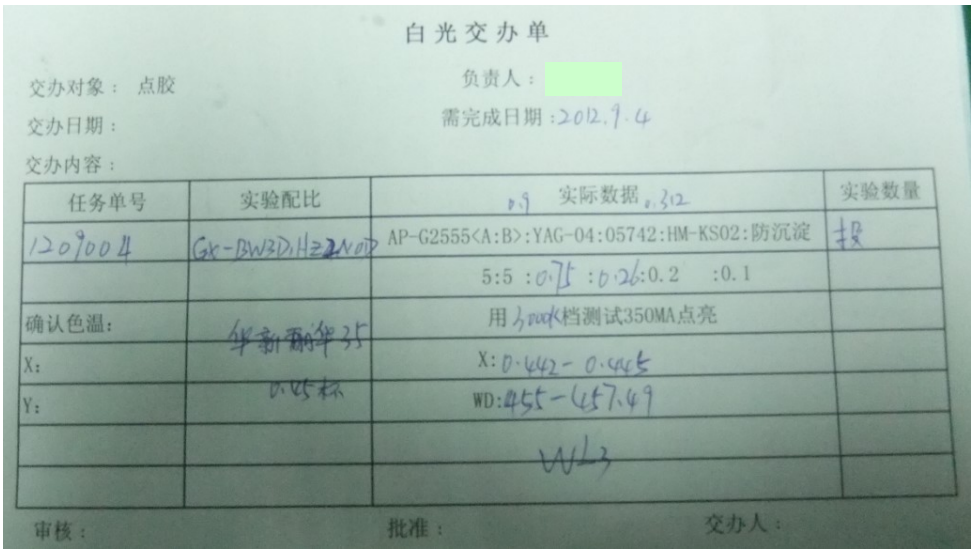
3.2.1 配胶

配胶岗位包括两个类型的工作：

其一是对白光 LED 产品，称量和配比各种物料比例合适的荧光胶，以使 LED 产品能按照设计的要求产生所需光度和色度特性的白光；

其二是配比用于色光及白光 LED 封胶的硅胶。

因为配硅胶的操作步骤完全包含于配荧光胶步骤中，以下主要说明配荧光胶的过程，荧光胶的过程包括配比单识读、物料称量、搅拌和抽真空四个环节，具体步骤如下：


白光交办单

交办对象： 点胶　　负责人：

交办日期：　　需完成日期：2012.9.4

交办内容：

任务单号	实验配比	实际数据	实验数量
1209004	GK-BW3D1H2N0D	AP-G2555<A:B>:YAG-04:05742:HM-KS02:防沉淀	投
		5:5 :0.75 :0.26:0.2 :0.1	
确认色温：		用3mok档测试350MA点亮	
X：		X:0.442-0.445	
Y：		WD:455-457.49	
		W23	

审核：　　批准：　　交办人：

图 3.2 大功率 LED 配胶物料配比单

①配比单识读与物料称量

配比单是白光 LED 配荧光粉工序中指定各种物料比例生产指令单。配比单识读是配胶岗位的基本知识要求，图 3.2 是某大功率 LED 公司的 LED 配荧光粉工序配比单。

在图 3.2 中，指示了配胶工序中一共用到 5 种物料，分别为硅胶中的 A 胶、B 胶、黄色的 YAG-04 荧光粉、红色荧光粉 05742、扩散粉 HM-KS02 以及防沉淀粉。其中硅胶的作用是荧光粉的载体、YAG-04 为主要荧光粉、红色荧光粉 05742 的作用是产生较低的色温、HM-KS02 是扩散粉：由于荧光粉是小颗粒，在胶水中会沉淀或者分布不均匀，在点下去以后就会影响 LED 的光斑等，因此要加扩散粉，扩散粉就是加一定比例在胶水中，可起到光学扩散即增加漫反射的效果，但加多了的话会影响亮度、防沉淀粉就是专门防沉淀的。

物料称量步骤：将配胶杯置于电子天平上，依次按原料配比单的指定质量，称出荧光粉、防沉淀粉、A 胶、B 胶。电子天平的使用注意运用“去皮”这一功能，即令当前的测量质量显示值为零的功能，这样可以避免对各物料的指定质量作加法这一不必要的步骤。



图 3.3 配胶子工序之电子天平称量物料

②搅拌

用搅拌杆将所配物料搅拌均匀，搅拌时间 5～6 分钟。也可采用自动搅拌机搅拌，自动搅拌机结构如下的图 3.4 所示。

③抽真空

将搅拌后的配胶杯放入抽真空箱中，抽去胶水中因搅拌而形成的气泡（很细微、肉眼不可见）。

抽真空的过程中，在操作时要**注意通过手动控制真空箱进气阀的开关时开时合，以逐渐减小真空箱内压强**，以免将箱内迅速抽成真空，从而造成胶水泡发溢出的工序事故。

箱内抽成真空后，需保持一段时间使胶水的真空状态稳定下来。白光 LED 的荧光胶保持时间 8 分钟左右，灌胶的胶水保持时间 15 分钟左右。



图 3.4 配胶子工序之搅拌（自动搅拌机）



图 3.5 配胶子工序之抽真空机

抽真空之后配胶环节就结束了。配好的荧光胶可用于下一工序：点（荧光）粉，或称点胶。

3.2.2 自动点胶

点荧光粉（或称点胶）岗位的任务是将融有荧光粉的适量的荧光胶覆盖在焊线完成的 LED 灯珠半成品的芯片上，使之能够发出与设计要求的光学参数一致的白光。目前，该工序通常在自动点粉机上进行自动点粉。本工序使用到的机器设备、测试仪器及附件主要有自动点胶机、胶筒以及光色电参数测试仪（含计算机）等。



图 3.6 分立仪器型自动点胶机



图 3.7 整体机器型自动点胶机

自动点胶工序包括点胶程序设定、胶筒准备、单支架测试、量产测试和量产运作四个步骤，具体可参考如下视频：

自动点胶（二维码）（视频文件）
http://101.71.249.92/nz_rms/sites/default/files/mat_resource/led-zshj-ldfj-flv-03-0005zi_dong_dian_xiao_er_wei_ma_.flv



①点胶程序设定

点胶程序设定类似于自动固晶或自动焊线中的程序设定即做 PR（也包括三点一线对准）的过程，但由于机器的点胶动作相对固晶和焊线而言较为简单，点胶程序设定和固晶和焊线的程序设定相比也较为简单。

设定好程序和参数后，就可按步骤进行点胶操作了。以下以分立仪器型自动点胶机的自动点胶过程为例进行说明。

②胶筒准备

卸下自动点粉机上的胶筒，清洗干净，倒入上一工序配胶配好的荧光胶，接上自动点胶机的气管，将出胶嘴处的空气排干净。

③单支架测试

根据生产任务单指定的波长即色温范围，设定好大致的通气时间（影响胶量的多少）。将自动点粉机设定成手动单步模式，每次对单个支架进行点粉，用**光色电参数测试仪**测试单个支架的光学特性，调整通气时间，直至在光色电参数测试仪上光色电参数测试通过，确定初步的通气时间。

④量产测试

在自动点粉机上，对一片支架（含 20 个）自动运作进行点粉，但点完该片支架后，需

停下，并在光电参数测试仪上对该片支架上的每一个支架进行光色电参数测试，如果大部分支架的粉量均合格，则可进行量产运作。如接近一半支架的粉量不合格，则需调整通气时间再重新测试，直到大部分支架的粉量合格为止。

⑤量产运作

让自动点粉机进行量产运作，同时在适当的时候手工放入未点粉的支架，以及取出点好粉的支架。每点完四片左右支架的时候，取出一片支架让补粉人员马上实时测试整块支架中各支架粉量是否符合要求，必须保证大部分支架风量符合要求，如接近一半支架不符合，则需实时调整通气时间，使粉量达到正常。

3.2.3 补粉

由于事物的随机性，自动点胶机点胶后，整片支架中不可避免地会有若干个支架的粉量超出正常的设定范围，可能多，也可能少。因此，必须通过补粉环节，对自动点粉后的每一片支架，均利用光色电参数测试仪进行测试，对其中粉量不合格的支架进行人工的补粉操作，粉量多支架的需要用补粉针去除多余的荧光胶，粉量少的需要用补粉针添加一些荧光胶，直到该片支架上的每一个支架的粉量均符合要求。

因为所需添加和去除的粉量非常细微，补粉工作需要非常细心地操作。

补粉视屏可扫描以下二维码



图 3.8 补粉工序仪器设备

补粉后的支架，需要进烤箱烘烤，以除湿及固化。烘烤温度 150° C，时间 120 分钟。

3.2.4 盖透镜及压边



图 3.9 自动盖透镜机 左：分立型 右：透镜片型

本工序包括盖透镜和压边两个环节。其主要任务是将透镜盖在已近补好粉的支架上，并将盖好的透镜的底边压紧。

盖透镜操作是在自动盖透镜机上进行，操作较为简单。自动盖透镜机一般又分为两种类型，一种是分立透镜型，另一种是透镜片型。而分离透镜型机器中，透镜是一个一个分立的，机器需将透镜一个一个地盖到支架片上；透镜片型则是若干个（一般为 20 个）组成一个透镜片，与支架片对应，机器可一次将透镜片中的 20 个透镜盖在 20 个支架组成的支架片上，提高了生产效率。

压边操作是在自动压边机上进行，操作也较为简单。压边机参数设定主要有温度（一般可设为 220° C），以及压边时间（一般可设为 3.5 秒）。

由于以上两岗位较为简单操作，属于产线后工序（封胶与分光检测）中的普通型通用岗位。

盖透镜及压边可参考以下视频

3.2.5 灌胶

灌胶工序的任务是在盖好透镜并压好边的支架中灌入硅胶（A、B 胶），以对芯片、金线等灯珠内部结构进行必要的保护，并自然形成会聚光线的透镜：前一工序盖透镜只是盖上了



图 3.10 自动压边机

一个透镜壳，只有灌入硅胶，才能形成透镜。

根据不同类型的 LED 封装过程，灌胶工序有着较大的不同。

以下以贴片式的大功率 LED 为例说明灌胶工序的主要原理和步骤。

灌胶是在半自动的灌胶机上进行的，压好边的支架，其透镜的底部有两个小孔，一个用于进胶，另一个用于出气。操作时，首先将灌胶筒的气管接通灌胶机主机，将灌胶筒的针头插于进胶孔上，脚踏灌胶机的气压开关即可启动灌胶，待灌满透镜腔后，松开脚踏即可停止灌胶。多余的胶水用抹布擦除。

如果手部操作熟练之后，可以启动灌胶机的半自动模式，即设定灌胶机的喷胶周期，令其周期性地喷胶，从而可以省去脚部的动作。

此外，也可采用自动灌胶机进行自动灌胶操作，每次可灌一个支架片（20 个支架），但自动灌胶之后，仍需要进行手动的补胶操作才能确保灌胶合格。



图 3.11 灌胶设备与操作 左：手动 右：自动

灌胶后的支架，需要进烤箱中分两个阶段进行烘烤。

首先，在烘烤温度 100° C 下，进行时长 60 分钟的烘烤，称为“短烤”；

其次，仍在烘烤温度 100° C 下，进行时长 240 分钟的烘烤，称为“长烤”；

最后，长烤后的支架待其在停止烘烤的烤箱中温度自然回落到 80° C 以下就可取出并进行下一工序的加工。

4 分光

分光属于成品检测的范畴，但由于分光是 LED 产品特性参数检测和区分的重要环节，加上自动分光机的操作也是LED封装行业产线上重要的岗位，而且对应着不同类型的LED产品，分光过程以及分光后的包装也有着较大的差异，因此，通常仍然将分光界定为 LED 封装中一个重要的产线操作岗位。

在大功率 LED 封装生产线中，分光与包装岗位群包括拨料、自动分光、包装三个工序。

4.1 拨料

拨料是使每一个支架从整个支架片框架中分离出来的过程，是针对贴片式支架大功率 LED 的一个工作环节。在直插式支架 LED 的生产中，与之相对应的是切脚，即半切、全切等工序。

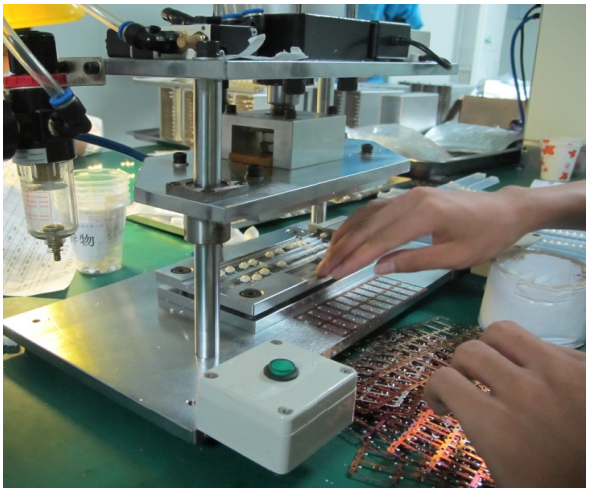


图 4.1 拨料机与拨料操作

拨料通常是在半自动的拨料机上进行，机器对整个支架片操作，将每一个支架和支架片相连接的部分同时压拨断裂，从而使各支架从支架片上分离出来，形成一个一个的 LED 灯珠，这时的 LED 灯珠，实际上已经是成品。但还需要通过分光工序的检测使之按照性能进行分类，以满足各种不同的客户要求。

由于大功率 LED 分光机通常使用料条来送入待分光的 LED 灯珠，故在拨料这一环节中，还包含手工将拨料后的每个 LED 灯珠，按照相同的正负极性排列装入空料条的过程，每条料条装入固定数量的灯珠（例如 50 颗）。

本工序的要点是放入料条中的灯珠极性排列一定要相同，否则将加大下一个工序-自动分光的返工率。

4.2 自动分光

分光是将前面各工序生产出来的 LED 灯珠按照其光通量（亮度）、波长（或色温）以及电学特性进行检测和分批，以将某一批次的产品划分为本批次合格品、等外品以及次品的过程。本批次合格品是指光色电参数完全达到本批次生产任务单要求的产品；等外品是指特性参数和本批次的生产任务单要求有一定出入，但仍属于合格品范畴，可先库存，待以后有客户需要用到该特性参数的产品时即可作为该批次合格品出厂；次品是指光色电参数中明显有缺陷的产品，例如各种原因的不亮、颜色和设计要求差异迥异、亮度明显不足等。



图 4.2 大功率 LED 自动分光机

分光工序一般在自动分光机上进行。自动分光机是一种能自动对 LED 灯珠进行光色电特性参数进行在线批量检测的机器，大功率 LED 自动分光机外观结构如图 4.2

所示：

在理想的情形下，只要人工将拨料工序后装满 LED 灯珠料条堆放与自动分光机的进料单元，预先安装好出料口处的空料条，及时取出各出料单元的已分光的满料条，并将其送到包装环节即可，机器会自动完成分光过程的运作。

但实际上，由于机器本身的运作过程存在着很多不确定的因素，加上生产中采用的 LED 的支架，在尺寸上总会有一定的误差范围。因此，物料在分光机上运行的整个过程中，不可避免会在机器的各个衔接处出现卡料而发生被动暂停的想象，需操作人员及时手工处理。

因此，分光操作员的主要操作包括以下内容：

设定自动分光机的日常分光参数、装待分光料条、处理被动暂停、更换出料口满、空料条以及已分光满料条送临时包装袋等。其操作要点简介如下：

①分光参数设定

分光参数设定是分光工序的重要操作内容，其具体任务是在自动分光机配套的分光软件的设置界面中，通过输入波长、色品坐标、工作电流、光通量、正向电压等参数的各区域允许值而使自动分光机将某一批次的 LED 灯珠按照设定的参数进行分批。分光参数设定的相关规定和要求可因各企业的不同而有所差异，但其主要内容均是对产品划分出波长、色品坐标、工作电流、光通量、正向电压等参数的不同范围并依次分级和命名。

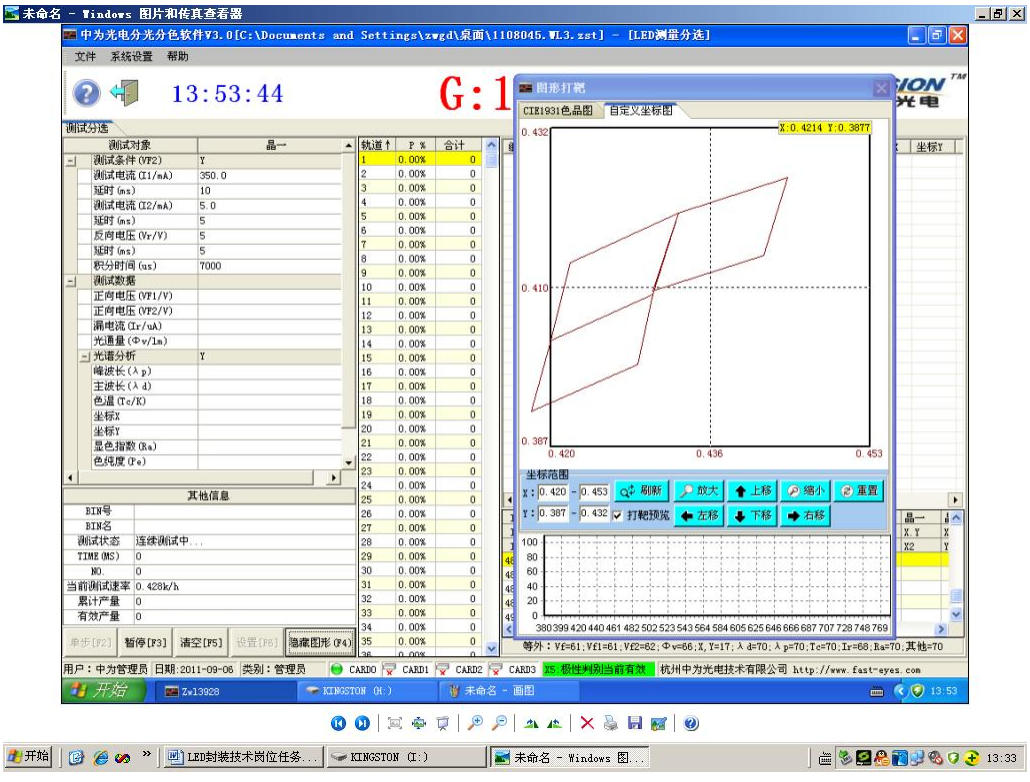


图 4.3 自动分光软件主界面

自动分光机软件的主界面如图 4.3 所示，在主界面的“系统设置”子菜单中，选取“参数设置”菜单项即可唤出参数设置界面，在参数设置界面中即可进行各项参数设置。主界面的文件子菜单的菜单项还可实现保存和读取当前的参数设置、以及将当前分光统计数据导出成 EXCEL 文件的功能。

在“参数设置”的子菜单中即可实现色品坐标、工作电流、光通量等参数的设置，如图 4.4 是主要参数色品坐标的设置界面图，在该界面中，可对色品坐标的 x 和 y 参数值进行设

定，划定出分光的各个不同区域。其余参数的设定类似，设定分光参数后，即可启动分光机自动分光功能进行自动分光。

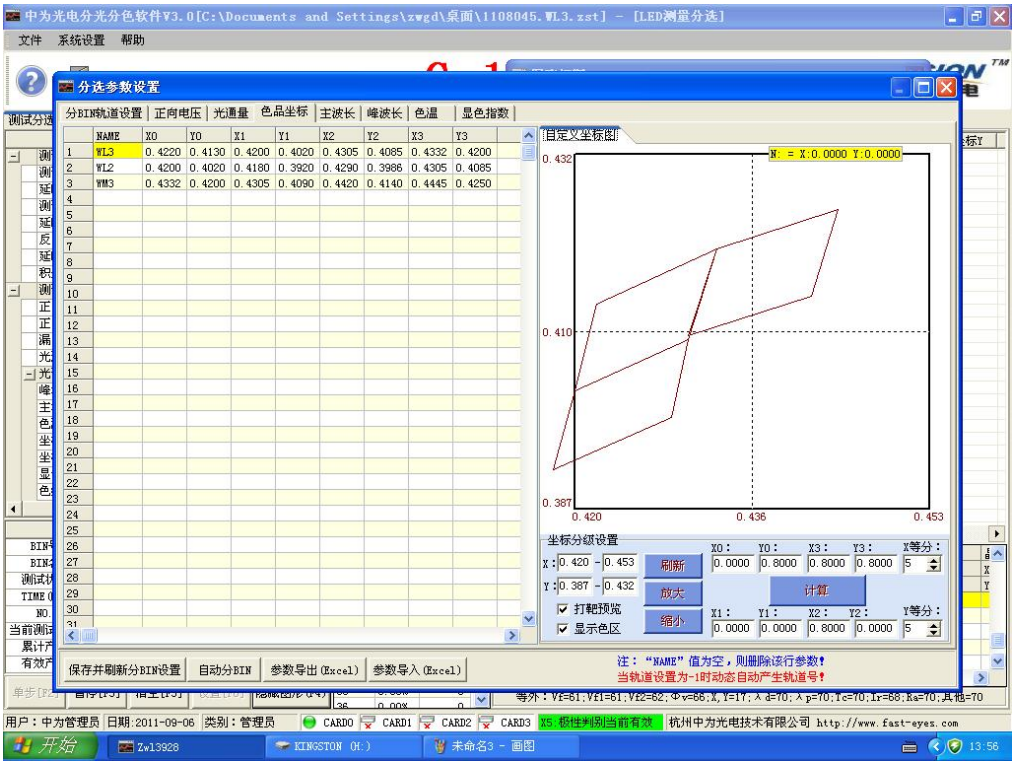


图 4.4 分光参数设置：色品坐标

②装待分光料条

装料条操作的关键点是按照料条中灯珠的正确极性方向（负极朝上），将料条放置在进料单元处，否则自动分光机将无法对该料条中的灯珠进行分光。

装料条时，如果生产过程中机器出现的卡料而被动暂停的次数很少，可以一次装入多条料条。否则，如果机器被动暂停较多，则装料条时应该一条一条地装，待上一料条分光完毕再装入下一料条。以免在发生卡料时，自动分光机的进料识别系统误认为是上一料条以处理完毕而去抓取下一料条，从而造成上一料条中灯珠散落而影响整个分光工作的效率。

③处理被动暂停

被动暂停主要由以下两个原因造成：

（1）卡料

卡料的主要原因之一是支架尺寸的不标准，尤其是某一批次的支架尺寸较大，则容易造成在导轨中的某一段移动受阻，从而使系统发生暂停。

处理方法：用手扳或钝针捅的方法使之回复移动而解决暂停。经常发生暂停的地方主要是进料槽以及各 bin 的出料槽处，处理后即可解除暂停。

处理卡料而造成的被动暂停时常需要将挡板扳下，或将分光积分球拉出。

（2）某一出料 bin 的料条已满。

将其取出，塞好端口后放入相应 bin 号的装袋中。在机器上相应 bin 号处更换上新的空料条后，暂停即可解除。

④成品料条分装

将各分光机分出的各 bin 料条装入相应 bin 的袋中。

自动分光机分光操作参见以下视频

自动分光视频（二维码）(视频文件)

http://101.71.249.92/nz_rms/sites/default/files/mat_resource/led-zshj-ldfj-mp4-04-0001zi_dong_fen_guang_shi_pin_.flv



5 LED 检测技术

经封装工序得到 LED 灯珠后，作为一种新型光源，实际应用中还要根据需求配置适当灯具，其具有各种各样的特性参数，不同的应用场合对各种参数的要求各不相同，本章将介绍 LED 的光、色、电、热等参数及其常用的测量设备和测试方法。

5.1 LED 的测试参数

LED 常见的测试参数如表 5.1 所示。

表 5.1 LED 常见测试参数

参数类型	基本参数	符号	单位	基本定义
光参数	光通量	Φ	流明 lm	光源在单位时间内发出的能量（其中人眼所能感觉到的）
	发光强度	I	坎德拉 cd	光源在指定方向的单位立体角内发出的光通量
	光照度	E	勒克斯 lx	被光均匀照射的物体，在单位面积上得到的光通量
	峰值波长	λ	纳米 nm	光谱辐射功率最大的波长
	半强度角	$\theta_{1/2}$	度 °	最大发光强度一半所对应的角度
	最大光强角	θ_m	度 °	取得最大光强值所对应的角度
	光通量效率	η	流明每瓦 lm/w	LED 发射的光通量与其电功率的比值
色参数	光谱光视效率函数	V（λ）		人眼对各种波长光的平均相对灵敏度
	色品坐标	（x，y）		根据光谱功率分布 P（λ）曲线，用分光光度法求和来近似积分
	主波长	λ	纳米 nm	任何一个颜色都可以看作为用某一个光谱色按一定比例与一个参照光源（如 CIE 标准光源 A、B、C 等，标准照明体 D_{65} 等）相混合而匹配出来的颜色，这个光谱色就是颜色的主波长
色参数	显色指数	Ra		光源对物体本身颜色呈现的程度称为显色性，光源显色性由显色指数表明，表示物体在光下颜色比基准光（太阳光）照明时颜色的偏离，CIE 把太阳的显色指数定为 100
	光谱半宽度	△λ	纳米 nm	相对光谱能量分布曲线上，两个半极大值强度处对应的波长差
	色温	T	开尔文 K	以热力学温度（K）表示，即将

				一标准黑体加热，温度升高到一定程度时颜色开始由深红—浅红—橙黄—绿—蓝逐渐改变，当加热到与光源颜色相同时，我们将黑体当时的热力学温度称为该光源的色温
	色纯度	P		样品颜色接近主波长光谱色的程度表示该样品颜色的纯度
电参数	正向电流	I_F	安培 A	LED 正常发光时的正向电流值，由 LED 芯片决定
	正向电压	V_F	伏特 V	通过发光二极管的正向电流为确定值时，在两极间产生的电压降
	最大反向电压	V_{RM}	伏特 V	所允许加的最大反向电压。超过此值，发光二极管则出现反向电流突然增加而出现击穿损坏现象
热参数	结温	T_j	摄氏度 ℃	在工作状态下，P-N 结的温度
	热阻	R_{th}	摄氏度每瓦 ℃/W	在热平衡条件下，导热介质在两个规定点处的温度差，即热源
	温度系数	K	摄氏度每毫伏 ℃/mV	材料的物理属性随着温度变化而变化的速率

LED 在生产后要根据应用要求进行参数测试，针对 LED 光、色、电、热等参数，主要使用 LED 光色电综合测试系统、荧光粉激发光谱与热猝灭分析系统和 LED 热阻结构分析系统等三个设备进行检测。

5.2 LED 光色电综合测试系统

5.2.1 功能简介

ZWL-9200 型光色电综合测试系统是一款针对 LED 光通量、色温、波长、显示指数、色纯度、电流、电压、电功率、光效率等全性能的检测设备。通过模拟视觉函数对不同颜色的谱线自动修正，达到最精确测试，且对不同功率 LED 测试速度都在 ms 级，所有测试条件符合 CIE 相关标准。

5.2.2 技术参数

表 5.2 测试系统技术参数

	功能	参数范围	精度	分辨率
电参数	正向电压测量	1.000V～45.000V	≤ 5V：± 0.2% 键值 +0.01 V ＞5V：±0.2%键值	0.015V
	驱动电流	0-5A	≤300 mA：±0.2%键值 +0.001A ＞300 mA：±0.2%键值	<1.5A，分辨率 0.001A ≥1.5A，分辨率 0.003A

光参数	光通量测量	0-4000.00lm	3%f.s.	0.001lm
色参数	波长范围	380-780nm（可扩展测紫外、近红外）	＜600nm 0.4nm ＞600nm 1.0nm	0.19nm
	显色指数	0-100	1	1
	色品坐标	X、Y 和 U、V	0.003	0.0001
	色温	1300-25000k	0.05%f.s	1K

5.2.3 工作环境

- 环境温度：23℃±5℃；
- 相对湿度：55％±25；
- 电源电压：220V±11V；
- 电源频率：50～60HZ；
- 空间环境：无强烈的机械振动、冲击、强电磁场。

5.2.4 测试系统主要仪器及使用

此测试系统主要由测试系统柜、积分球和计算机测试软件组成，其中，大积分球适用于灯具光色电综合测试，小积分球适用于灯珠光色电综合测试。具体如图 5.1 所示。

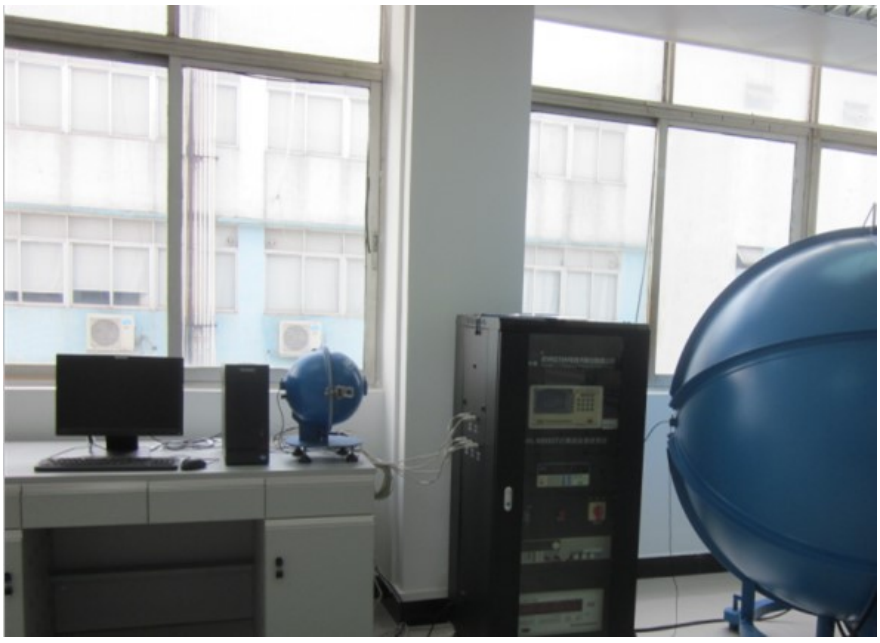


图 5.1　LED 光色电综合测试系统

5.2.4.1 测试系统柜及使用

其中测试系统柜包括测试主机、数显功率计、高精度直流稳压电源、交流稳压电源。机柜仪器及主要接口示意图见图 5.2。

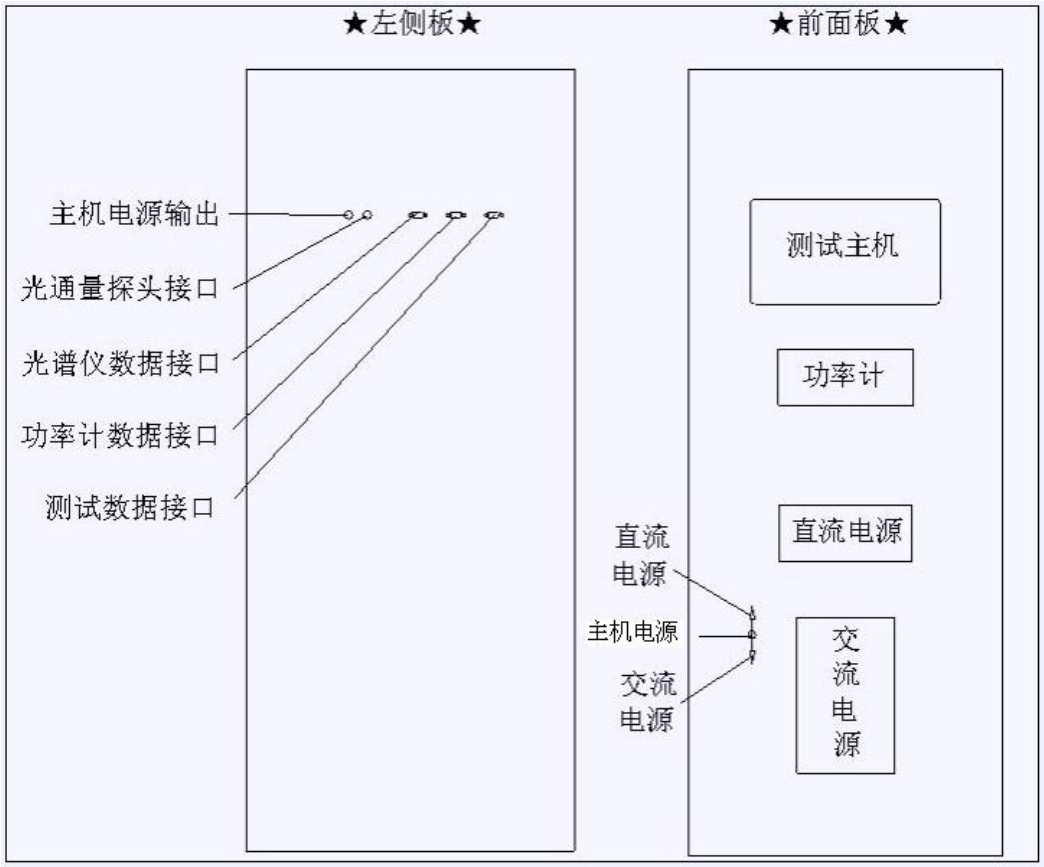


图 5.2　机柜仪器及主要接口

1）测试主机的使用

（1）前面板介绍



如上图所示，前面板上的快捷键有“设置”、“确认”、 “←”、“校零”、“光强”、“光通量”、“漏电流”、“曲线”以及数字键和电源开关按钮。

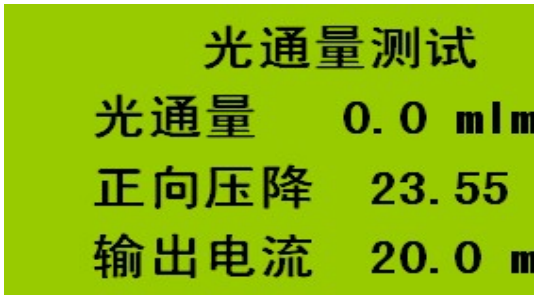
各快捷键的主要作用如下

1、“设置”：可以用来设置检测标准或设置积分球的型号。

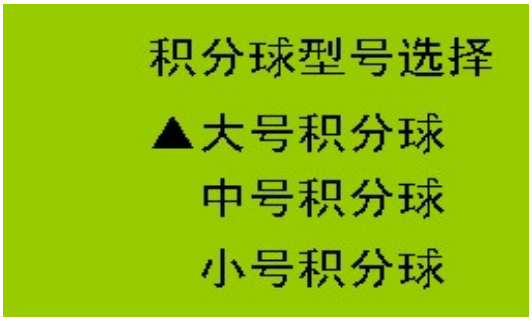
2、“确认”：对之前的输入数值或者选择项的确认。

3、“←”：在光强、光通量及漏电流状态下，用于清除当前电流或电压值，使其处于数值输入状态（出现下划线且无数值）；

4、“校零”：仪器零点校准。
5、“光强”：切换到光强测试模式。
6、“光通量”：切换到光通量测试模式。
7、“漏电流”：切换到漏电流测试模式。
8、“曲线”：切换到曲线测试模式，此功能需要上位机控制进行。
9、数字键：改变电流或电压的数值大小，最后要按“确认”键。
10、“#”：这里用来做 5V/24V 电压软切换，每按一次改变一次。
※注：此测试主机无光强、曲线功能。
（2） 测试主机操作说明
1、校零
在光通量测试模式下，如果当前显示的光通量数值不为零（允许是个较小的数值），需要对机器进行校零，操作如下：让灯具处于非点亮状态；按下主机前面板的“校零”快捷键；在提示“校零完成”后，自动恢复到之前的状态。
2、光通量测试
测试前把主机切换到“光通量测试”模式，并确认积分球装置已经连接到测试主机，等待灯具点亮即可进行测试，这时候主机界面显示如下图（若没有点亮灯具，正向压降应该是 24V 左右）：



在测试界面下按“←”键清除当前电流值，再按数字键输入需要的电流值，最后按“确认”键使设置生效。本仪器可任意设定输出电流值（输出范围 0～1500mA），以适应不同的测试项及不同的灯具的测试需要。
进行光通量测试时，有三种积分球型号可以选择，根据您的需求进行选择，使用前需要进行校准（使用校准软件）。在“光通量测试”模式下，按“设置”键，出现如下图所示：



然后按“←”键上下移动光标进行积分球型号的选择，最后按“确认”键。
2）功率计的使用
（1）仪器前面板



（2）使用方法

若被测量为交流(AC)，按 “AC/DC/ •” 键，使面板右侧的“AC”指示灯亮，表示测量交流(AC)。

若被测量为直流(DC)，或交直流(AC+DC),按 “AC/DC/ •” 键，使面板右侧的“DC”指示灯亮，表示测量直流(DC)或交直流(AC+DC)。

注意：仪器应在预热 15 分种后，方进入稳定状态；切断仪器电源后，应等待 10 秒以上才能再次上电，严禁在短时间内反复开关电源，这会引起仪器寿命缩短，并有可能引起仪器故障。在当天测量完毕后，关闭仪器电源，并拔下插头，以防可能的雷击造成仪器的损坏。

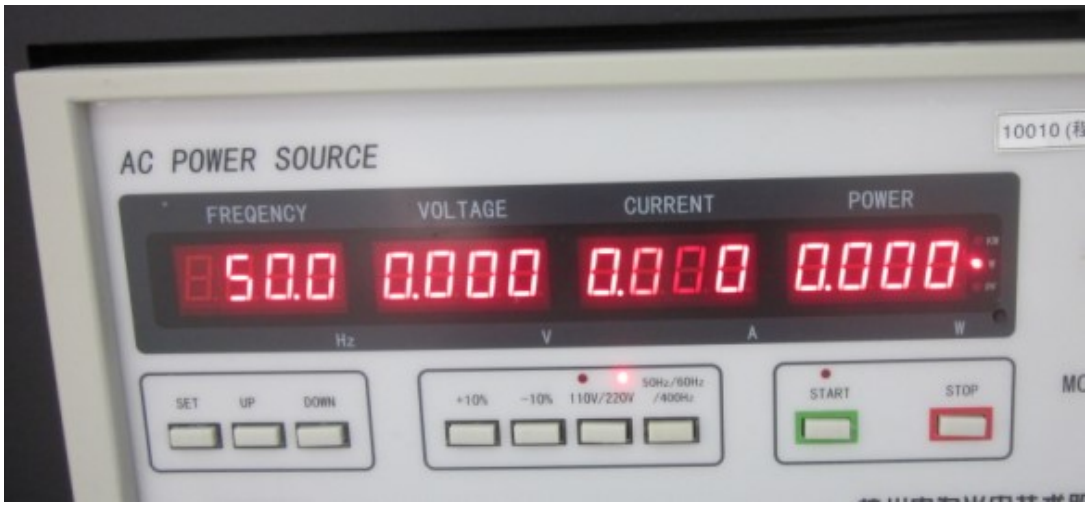
用户一般使用时只需按电源开关即可，其它厂家已设置好。

3）数控电源的使用

数控电源有两种，分别是直流和交流数控电源，仪器前面板分别如下图。



直流数控电源



交流数控电源

数控电源是给测试灯（具）提供电能的仪器设备，在实际应用时只会使用一种数控电源给电灯供电，通过如下图的直流/交流“电源切换”开关更换。例如待测 LED 电灯是交流供电的，则打开交流数控电源开关，同时将“电源切换”先置于空挡，然后安装待测试灯（具），安装好电灯后把开关置于对应的交流档。测试完毕后，也要先将“电源切换”先置于空挡，然后拆卸待测灯（具）。这个程序要特别注意，避免发生触电危险。



用户一般使用其中任一种数控电源时只需按电源开关即可（交流数控电源同时要按 START/STOP），其它厂家已设置好。

5.2.4.2 积分球及使用

积分球又称为光通球，是一个中空的完整球壳，其实是一个光收集器。球内壁均匀喷涂多层白色漫反射材料，如硫酸钡、聚四氟乙烯等，且球内壁各点漫射均匀。将被测光源置于球内，其所发出的光线在积分球内部经过多次漫反射后光线均匀分布在球内部，然后漫反射后被光电探测器接收（光电探测器前方有一个遮光板，遮光板表面的属性与球体内表面的材料属性是相同的，都能产生漫反射效果，这个挡板的作用是为了避免 LED 光源发出的光线直接照射到探测器上，使得测量不准确）。

积分球直径规格有大小之分，根据测试光源大小不同和应用场合不同而选择，常见的直径 0.3m 积分球常用于测试灯珠，常见的直径 1.5m 积分球常用于测试各种各样的灯具，它们的用法及连线相同，只是各自夹具略有不同。

1）积分球的结构

积分球的结构，以直径为 0.3m 积分球为例。如图 5.2 所示，其主要由遮光板、LED 电源接口和 LED 夹具所组成。

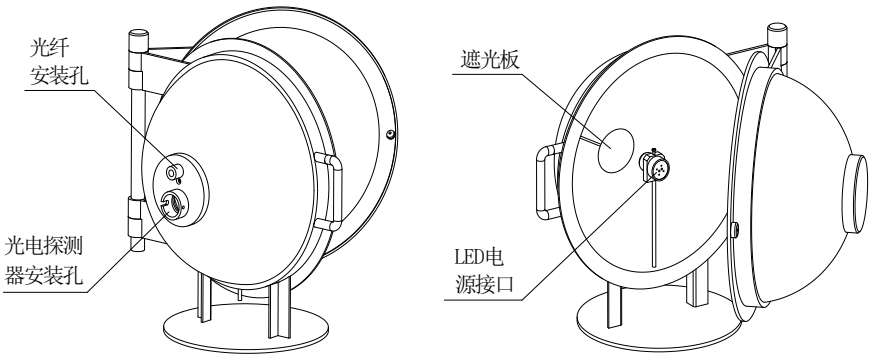


图 5.2　积分球结构图

2）使用操作注意事项

（1）在安装积分球时，一定要小心搬运，防止球体受损变形或内壁涂层受损。

（2）在日常使用中，尽量保持球体内部清洁，防止涂层污损和受潮腐蚀。

（3）在使用积分球进行测试的过程中，尽量避免在球内放置遮挡物和有色物体（中性白色除外）。

（4）测试前，系统柜的输出接口和积分球电源输入接口接线要特别注意。安装 LED 光源应注意正负极，如图 5.3 所示。

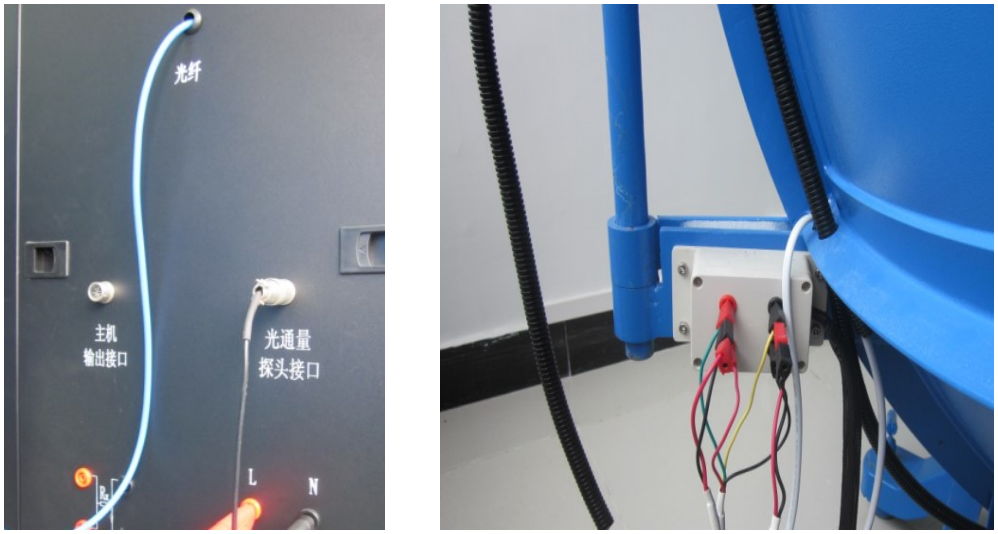


图 5.3　系统柜输出接口和积分球电源输入接口

系统柜直流输出，是接四根线；若交流输出就只需接两根线即可。积分球电源输入接口，要根据待测光源是什么类型来调整，若是测球泡灯，则按图 5.3 所示接四根线，不用动；若是测日光灯管，注意灯管两端的正负极做适当调整。图 5.4 所示灯具的安装位置。

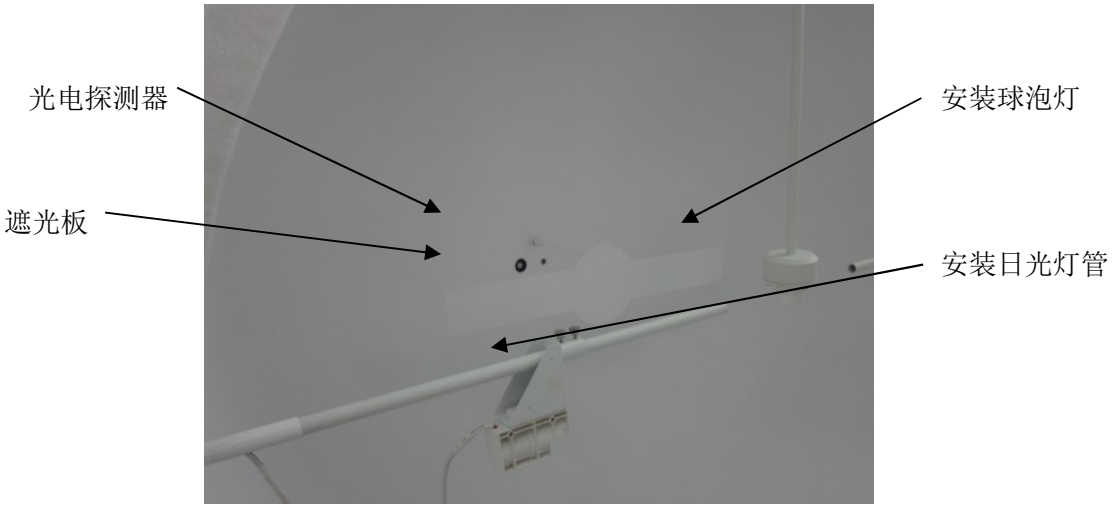


图 5.4　灯具的安装位置

5.2.4.3 计算机测试软件及使用

软件的功能同系统的输入源机构、输出接收机构之间的关系框图如图 5.5 所示：

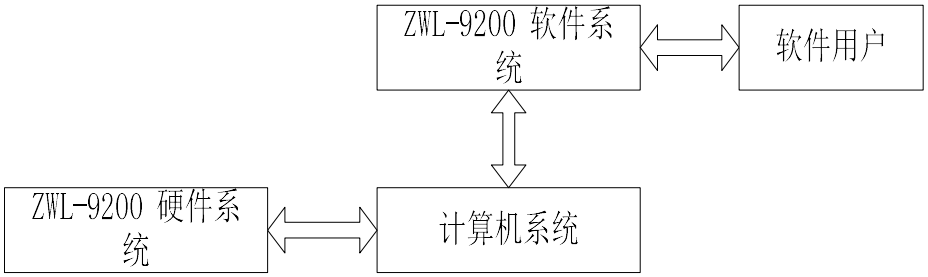


图 5.5　测试软件系统框图

安装好测试软件后，双击 ZWL-9200.exe 文件图标打开，即可启动软件。启动界面如图 5.6 所示。

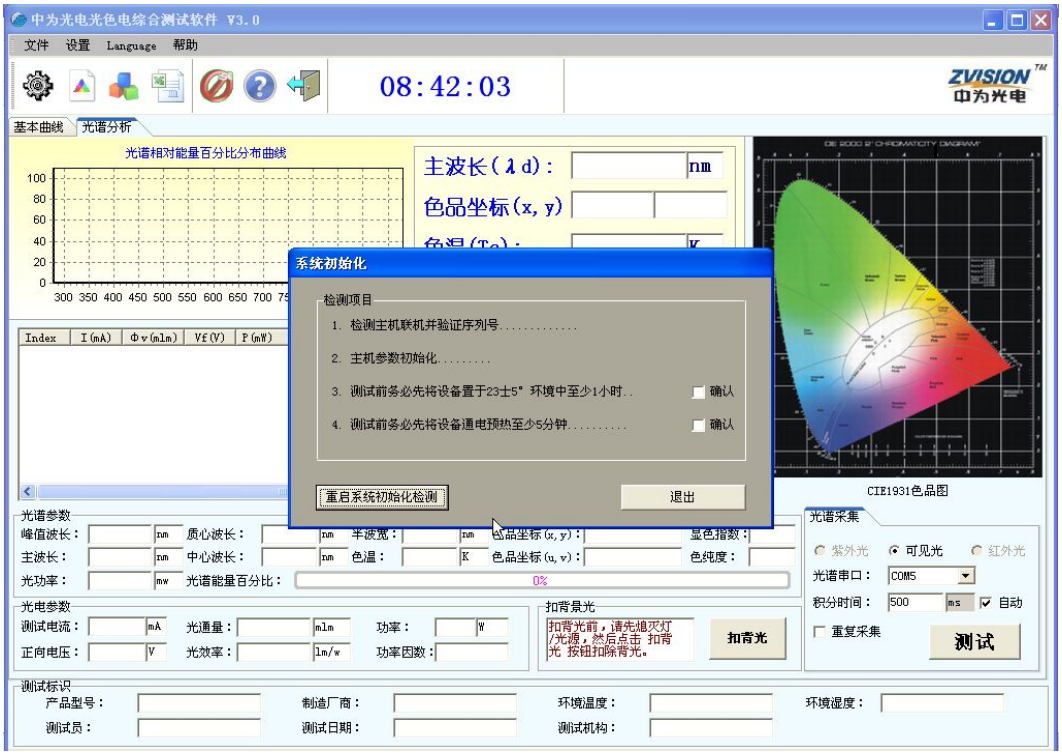


图 5.6　光色电综合测试软件启动界面

软件开启前应该确保 ZWL-9200 主机已经正确连接。点击重启系统初始化检测，检测过程会自动进行，如果发现问题，系统会提示出错，用户根据提示进行相应操作后，再点击重启系统初始化检测，再次检测系统。第 3、4 点需用户勾选确认对话框，来通过检测。检测通过后，系统会自动关闭系统初始化界面并进入操作界面。

5.2.5 光色电综合测试操作流程

1）开系统柜电源开关，如图 5.7 所示，系统柜从上到下依次打开主机、功率计和交流数控电源等各仪器的电源开关，同时数控电源的切换开关置于空挡。按主机上光通量按钮。



图 5.7　系统柜电源开关

2）检查系统柜输出接口和积分球输入电源接口接线是否正确，然后安装待测 LED 光源（切记，安装和拆卸光源电源切换开关一律打在空挡位置），关闭好积分球。

3）在计算机上打开测试软件，操作测试软件前，用户必须先进行硬件系统和串口的连接。通过初始化检测后进入操作界面。测试流程如图 5.8 所示。

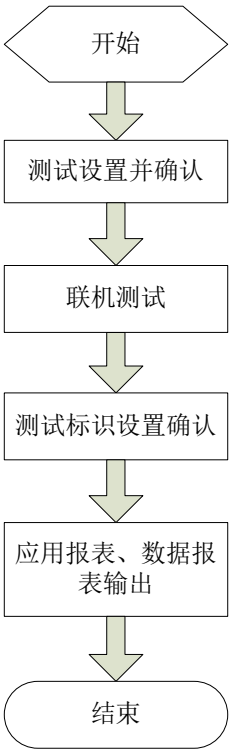


图 5.8　测试流程图

4）测试设置

在主界面中点选基本曲线，此时所有菜单、快捷按钮都对应到基本曲线的操作。然后在在菜单中点击 设置—>测试设置，或直接点击快捷按钮的“测试设置”，即可打开基本曲线的测试设置界面。操作过程如下图所示：







完成所有参数设置后，点击“确认设置”，即完成测试设置，设置的参数值显示到基本曲线的显示界面上。

打开光谱分析的测试设置界面。设置过程如下图所示：





电参数设置页面说明：

ZWL-600 只支持横流输出， ZWL-8105 支持恒压及横流输出。 不论在何种供电方式下，勾选读光通量都会从 ZWL-600 主机读取光通量。

这儿的 ZWL-600 通信串口自动匹配，不需要用户选择，其他串口需要用户选择。

勾选“连接功率计”，挑选好通信串口，其它设置都为 0。

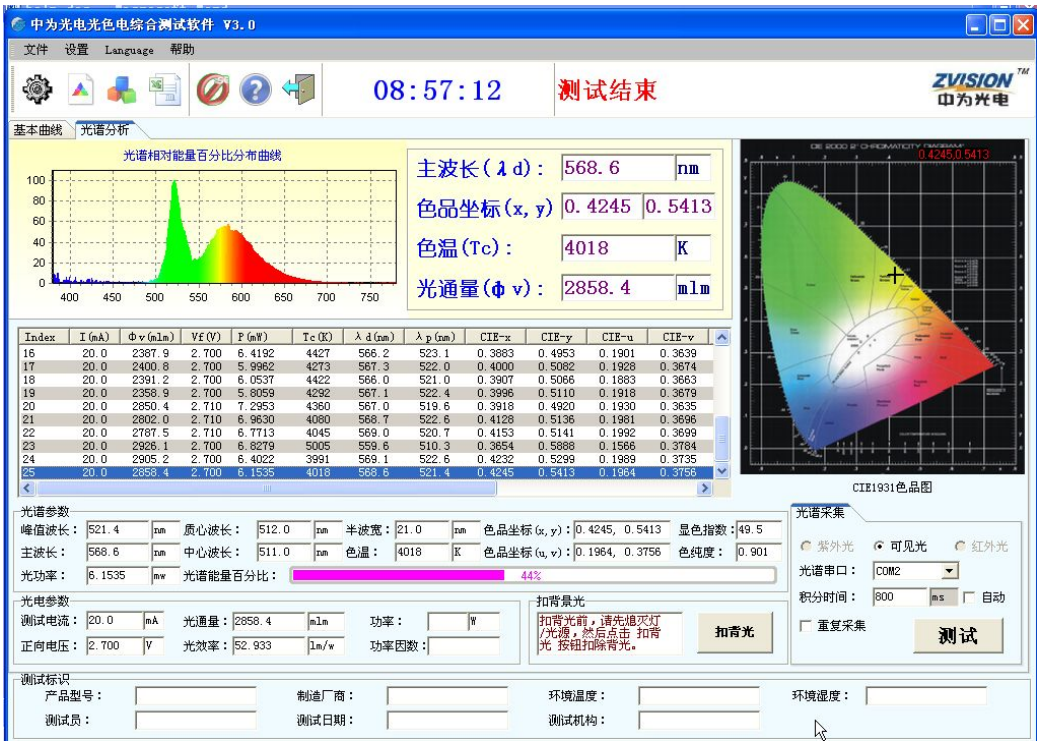
5）联机测试

参数设置完毕后，即可进行联机测试，具体操作为：点击菜单 文件—>联机测试 或直接点击快捷按钮的“联机测试”，也可用点击主界面中的测试按钮。如下图所示





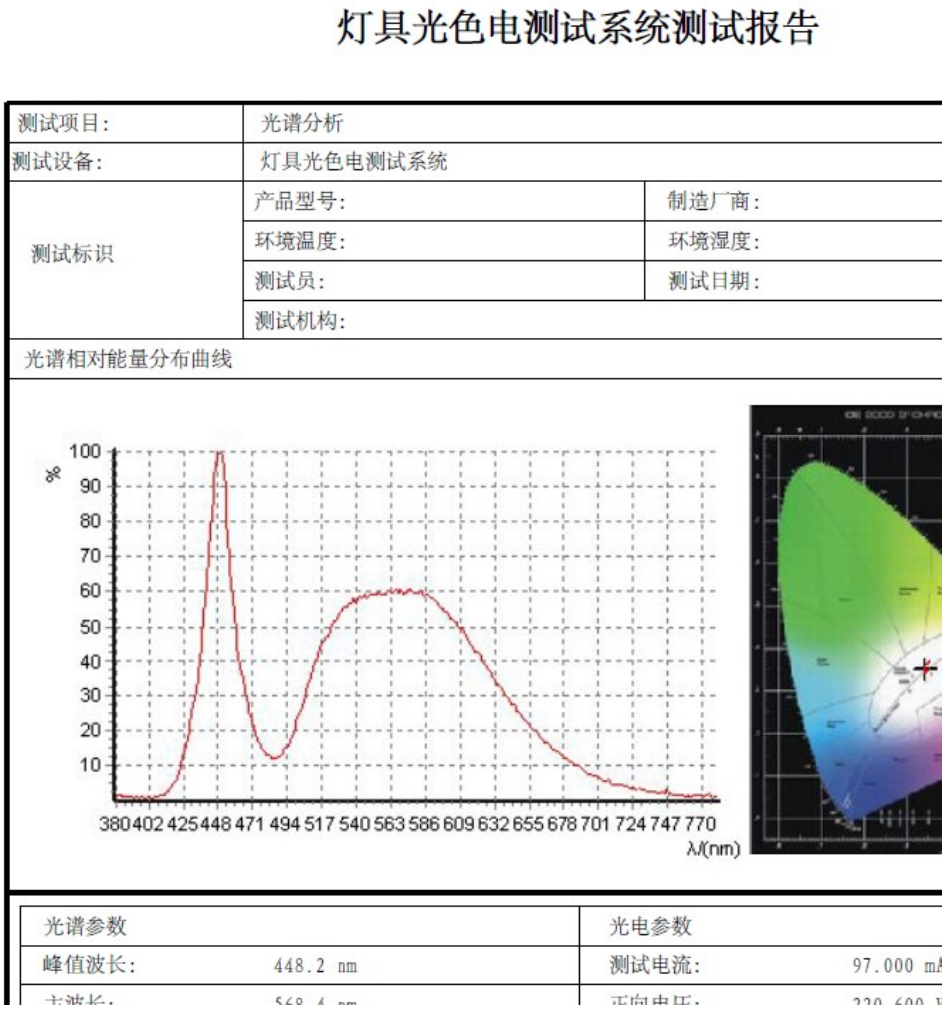




6）测试数据报表导出

测试完成后，用户可根据需要进行应用报表、数据报表的打印，通常采用导出 PDF 格式文件的测试报告，保存好电子档数据文件，如图 5.9 所示。





灯具光色电测试系统测试报告

测试项目:	光谱分析	
测试设备:	灯具光色电测试系统	
测试标识	产品型号:	制造厂商:
	环境温度:	环境湿度:
	测试员:	测试日期:
	测试机构:	

光谱相对能量分布曲线

光谱参数		光电参数	
峰值波长:	448.2 nm	测试电流:	97.000 mA

图 5.9　灯具光色电测试系统测试报告

其中测试报告里的“测试标识”内容可在测试设置步骤里进行内容添加。

7）关闭测试软件，系统柜切换到空挡位置，拆卸 LED 光源，关闭好积分球，系统柜从上到下依次关闭仪器开关，最后关闭系统柜电源总开关。

http://101.71.249.92/nz_rms/sites/default/files/mat_resource/led-zshj-ldfj-ewm-flv-05-0001guang_se_dian_ce_shi_er_wei_ma__0.flv



6 EX-1000 荧光粉激发光谱与热猝灭分析系统

荧光材料的特点是：在特定波长的光辐射激发下，能发出具有一定光谱分布的光辐射，通常称这种特点为荧光材料的光致发光。例如，新兴半导体照明行业中的 LED 荧光粉就是一种在一定波长（取决于 LED 芯片）的光辐射激发下，发射出长波段光辐射能量的荧光材料。

荧光材料的另一个特点是光致发光的强度和光谱分布会随着温度而变化。一般来讲，光致发光的强度首先会随着温度的上升而逐渐增加，在达到一定温度后，发射光强会随着温度的升高而降低，出现热猝灭现象；同时光致发光的光谱分布和色品坐标等参数也会随着温度的上升而发生漂移，色漂移程度与荧光材料本身特性有关。

荧光粉激发光谱与热猝灭分析系统基于 GBT23595-2009、GBT14633-2010 及 SJ/T11397-2009 标准，能够测量荧光材料处于不同恒温条件（从室温至 200℃）下，受不同波长（200nm-800nm）的光辐射激发，发射光的光谱功率分布，从而分析荧光材料的最佳工作条件，控制和判定荧光粉的品质。

5.3.1 荧光粉激发光谱与热猝灭分析系统及使用



图 5.10　荧光粉激发光谱与热猝灭分析系统全景图

1）系统前视图



图 5.11　系统前视图

①指示灯：系统电源指示灯、恒温控制指示灯、安全指示灯。

②舱门：测试时应关上，以免影响测量。

③光源开关：激发光源开关，在较长时间不用激光光源时应及时关闭，以延长光源使用寿命。

④粉盘放置入口处：待测试荧光粉盘应放入其中的槽底部。

⑤加热腔：在测试时应注意将门关严实，内部有高温，注意安全。

⑥风机：请保持风机出风口通畅，以使系统有较好的散热效果。

⑦激发光谱入射、出射狭缝调节旋钮。

2）系统后视图



图 5.12　系统后视图

①系统电源插座；

②系统电源保险丝；

③系统电源开关；

④接地端子；

⑤CAN 通讯口；

⑥光源灯泡更换窗口。

3）系统分析软件

将厂家提供的应用软件光盘放入光盘驱动器，打开 EX-1000 安装软件，将 CAN 转换器、电源线等连接好，做好测试准备。打开系统分析软件程序窗口如下图所示。

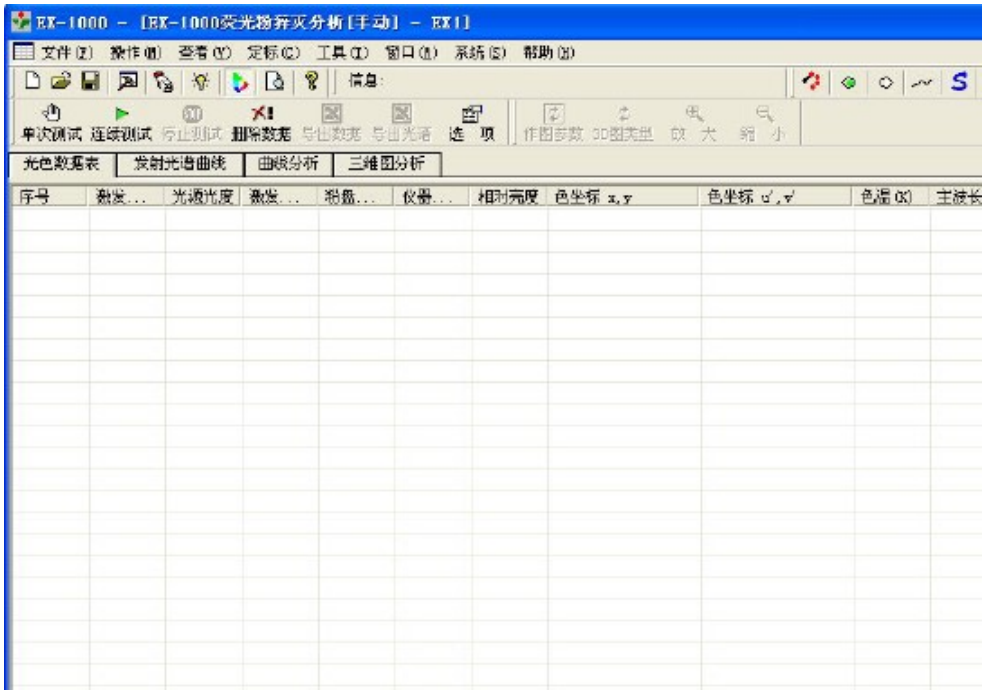


图 5.13　系统分析软件程序窗口

①系统设置

在“操作”菜单下点击“系统设置”，进入系统设置对话框（如图 5.14，图 5.15）。在对话框中设置主机 EX-1000 的通讯串行口。温控仪为 CAN 通信时，其地址是 18.

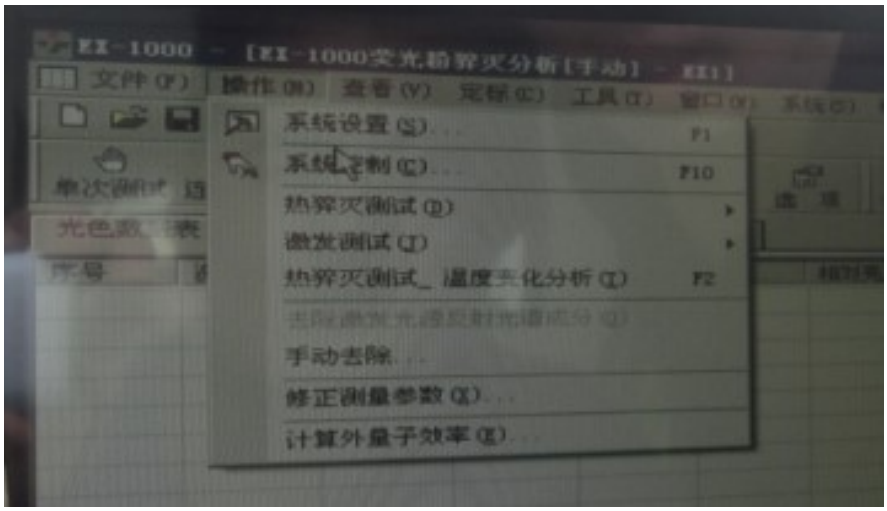


图 5.14　操作菜单



图 5.15　系统设置

②系统控制

在“操作”菜单下点击“系统控制”，即进入系统控制接口（图 5.16）。



图 5.16　系统控制

- 激发波长：在“设定激发波长”栏内输入激发波长值，再按确定即可。
- 温度读取及恒温控制：单击“读取温度”测量所有通道的当前温度值。
- 开温控：按设定的温度调节粉盘温度。注意：温度调节需要较长时间（20 分钟或以上）。
- 关温控：关闭粉盘加热控制。

5.3.2 测试操作流程

1）测试前的准备工作

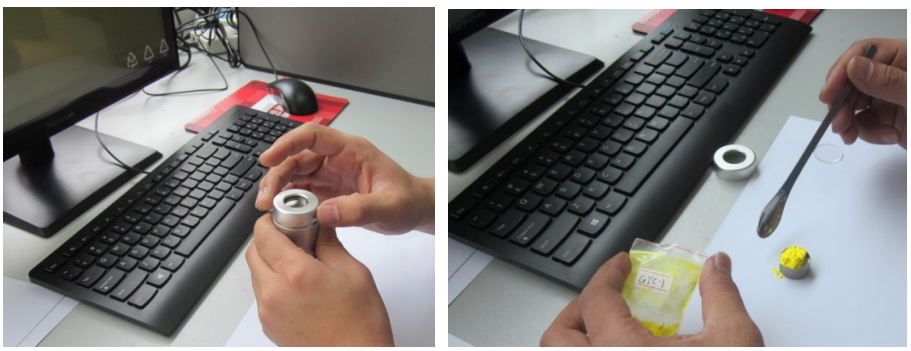
① 做粉盘

做粉盘需要用到的设备和器材，如图 5.17 所示。

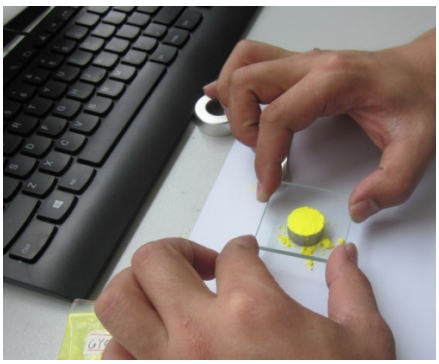
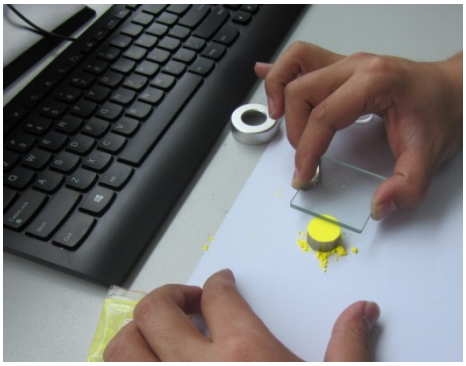


图 5.17　做粉盘用到的器材

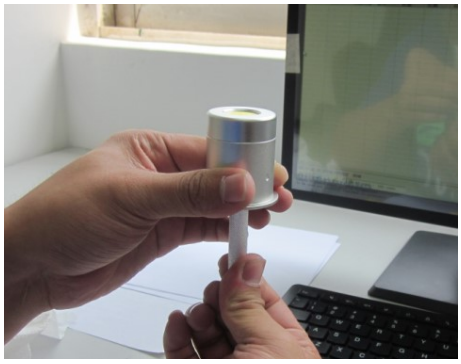
做粉盘步骤：旋开粉盘盖子—用小匙将荧光粉装入粉盘—用玻璃压实—玻璃水平移开—盖紧粉盘盖—粉盘做好，分别对应如图 5.18 所示的（a）~（f）。



（a）　　（b）

（c）　　（d）

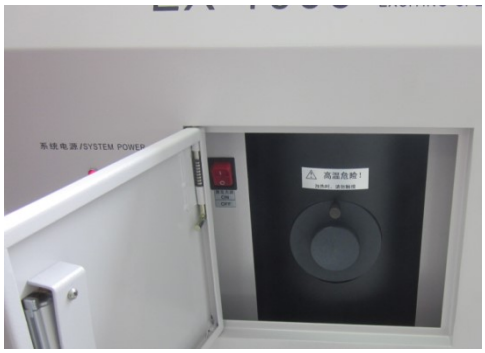
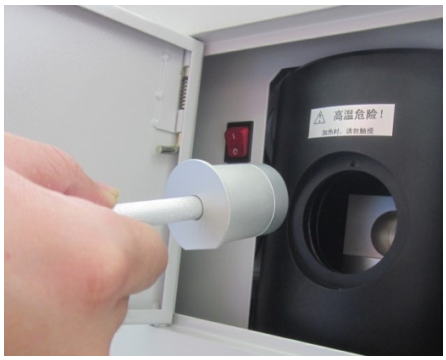



（e）　　（f）

图 5.18　做粉盘的六个步骤

② 装粉盘

装粉盘步骤：打开舱门—旋开加热腔螺丝—放入粉盘至槽底—盖紧加热腔盖—打开激发光源—改好舱门，如图 5.19 所示的（a）~（f）。

（a）　　（b）





（c）　　（d）





（e）　　（f）

图 5.19　装粉盘的六个步骤

2）热猝灭测试

热猝灭测试即直接测试当前条件下的光色参数，当荧光粉温度达到设定的温度后，用户可点亮激发光源，并调整到需要的激发波长位置。

由于仪器降温的时间远远长于加温的时间，所以用户在进行热猝灭测试时应从低到高进行试验。

- 单次测试：在“操作”菜单下点击“热猝灭测试”->单次测试（快捷键 F5），测试一次光色参数，自动添加数据至表格中。
- 连续测试：在“操作”菜单下点击“热猝灭测试”->开始连续测试（快捷键 F6），则连续测试当前的光色参数，自动添加数据至表格中。点击“停止连续测试”结束连续测试。

3）激发测试

激发测试自动在不同激发波长下测试光色参数。在测试前，用户需自行点亮激发光源。

在“操作”菜单下点击“激发测试”->开始测试（快捷键 F3），出现激发测试对话框（图 5.20）。设定后，按测试即开始测试。在测试过程中可点击“激发测试” ->停止测试（快捷键 F4）停止测试。

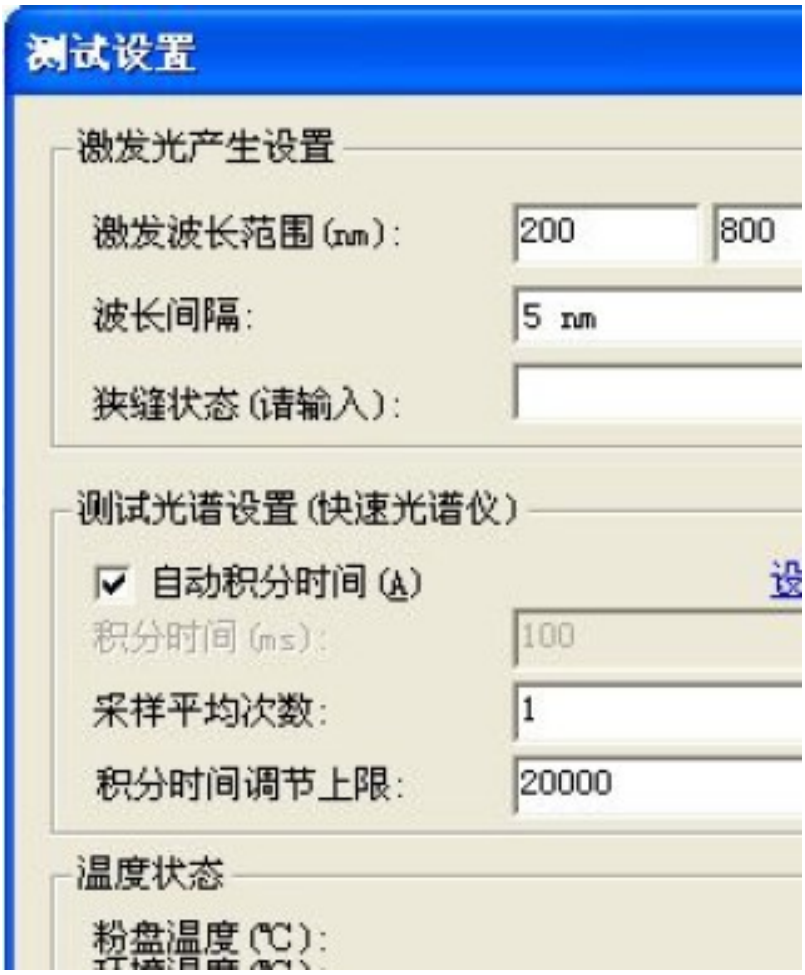


图 5.20　激发测试设置

4）热猝灭-温度变化分析

热猝灭-温度变化分析功能用于温度变化过程中光色测试分析，可粗略分析荧光粉在不同温度下的特性，精确的温度特性需用热猝灭测试功能，即在恒温足够时间后再进行测试分析。在测试前，用户需自行点亮激发光源。

在“操作”菜单下点击“热猝灭-温度变化分析”（快捷键 F2），出现设置对话框（图 5.21）。设定后，按测试即开始测试。在测试过程中按快捷键 F4 或 F7 停止测试。



图 5.21　温度变化分析设定

测试结果分析时，为便于处理，通常要去除激发光谱来进行对比分析，如图 5.22 和图 5.23 所示。

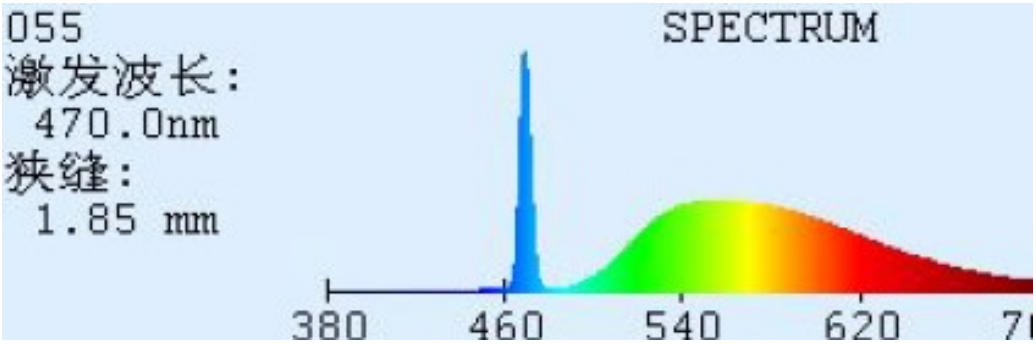


图 5.22　去除激发光前光谱图

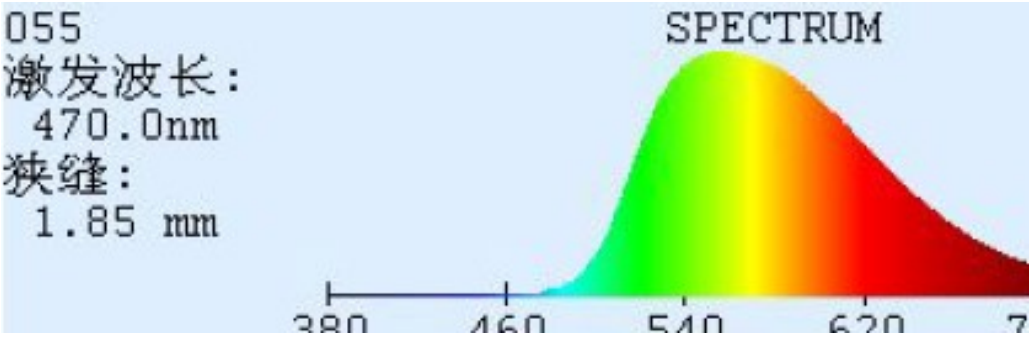


图 5.23　去除激发光后光谱图

5）测试结果分析

测试结果通常有光谱曲线、曲线分析和三维图分析几个部分。如图 5.24，图 5.25，图

5.26 所示。

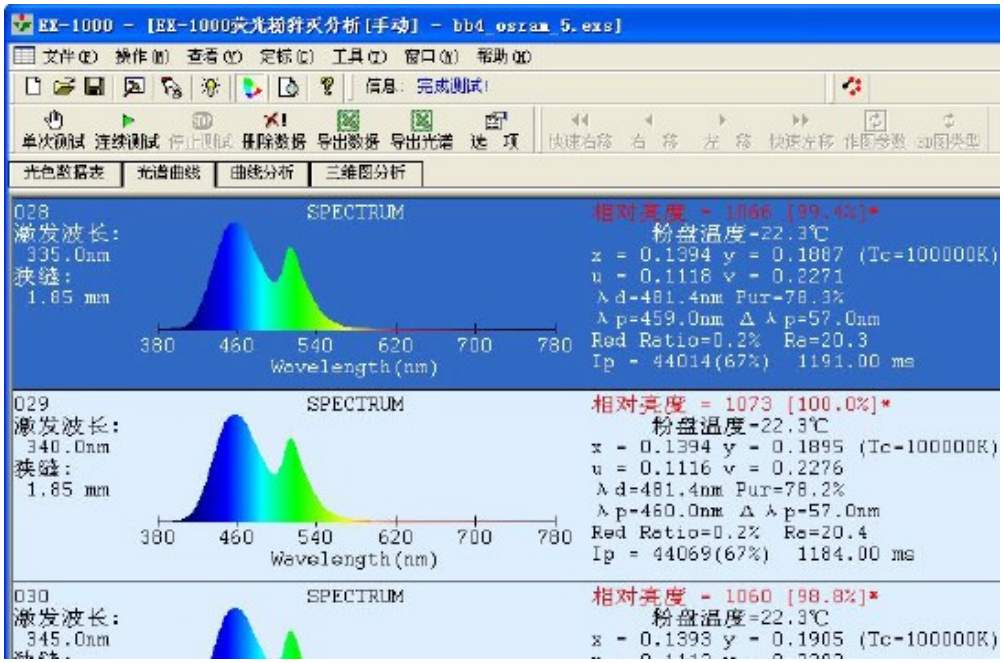


图 5.24　光谱曲线

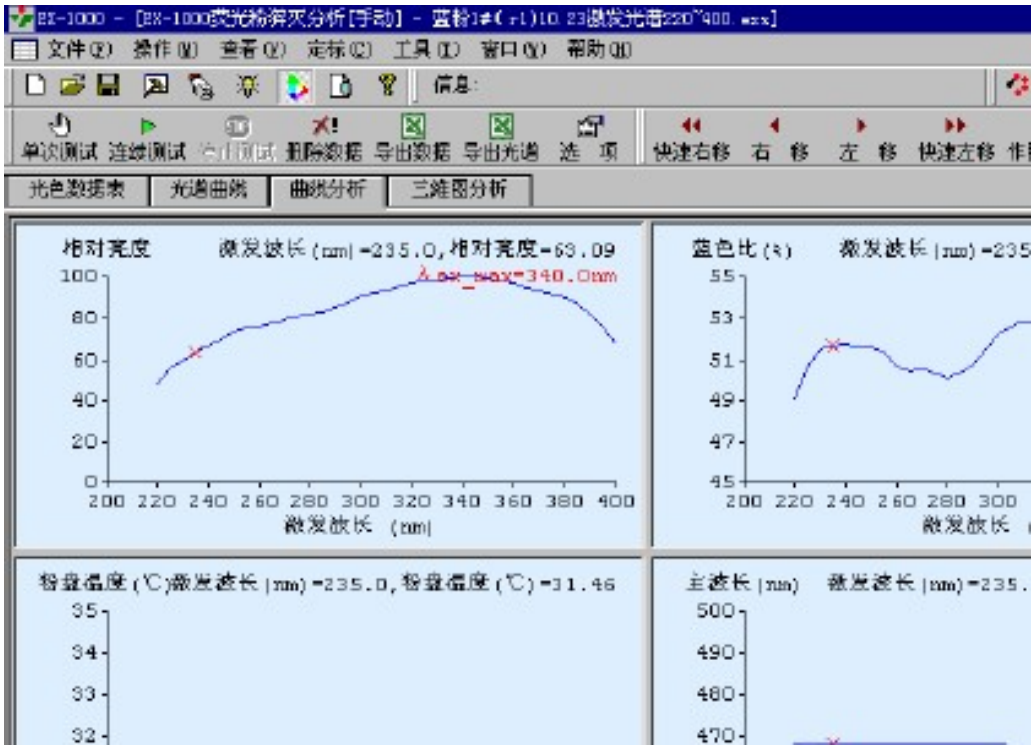


图 5.25　曲线分析

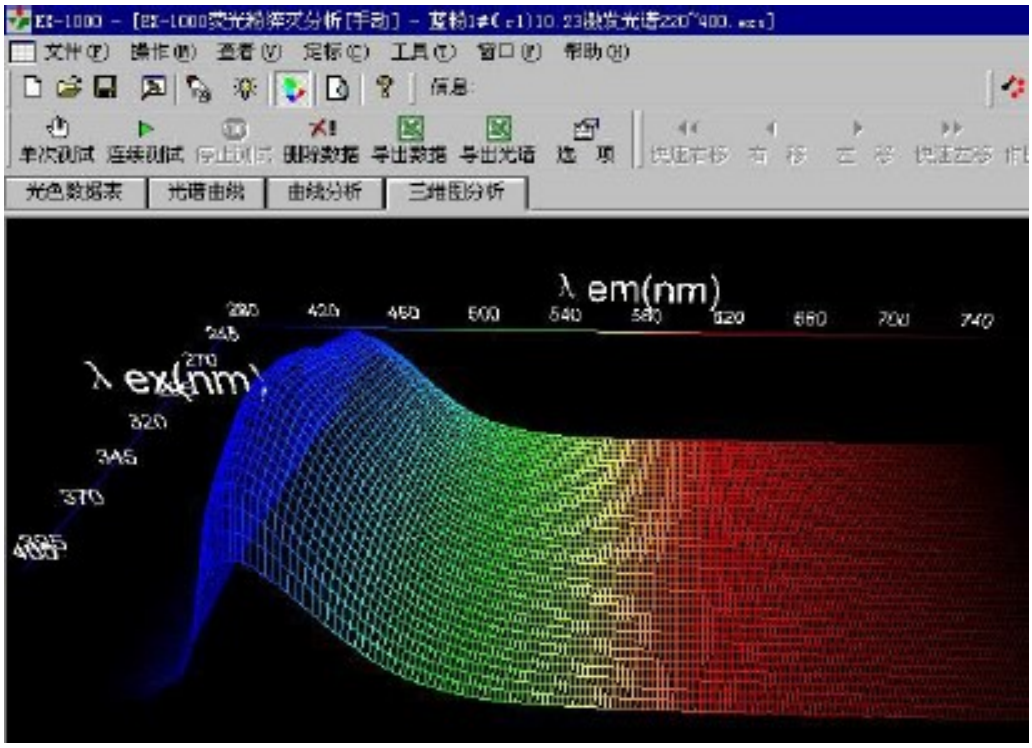


图 5.26　三维图分析

http://101.71.249.92/nz_rms/sites/default/files/mat_resource/led-zshj-ldfj-ewm-flv-07-0001guang_se_dian_ce_shi_ying_guang_fen_jian_ce_cao_zuo_shi_pin_01er_wei_ma__0.flv