

普通高等教育  
兵工类规划教材

# 薄膜技术

严一心 林鸿海 编著

兵器工业出版社

# 薄膜技术

严一心 林鸿海 编著



兵器工业出版社

(京)新登字 049 号

## 内 容 简 介

本书系“光学技术”专业的系列教材之一。它比较系统、深入地介绍了光学薄膜的设计、镀制技术(蒸发法、溅射法、离子镀、离子束镀膜等)、薄膜的形成及结构分析、薄膜性能的测试等。由于近年来薄膜技术发展很快,故书中增加了近年来国内外薄膜技术的科研成果,及它在机械、电子和新材料等方面的应用。本书内容丰富、取材新颖、深入浅出地阐述了薄膜基础理论,并密切联系实际。

本书为光学技术与光电仪器的专业教材,也可作为材料、应用物理等专业的教材或教学参考书,亦可供广大薄膜技术工作者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

薄膜技术/严一心,林鸿编著.-北京:兵器工业出版社,1994.12

ISBN 7-80038-789-5

I. 薄… II. ①严…②林… III. 薄膜技术. IV. TB43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 13169 号

## 薄 膜 技 术

严一心 林鸿海

\*

兵器工业出版社 出版发行  
(北京市海淀区车道沟 10 号)  
新华书店总店科技发行所发行  
各地新华书店经销  
西安工业学院印刷厂印装

\*

开本:787×1092 1/16 印张:12.625 字数:299.5 千字

1994 年 10 月第 1 版 1994 年 10 月第 1 次印刷

印数:1300 册 定价:7.25 元

## 出版说明

遵照国务院国发[1978]23号文件精神,中国兵器工业总公司承担全国高等学校兵工类专业教材的规划、编审、出版的组织工作。自1983年兵总教材编审室成立以来,在广大教师的积极支持和努力下,在国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的积极配合下,已完成两轮兵工类专业教材的规划、编审、出版任务,共出版教材211种。这批教材出版对解决兵工专业教材有无问题、稳定教学秩序、促进教学改革、提高教学质量都起到了积极作用。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设需要,特别是国防现代化培养人才的需要,反映国防科技的先进水平,达到打好基础、精选内容、逐步更新、利于提高教学质量的要求,我们以提高教材质量为主线,完善编审制度、建立质量标准、明确岗位责任,建立了由主审人审查、责任编委复审和教编室审定等5个文件。并根据兵工类专业的特点,成立了十个专业教学指导委员会,以更好地编制兵工类专业教材建设规划,加强对教材的评审和研究工作。

为贯彻国家教委提出的“抓好重点教材,全面提高质量,适当发展品种,力争系统配套,完善管理制度,加强组织领导”的“八五”教材建设方针,兵总教材编审室在总结前两轮教材编审出版工作的基础上,于1991年制订了1991~1995年兵工类专业教材编写出版规划,共列入教材220种。这些教材都是从学校使用两遍以上、实践证明是比较好的讲义中遴选的,专业教学指导委员会从兵工专业教材建设的整体考虑对编写大纲进行了审查,认为符合兵工专业培养人才要求,符合国家出版方针。这批教材的出版必将为兵工专业教材的系列配套,为教学质量的提高、培养国防现代人才,为促进兵工类专业科学技术的发展,都将起到积极的作用。

本教材由韩丽瑛教授主审,经中国兵器工业总公司光学技术专业教学指导委员会复查,兵总教材编审室审定。

限于水平和经验,这批教材的编审出版难免有缺点和不足之处,希望使用本教材的单位和广大读者批评指正。

中国兵器工业总公司教材编审室

1994年10月

## 序 言

在国民经济第八个五年计划期间,兵器工业总公司组织了各有关兵工专业系列教材的编写工作。教材内容根据各类专业设置和各该专业人材培养的要求确定。

“光学技术”专业在八五期间的系列教材包含有摄影仪器、航空瞄准具原理与设计、瞄准仪器、测距仪器、薄膜技术、光学材料与辅料、光学玻璃工艺学、晶体生长工艺学等专题。这些教材配合七五和六五期间出版的教材,组成了各专题的一个比较完整、协调的系列。

每一种系列教材的作者和编写大纲都经过“光学技术”专业指导委员会的委聘和研究讨论,最后由兵工教材编审室审定。

各类光学仪器在国防技术上一直承担着观察、监视方面极为重要的任务;在空间技术方面利用电影经纬仪跟踪拍摄人造天体;在原子能方面利用高速摄影装置拍摄和研究核反应和爆炸的过程;在机械、建筑、材料工业、农业、医学等方面各类光学仪器都是必不可少的。应该说,光学仪器在社会主义建设各个领域中的作用一直十分重要。

解放以来,我国的光学工业得到了蓬勃的发展,在有关学科和技术上都已先后缩短了与国际水平的总差距,有的方面且已达到或接近国际先进水平。

光学玻璃方面:无色光学玻璃已能生产 18 种类型计 135 种牌号;有色光学玻璃生产类型有硒镉着色玻璃、离子着色的选择性吸收玻璃和中性玻璃等;特种光学玻璃有耐辐射光学玻璃、防辐射光学玻璃、透红外光学玻璃、透紫外光学玻璃、超低膨胀玻璃,以及各种光学功能玻璃等等。

光学晶体方面经过几十年的研究,已能成功地培养透紫外晶体、透红外晶体、偏振晶体、闪烁晶体、窗口材料、激光晶体、电光晶体、声光晶体和变频晶体。

光学塑料的研究我们起步略晚,光学性能的范围比起光学玻璃来尚有较大的局限性,但是光学塑料已正式开始用于望远镜目镜系统以及低挡摄影镜头中。

为了满足近代光学发展的需求,我国已能生产梯度折射率光学材料,为光学材料开拓了新的使用领域。

在光学零件冷加工方面正面向两个方向不断发展:一方面是更高的生产率;另一方面是更高的精度。

在高效生产方面,中等精度的透镜、棱镜已经正式采用大批量生产方法。使用金刚石磨轮的铣磨、使用金刚石精磨片的高速精磨、聚胺酯抛光、使用固着磨料抛光片的抛光,机械法定心磨边等工序均已能达到比较稳定的生产。

高效生产所使用的辅料,例如人造金刚石、采用粉末冶金法制造金刚石磨轮和精磨片、固着磨料抛光片、聚胺酯片、氧化钾抛光粉、新型冷却液等都已正式用于生产。但是在产品的系列化方面和质量的稳定性方面,与国际当前水平相比不免尚存在一定差距。

在高精度加工方面,大型球面加工和非球面加工采用了计算机控制抛光,在高精度平面镜和棱镜加工上采用了环形抛光。此外,光学零件的复制技术也已普遍地用于生产。

真空镀膜采用了离子束蒸发技术和反应蒸发技术,可以镀制从真空紫外到远红外的各个光谱区域的多层光学薄膜,并采用了计算机辅助设计,向自动化方向发展。

精密刻划方面,成功地采用了光刻法、莫尔条纹定位、激光干涉条纹定位、全息照相、离子蚀刻等技术,制作出例如 21 位编码盘和全息闪耀光栅等精密刻划元件。

纵观我国的光学技术,包括军用光学仪器和光学材料、光学零件的制造工艺,经历了多年来的进展,都已经陆续进入了更高的发展阶段。总结过去,展望未来,迎接 21 世纪的挑战,是兵工系列教材编写时的要旨。相信系列教材的问世,也无疑将促进光学工业的进一步发展。

严沛然 查立豫

# 目 录

第一章 薄膜在现代科技中的应用	1
§ 1.1 概述	1
§ 1.2 薄膜在光学中的应用	2
1.2.1 光学薄膜设计的理论基础	2
1.2.2 减反射膜	14
1.2.3 反射膜	19
1.2.4 分束镜	24
1.2.5 截止滤光片	27
1.2.6 带通滤光片	33
§ 1.3 薄膜在机械方面的应用	37
§ 1.4 电子工业中薄膜技术的应用	41
1.4.1 导体膜	41
1.4.2 介电体薄膜	42
1.4.3 集成电路中的应用	43
第二章 真空基础	45
§ 2.1 真空的一般知识	45
§ 2.2 真空的获得	47
2.2.1 镀膜用的真空系统	47
2.2.2 机械泵	48
2.2.3 扩散泵	52
2.2.4 吸附泵	55
2.2.5 钛升华泵	56
2.2.6 溅射离子泵	58
§ 2.3 真空的测量	59
2.3.1 热电偶真空计	59
2.3.2 热阴极电离真空计	61
2.3.3 超高真空热阴极电离计(B-A 规)	62
§ 2.4 真空检漏	62
第三章 热蒸发镀膜技术	64
§ 3.1 蒸发源	64
3.1.1 电阻加热蒸发源	64

3.1.2	电子束加热蒸发源	65
3.1.3	激光加热蒸发源	67
§ 3.2	膜层厚度的均匀性	67
3.2.1	在平面夹具上蒸镀时的膜厚分布	68
3.2.2	在球面夹具上蒸镀时的膜厚分布	68
3.2.3	在旋转的平面夹具上蒸镀时的膜厚分布	69
3.2.4	在旋转的球面夹具上蒸镀时的膜厚分布	71
§ 3.3	膜层材料	73
3.3.1	金属和合金	73
3.3.2	化合物(电介质)	74
3.3.3	半导体	75
3.3.4	新型膜层材料	78
3.3.5	任意折射率膜	79
§ 3.4	薄膜厚度的监控	80
3.4.1	极值法	80
3.4.2	波长调制法	84
3.4.3	石英振荡法	86
3.4.4	宽光谱监控技术	87
§ 3.5	镀制工艺参数对薄膜性能的影响	87
3.5.1	真空度的影响	88
3.5.2	沉积速率的影响	89
3.5.3	基片温度的影响	90
3.5.4	基片材料的影响	90
3.5.5	基片清洁的影响	90
3.5.6	膜层材料的影响	91
3.5.7	离子轰击的影响	91
3.5.8	蒸发方法的影响	91
3.5.9	膜料蒸气分子入射角的影响	91
3.5.10	烘烤处理的影响	91
§ 3.6	热蒸发镀膜设备和镀膜过程自动化	92
3.6.1	真空镀膜机	92
3.6.2	镀膜过程自动化	93
<b>第四章</b>	<b>离子镀膜技术</b>	<b>96</b>
§ 4.1	离子束辅助镀膜	96
4.1.1	离子束辅助镀膜原理	96
4.1.2	离子束辅助镀膜使薄膜性能改善的情况	98
4.1.3	工艺与操作	100
4.1.4	离子源	101



§ 4.2 溅射镀膜 .....	108
4.2.1 溅射镀膜基础 .....	108
4.2.2 溅射方式 .....	114
4.2.3 直流二极、三极、四极溅射 .....	115
4.2.4 磁控溅射 .....	116
4.2.5 射频溅射 .....	121
4.2.6 离子束溅射 .....	123
4.2.7 化合物膜、合金膜的镀制 .....	124
§ 4.3 离子镀 .....	126
4.3.1 离子镀原理及特点 .....	126
4.3.2 离子镀的类型 .....	128
4.3.3 活性反应离子镀 .....	128
4.3.4 空心阴极离子镀 .....	132
4.3.5 多弧离子镀 .....	135
<b>第五章 薄膜的形成及其结构</b> .....	<b>141</b>
§ 5.1 成膜的基础知识 .....	141
5.1.1 单体的吸附 .....	141
5.1.2 小原子团的形成 .....	145
5.1.3 凝结系数 .....	146
§ 5.2 成核理论 .....	148
5.2.1 微滴理论 .....	149
5.2.2 原子理论 .....	151
5.2.3 两种成核理论的对比 .....	153
§ 5.3 薄膜的形成 .....	153
§ 5.4 薄膜结构及其缺陷 .....	155
5.4.1 薄膜的结构 .....	155
5.4.2 薄膜的结构缺陷 .....	157
<b>第六章 薄膜特性的测试</b> .....	<b>159</b>
§ 6.1 薄膜光学常数的测量 .....	159
6.1.1 布儒斯特角法 .....	159
6.1.2 光度法 .....	160
6.1.3 椭圆偏振光法 .....	163
6.1.4 波导法 .....	169
6.1.5 干涉法测量薄膜的厚度 .....	171
§ 6.2 薄膜光学性能的测量 .....	173
6.2.1 薄膜透射比的测量 .....	173
6.2.2 薄膜反射比的测量 .....	174

6.2.3	薄膜吸收比的测量 .....	177
6.2.4	薄膜散射比的测量 .....	179
6.2.5	薄膜激光破坏阈值的测量 .....	181
§ 6.3	薄膜机械性能的测定 .....	182
6.3.1	薄膜附着力的测定 .....	182
6.3.2	薄膜应力的测定 .....	183
6.3.3	薄膜机械强度的测定 .....	186
§ 6.4	薄膜化学成分和结构的分析 .....	186
6.4.1	薄膜化学成分的分析 .....	186
6.4.2	薄膜结构的分析 .....	189

# 第一章 薄膜在现代科技中的应用

## § 1.1 概 述

现代高科技的三大重点领域是材料、能源和信息科学。它们都对物质材料不断提出新的性能要求。例如,在高速运动中的物件的耐磨性、在恶劣环境中的抗腐蚀性、太阳能的利用、微电子技术中的微细加工、超导应用和光电子技术的发展等等,这些都离不开薄膜技术。近20多年来,薄膜技术随着高科技的发展有了突飞猛进的进展。由于镀膜技术、薄膜材料、表面物理三者的相互推进和结合,使得薄膜技术本身已成为一门综合性的应用科学。它涉及到许多跨学科的理论基础,在新技术革命中被列为前沿学科,是今后工业发展的新重点。在一些发达国家,薄膜技术被全方位推广应用。除了发展光学薄膜、集成电路薄膜、液晶显示膜、磁盘、光盘薄膜外,还大量生产刀具硬质膜、太阳能用薄膜、塑料金属化制品、建筑玻璃膜制品、各种装饰膜和卷镀薄膜产品。有些产品已形成相当大的生产规模,不久将会出现一个门类齐全的薄膜产业。

顾名思义,薄膜技术是研究和镀制薄膜的技术。镀膜就是在称之为基底的某种材料上镀制上一层或多层具有其它材料特性的膜。镀膜可以起到三方面作用:

(1)优化表面性能。它可以提高零件的寿命,减缓材料腐蚀速度,减少粘附,以及采用工程塑料或精密陶瓷作为金属的代用材料,等等。

(2)进行微细加工。在现代超大规模集成电路中,器件的加工精度是微米级和亚微米级,预计到2000年将为纳米级( $10^{-9}$ Z),其中一些元件、引线 and 接头都须使用薄膜技术进行分层镀制。有时它与蚀刻技术交替进行。在今后光计算机中的光孔记忆器,也可利用薄膜技术在薄膜上制成很微小的孔( $<0.5\mu\text{m}$ ),用激光打孔表示“0”或“1”。这种微细加工在精密机械零体的制作中也有应用。

(3)产生新的功能特性。由于薄膜可以镀得很薄很薄(原子量级),加之镀层和基底两者的结构特性和表面效应,薄膜可以具有一般大块材料所不具备的新特性和新功能。例如,金属-半导体材料接触产生的电流-电压特性为非对称性等一系列新特性。这些新特性将广泛应用于金属-半导体场效应晶体管、传感器、微波器件、太阳能电池和高速整流器等老电子学方面。薄膜镀制方法列于表1-1。

表中所述湿法镀制的电镀、化学镀是最常见的,这里不再做详细介绍。至于干法镀制中的化学气相沉积技术则是利用气相物质的热分解、热合成或化学传输等在基底材料上生成固态沉积的膜层。一般沉积温度须高达 $1000\text{C}$ 左右,有些材料经受不住高温,则可采用等离子体化学气相沉积技术。它是用气体放电等离子体来促进化学反应,这样可以在较低温度下操作( $500\sim 600\text{C}$ )。本教材主要介绍物理气相沉积法。

物理气相沉积法在工业生产中所镀制的薄膜又可分为两类:一类是机械功能膜,包括耐磨、减摩和抗腐蚀膜,这类膜的厚度都在 $1\mu\text{m}$ 以上;另一类是物理功能膜,包括光学、电子、

磁学膜等,这类薄膜很薄,一般厚度都在  $1\mu\text{m}$  以下。按专业要求,本章侧重光学薄膜,故较详细地讲解光学薄膜膜系设计、计算,以及光学薄膜的种类、作用和用途等。希望通过光学薄膜的讲解,起到举一反三的作用。在此基础上再简要介绍一般机械表面优化用的薄膜和在电子工业领域中薄膜应用的情况。通过这两方面借以了解薄膜技术在改造传统产业和发展高科技方面的作用。

表 1-1 镀膜方法一览表

镀膜方法	湿法	<ul style="list-style-type: none"> <li>电镀</li> <li>化学镀</li> </ul>
	干法	<ul style="list-style-type: none"> <li>化学气相沉积((CVD 法)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>CVD</li> <li>低压 CVD</li> <li>等离子 CVD</li> </ul> </li> <li>物理气相沉积(PVD 法)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>热蒸发</li> <li>离子束辅助蒸发</li> <li>溅射</li> <li>离子镜</li> </ul> </li> </ul>

## § 1.2 薄膜在光学中的应用

光学薄膜在国民经济和国防中的应用甚为广泛。例如种类繁多的光学薄膜器件——增透膜、高反膜、分束膜、截止滤光膜、带通滤光膜等已成为许多光学系统和仪器不可缺少的部件。光学薄膜设计的理论是以电磁波在分层介质中传播的经典理论为基础的。

### 1.2.1 光学薄膜设计的理论基础

#### 一、麦克斯韦方程及平面电磁波

光波是电磁波。经典的电磁波性质用麦克斯韦方程组描述。对于各向同性的媒质,这些方程是

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1-1)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (1-2)$$

$$\nabla \times H = j + \frac{dD}{dt} \quad (1-3)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1-4)$$

$$D = \epsilon E \quad B = \mu H \quad j = \sigma E \quad (1-5)$$

式中:  $B$ ——磁感应强度矢量;  
 $D$ ——电位移矢量;  
 $H$ ——磁场强度矢量;  
 $E$ ——电场强度矢量;  
 $j$ ——电流密度矢量。

公式(1-1)表示磁场无散度,即磁场不可能为单极磁荷所激发;式(1-2)表示电场有散度,电场可由点电荷所激发;式(1-3)和(1-4)表示随时间变化的电场在周围空间会产生磁场,同

样,变化的磁场在周围空间会产生电场,这种变化的电磁场在空间以一定的速度传播,便形成电磁波;式(1-5)称为物质方程,描述物质在电磁场影响下的特性。式中 $\epsilon$ 称为介电常数, $\mu$ 为磁导率, $\sigma$ 为电导率。

将(1-5)式代入式(1-3)和(1-4),得

$$\nabla \times H = \sigma E + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1-6)$$

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1-7)$$

对式(1-7)取旋度,再将式(1-6)代入,得

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\mu \frac{\partial (\nabla \times H)}{\partial t} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\sigma E + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t}) \quad (1-8)$$

根据矢算公式

$$\nabla \times (\nabla \times E) = \nabla (\nabla \cdot E) - \nabla^2 E \quad (1-9)$$

并考虑到通常在媒质中没有空间电荷, $\rho=0$ ,即 $\nabla \cdot E=0$ ,故可推得

$$\nabla^2 E = \mu \epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \mu \sigma \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1-10)$$

这就是著名的波动方程。 $H$ 也有相似的表示式。式(1-10)的解为

$$E = E_0 \exp[i\omega(t - \frac{x}{v})] \quad (1-11)$$

它代表一个振幅为 $E_0$ 、角频率为 $\omega$ 的平面波,以速度 $v$ 沿正 $x$ 方向传播。将式(1-11)代入式(1-10),得

$$\frac{1}{v^2} = \epsilon \mu - i \frac{\sigma \mu}{\omega} \quad (1-12)$$

对于不导电的均匀媒质, $\sigma=0$ ,则式(1-12)成为

$$\frac{1}{v^2} = \epsilon \mu$$

该式说明,在不导电的均匀媒质中,电磁波以速度 $v=1/\sqrt{\epsilon\mu}$ 在媒质中传播。在空气中,电磁波的传播速度,即光速,为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$$

式中, $\mu_0$ 和 $\epsilon_0$ 分别为真空中的磁导率和介电常数。

电磁波在真空中的传播速度 $c$ 与在不导电的均匀媒质中的传播速度 $v$ 之比称为介质的折射率 $n$ ,即

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\sqrt{\epsilon \mu}}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (1-13)$$

$\epsilon_r$ 、 $\mu_r$ 分别为媒质的相对介电常数和相对磁导率。在光频率下,一般光学材料 $\mu_r=1$ ,所以有

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (1-14)$$

公式(1-13),(1-14)称为麦克斯韦公式。它说明媒质的折射率是由其相对介电常数 $\epsilon_r$ 和相对磁导率 $\mu_r$ 所决定的。

对于导电媒质, $\sigma \neq 0$ ,令 $c/v=N$ 代入式(1-12),有

$$N^2 = (\epsilon\mu - i \frac{\sigma\mu}{\omega}) / \epsilon_0\mu_0 \quad (1-15)$$

由上式可知,  $N$  是一个复数, 称为复折射率。

令

$$N = \frac{c}{v} = n - ik \quad (1-16)$$

式中,  $n$  为媒质的折射率,  $k$  是消光系数。把式(1-16)平方, 并与式(1-15)比较, 得

$$n^2 - k^2 = \epsilon_r \quad (1-17)$$

$$2nk = \sigma / (\omega\epsilon_0) \quad (1-18)$$

因  $v = c/N$ ,  $\omega = 2\pi\gamma$ ,  $c = \lambda\gamma$ , 故式(1-11)可写成

$$\mathbf{E} = E_0 \exp\left[i\left(\omega t - \frac{2\pi N x}{\lambda}\right)\right] \quad (1-19)$$

上式表示波长为  $\lambda$  的单色平面波沿正  $x$  方向传播的波动方程式。若平面波沿单位矢量  $\mathbf{r}$  确定的方向传播, 即

$$\mathbf{r} = \alpha\mathbf{i} + \beta\mathbf{j} + \gamma\mathbf{k}$$

其中  $(\alpha, \beta, \gamma)$  为方向余弦,  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  为沿  $x, y, z$  轴的单位矢量。于是式(1-19)变成

$$\mathbf{E} = E_0 \exp\left\{i\left[\omega t - \frac{2\pi N}{\lambda}(\alpha x + \beta y + \gamma z)\right]\right\} \quad (1-20)$$

由于  $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{H}$  的解是对称的, 所以对  $\mathbf{H}$  也有

$$\mathbf{H} = H_0 \exp\left\{i\left[\omega t - \frac{2\pi N}{\lambda}(\alpha x + \beta y + \gamma z)\right]\right\} \quad (1-21)$$

把式(1-16)代入式(1-19), 可得

$$\mathbf{E} = E_0 \exp\left(-\frac{2\pi k x}{\lambda}\right) \cdot \exp\left[i\left(\omega t - \frac{2\pi n x}{\lambda}\right)\right] \quad (1-22)$$

上式说明电磁波在导电媒质中是一个衰减波, 消光系数  $k$  是媒质吸收电磁能量的度量。当传播距离为  $x = \lambda / (2\pi k)$  时, 波的振幅减小到原来的  $1/e$ 。振幅的减少是因为媒质内产生的电流将波的能量转换为热能所致。式中  $n x$  称为光程, 在膜系设计中, 膜层厚度为  $d$ , 常称  $nd$  为光学厚度。

从麦克斯韦方程可以得出  $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{H}$  的重要关系式。由式(1-21)得

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = i\omega \mathbf{H}$$

由式(1-4)及关系式  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$  可得

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -i\mu\omega \mathbf{H} \quad (1-23)$$

按定义

$$\nabla \times \mathbf{E} = \left(\frac{\partial}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z}\mathbf{k}\right) \times \mathbf{E}$$

有

$$\begin{aligned} (\nabla \times \mathbf{E})_z &= \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \\ &= -i \frac{2\pi N}{\lambda} (r_y E_x - r_x E_y) \\ &= i \frac{2\pi N}{\lambda} (\mathbf{r} \times \mathbf{E})_z \end{aligned}$$

$$(\nabla \times \mathbf{E})_y = -i \frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{r} \times \mathbf{E})_x$$

$$(\nabla \times \mathbf{E})_z = -i \frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{r} \times \mathbf{E})_y$$

因而

$$\nabla \times \mathbf{E} = -i \frac{2\pi N}{\lambda} (\mathbf{r} \times \mathbf{E}) \quad (1-24)$$

将式(1-23)代入上式得

$$\mathbf{H} = \frac{N}{c\mu} (\mathbf{r} \times \mathbf{E}) = \frac{N \cdot \sqrt{\epsilon_0/\mu_0}}{\mu_r} (\mathbf{r} \times \mathbf{E}) \quad (1-25)$$

由式(1-25)可知,电场  $\mathbf{E}$ 、磁场  $\mathbf{H}$  和波的传播方向三者是相互垂直的,并符合右旋法则(图 1-1)。由此可知,电磁波是横波。由式(1-25)还可以知道,对于媒质中任一点,  $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{H}$  不但相互垂直,而且数值间也有一定的比值,即

$$Y = \frac{|\mathbf{H}|}{|\mathbf{r} \times \mathbf{E}|} = N \cdot \sqrt{\epsilon_0/\mu_0} = N \cdot \mathcal{Y}_0 \quad (1-26)$$

$Y$  称为媒质的光学导纳,  $\mathcal{Y}_0 = \sqrt{\epsilon_0/\mu_0}$  称为自由空间导纳,在国际单位制中其值为  $(1/377)s$ 。若以自由空间导纳为单位,则光学导纳也可表示为

$$Y = N$$

式(1-25)可写成

$$\mathbf{H} = N (\mathbf{r} \times \mathbf{E}) \quad (1-27)$$

公式(1-27)称为导纳方程,在薄膜设计计算中很有用。

$\mathbf{E}$  和  $\mathbf{H}$  具有相同的位相,如图 1-2 所示。从波的传播角度看,电矢量和磁矢量处于同等地位。但从光和物质的作用看,电矢量  $\mathbf{E}$  占主要地位。例如,使照相底板感光的、刺激人眼的是电矢量  $\mathbf{E}$ ,而不是磁矢量  $\mathbf{H}$ ,所以常用  $\mathbf{E}$  代表光矢量。

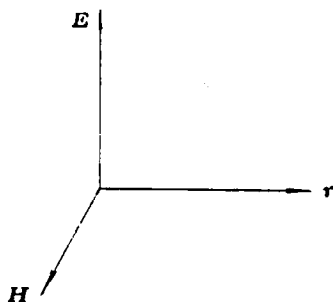


图 1-1 电磁波的右旋法则

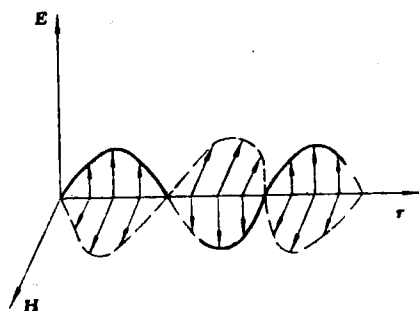


图 1-2 电磁波的传播示意图

## 二、菲涅尔公式

光学薄膜理论是研究光穿过膜系的传播特性的。所谓膜系是指薄膜与基片的组合系统。把两个平行的分界面夹持的空间定义为一层膜。为此,必须研究光在两种媒质界面上的行为。而菲涅尔公式正是描述这种行为的规律的,所以菲涅尔公式在薄膜光学中是非常重要的。

当光波从一种媒质传播到另一种媒质时,两种媒质的分界面上发生反射和折射,它们的

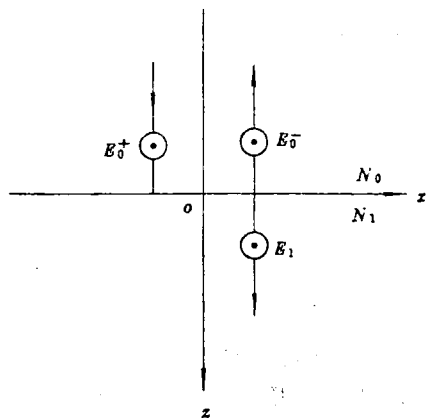


图 1-3 垂直入射时所取的电矢量的正方向

方向由反射定律和折射定律给出,入射光、反射光、折射光之间的振幅、能量关系可用菲涅尔公式表示。

先推导光波垂直入射到界面的菲涅尔公式。我们选择的符号规则如图 1-3 所示。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(都从纸面向外)。

在垂直入射情况下, $E$  和  $H$  皆平行于界面,在界面两侧是连续的。

在入射媒质  $N_0$  中,有入射波(正向行波)  $E_0^+$ 、 $H_0^+$ ,反射波(反向行波)  $E_0^-$ 、 $H_0^-$ ,波沿着  $z$  轴方向

传播,即  $r=K$ ,根据式(1-27),它们之间有如下关系

$$\left. \begin{aligned} H_0^+ &= N_0(K \times E_0^+) \\ H_0^- &= N_0(-K \times E_0^-) \end{aligned} \right\} \quad (1-28)$$

式中  $E_0^+$ 、 $E_0^-$  和  $H_0^+$ 、 $H_0^-$  为  $E_0$ 、 $H_0$  的分量。在折射媒质中,只有正向行波(即折射光波)  $E_1^+$ 、 $H_1^+$ ,故

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= H_1^+ \\ E_1 &= E_1^+ \\ H_1 &= N_1(K \times E_1) \end{aligned} \right\} \quad (1-29)$$

应用边界条件

$$E_1 = E_1^+ = E_0^+ + E_0^- \quad (\text{在 } z=0) \quad (1-30)$$

$$H_1 = H_1^+ = H_0^+ + H_0^- \quad (\text{在 } z=0) \quad (1-31)$$

将式(1-28)、(1-29)代入式(1-31),得

$$\begin{aligned} N_1(K \times E_1) &= N_0(K \times E_0^+ - K \times E_0^-) \\ \text{即 } N_1 E_1 &= N_0(E_0^+ - E_0^-) \end{aligned} \quad (1-32)$$

利用式(1-30)与式(1-32),得

$$\begin{aligned} E_0^- &= \frac{N_0 - N_1}{N_0 + N_1} E_0^+ \\ r = \frac{E_0^-}{E_0^+} &= \frac{N_0 - N_1}{N_0 + N_1} \end{aligned} \quad (1-33)$$

$r$  称振幅反射系数,或称菲涅尔反射系数。利用式(1-30)和(1-32)得

$$\begin{aligned} (N_0 + N_1) E_1^+ &= 2N_0 E_0^+ \\ t = \frac{E_1^+}{E_0^+} &= \frac{2N_0}{N_0 + N_1} \end{aligned} \quad (1-34)$$

式中  $t$  称为振幅透射系数或非涅耳透射系数。

现将上述结果推广到倾斜入射的情况。其方法是引进一个新的物理量——修正光纳  $\eta$ 。在光波倾斜入射到界面时,只有  $E$  和  $H$  的切向分量  $E_t$  和  $H_t$  平行于界面,仿照公式(1-28), $\eta$  的定义为



$$H_i^+ = \eta(K \times E_i^+)$$

$$H_i^- = \eta(-K \times E_i^-)$$

式中  $\eta$  不仅与入射角有关, 而且还与  $E$  和  $H$  相对于入射平面的方位有关, 但任何特定方位都可以归纳为两个标准方位的组合(图 1-4):

(1)  $E$  在入射平面, 这个波称为 p 偏振波, 或称横磁波(TM 波)。

(2)  $E$  垂直于入射平面, 这个波称为 s 偏振波, 或称横电波(TE 波)。

对 p 偏振波,  $E$  在入射面内, 与界面成  $\theta$  角(也等于入射角);  $H$  垂直于入射面, 与界面平行, 如图 1-5 所示。

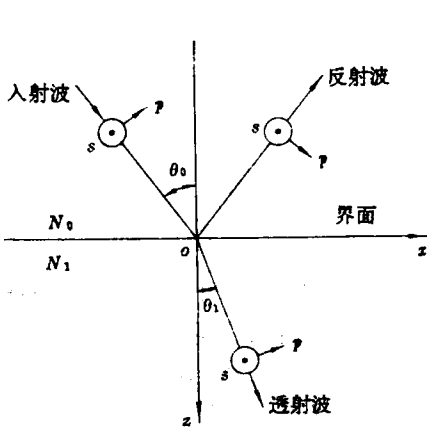


图 1-4 电矢量  $E$  的两个分量  $E_p$ 、 $E_s$

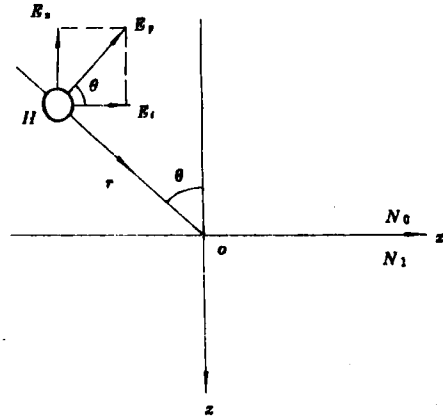


图 1-5 入射波为 p 偏振波的电磁矢量图

因此,  $E$  的切向分量为

$$E_t = E \cos \theta, \quad E = E_t / \cos \theta$$

$$H_t = H = N(K \times \frac{E_t}{\cos \theta}) = \frac{N}{\cos \theta}(K \times E_t)$$

则

$$\eta_p = N / \cos \theta$$

对 s 偏振波,  $E$  与界面平行,  $H$  与界面成  $\theta$  角, 用与上面相似的证明, 得

$$\eta_s = N \cos \theta$$

现在, 可以用光波垂直入射时的公式, 求得倾斜入射时的菲涅尔公式为

$$\begin{aligned} r_p &= \left( \frac{E_0^-}{E_0^+} \right)_p = \left( \frac{E_{0\alpha}^- / \cos \theta_0}{E_{0\alpha}^+ / \cos \theta_0} \right) = \frac{E_{0\alpha}^-}{E_{0\alpha}^+} = \frac{\eta_{0p} - \eta_{1p}}{\eta_{0p} + \eta_{1p}} \\ &= \frac{N_0 \cos \theta_1 - N_1 \cos \theta_0}{N_0 \cos \theta_1 + N_1 \cos \theta_0} = \frac{\operatorname{tg}(\theta_1 - \theta_0)}{\operatorname{tg}(\theta_1 + \theta_0)} \end{aligned} \quad (1-35)$$

$$\begin{aligned} r_s &= \left( \frac{E_0^-}{E_0^+} \right)_s = \frac{E_{0\alpha}^-}{E_{0\alpha}^+} = \frac{\eta_{0s} - \eta_{1s}}{\eta_{0s} + \eta_{1s}} = \frac{N_0 \cos \theta_0 - N_1 \cos \theta_1}{N_0 \cos \theta_0 + N_1 \cos \theta_1} \\ &= \frac{\sin(\theta_0 - \theta_1)}{\sin(\theta_0 + \theta_1)} \end{aligned} \quad (1-36)$$

$$\begin{aligned} t_p &= \left( \frac{E_1^+}{E_0^+} \right)_p = \frac{E_{1\alpha}^+ / \cos \theta_1}{E_{0\alpha}^+ / \cos \theta_0} = \frac{2\eta_{0p}}{\eta_{0p} + \eta_{1p}} \cdot \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta_1} \\ &= \frac{2N_0 \cos \theta_0}{N_0 \cos \theta_1 + N_1 \cos \theta_0} = \frac{2\sin \theta_1 \cos \theta_0}{\sin(\theta_0 + \theta_1) \cos(\theta_0 - \theta_1)} \end{aligned} \quad (1-37)$$