



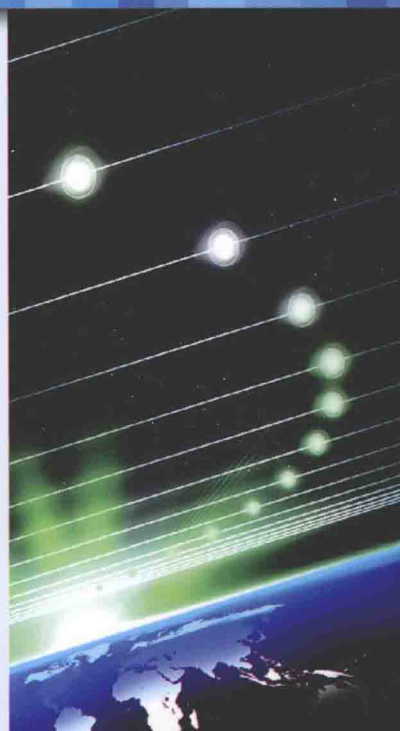
普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

薄膜光学与薄膜技术基础

曹建章 徐平 李景镇 编著



科学出版社



普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

薄膜光学与薄膜技术基础

曹建章 徐 平 李景镇 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者多年来从事薄膜光学与薄膜技术课程教学研究成果的总结。全书共分三篇 13 章:第一篇分为 4 章,讲述薄膜光学基本理论,内容包括各向同性均匀和非均匀、各向异性均匀和非均匀、吸收和导电层状介质薄膜反射和透射特性计算;第二篇分为 6 章,分类讲述增透膜、高反射膜、带通滤光片、截止滤光片、带阻滤光片和分光镜的膜系构成、特性描述及其应用;第三篇分为 3 章,比较全面地介绍了物理气相沉积、化学气相沉积和液相沉积薄膜制备方法原理、光学薄膜检测技术,以及一些金属薄膜、半导体薄膜和介质薄膜制备实例。鉴于薄膜光学与薄膜技术的飞速发展,本书在取材的深度和广度上充分考虑到现代前沿科学领域的知识内容。

本书内容翔实,概念清晰,数学推导严谨,层次分明,三篇分章具有相对独立性,在内容上作适当取舍可作为不同专业的高年级本科生教材使用,也可作为研究生的教学参考书。对于从事薄膜光学与薄膜技术的专业科技工作者,本书也具有重要参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

薄膜光学与薄膜技术基础/曹建章,徐平,李景镇编著.—北京:科学出版社,2014.1

(普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材)

ISBN 978-7-03-033519-1

I. ①薄… II. ①曹… ②徐… ③李… III. ①薄膜光学②薄膜技术
IV. ①O484.4②TD43

中国版本图书馆(CIP)数据核字(2014)第001767号

责任编辑:贾瑞娜/责任校对:何艳萍

责任印制:阎磊/封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年1月第一版 开本:787×1092 1/16

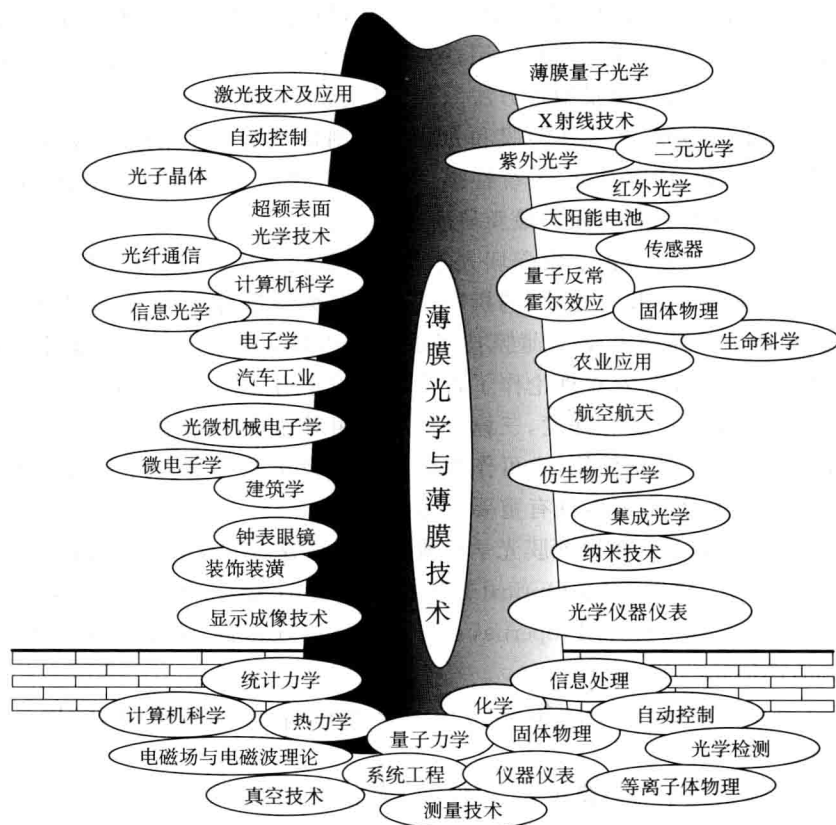
2014年1月第一次印刷 印张:29 3/4

字数:700 000

定价:65.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

薄膜光学是研究光在各向同性、各向异性、均匀、非均匀、吸收和导电分层介质中的传播规律,包括光的反射、透射、吸收以及相位和偏振特性等。随着镀膜技术的发展,光学薄膜的应用领域日益广泛,涉及国防、通信、计算机、建筑、家电、能源和汽车等;而薄膜材料在众多学科和工程领域的应用,已成为新技术革命的先导和支柱,形成 21 世纪世界经济发展和竞争的庞大产业。因此,薄膜光学与薄膜技术是众多交叉学科的发展基础和生长点,也是构筑现代高新技术的基本要素。薄膜光学、薄膜技术与众多科学领域的支撑关系如下图。



薄膜光学与薄膜技术的发展涉及几乎所有前沿学科。近十年来,在国内高等院校和科研院所从事以光学薄膜和薄膜材料为内容的研究项目和研究经费不断增长,研究队伍跨越专业和行业界限不断壮大。为了适应科研和市场对薄膜光学与薄膜技术高级专门技术人才的需求,国内高等院校和科研院所许多专业,如物理、化学、工程材料、半导体物理与器件、光信息技术、能源、光微机械、电子科学与工程、电子材料与器件、光子晶体、航空航天等相继开设了“薄膜光学与薄膜技术”或“薄膜科学与技术”方面的课程,培养出许多从事薄膜技术的专门人才,在膜系开发、镀膜工艺参数研究、薄膜特性检测和机理研究、镀膜设备研制等方面取得了可喜的研究成果。相信在不久的将来,光学薄膜和薄膜材料在不同科学领域理论和实验的纵深研

究,将会使许多科学难题取得突破,也必将使更多微观粒子特性通过薄膜在宏观世界得以体现,给人们带来一个更加“绚丽多彩”的生活世界。

本书特点如下:

- (1) 论述由表及里、由浅入深,系统全面地讲解薄膜光学的基本理论及应用。
- (2) 数学描述严谨而详细,概念清晰,内容层次分明,易于自学。
- (3) 内容反映教学改革成果,安排合理,学生易于接受。
- (4) 取材在深度及广度上充分反映现代前沿科学领域的知识内容。
- (5) 本书理论联系实际,面向工程应用,体现专业特色。

本书是作者自2005年讲授“薄膜光学与薄膜技术”课程以来,根据讲义并参考大量国内外文献和教材整理编写而成,全书共分为三篇13章。第一篇分为4章,讲述薄膜光学基本理论,内容包括各向同性均匀和非均匀、各向异性均匀和非均匀、吸收和导电层状介质薄膜反射和透射特性计算;第二篇分为6章,分类讲述增透膜、高反射膜、带通滤光片、截止滤光片、带阻滤光片和分光镜的膜系构成、特性描述及其应用;第三篇分为3章,比较全面地介绍了物理气相沉积、化学气相沉积和液相沉积薄膜制备方法原理,以及光学薄膜检测技术,最后在光学薄膜材料一章给出了一些金属薄膜、半导体薄膜和介质薄膜制备实例。全书选材吸收国内外教材的优点,力求做到取材新颖、内容全面、系统性强,并注重理论与实际应用相结合,尽可能多地反映我国在光学薄膜与薄膜材料方面的最新科研成果。

另外,本书作者2006年承担了由深圳大学李景镇教授主编、国家出版基金资助出版的《光学手册》第十九章《薄膜光学和滤光片》的撰写工作。在编写过程中由于《光学手册》章节篇幅字数所限,未能全面反映薄膜光学与薄膜技术的基本内容,尤其是理论部分过于简略。鉴于此,作者在本书中对薄膜光学宏观理论作了较为详细的介绍,以弥补《光学手册》中的不足。

本书取材具有一定的广度和深度,三篇分章具有相对独立性,在内容上作适当取舍可作为不同专业的高年级本科生教材使用,也可作为研究生的教学参考书。对于从事薄膜光学与薄膜技术的专业科技工作者,本书也具有重要参考价值。

本书的编写完成得益于国内外薄膜光学与薄膜技术领域知名专家教授的著作,其代表作有:

- (1) Macleod H A. Thin-Film Optical Filters. London: Adam Hilger Ltd., 1969.
- (2) Dobrowolski J A. Optical Properties of Films and Coatings. Handbook of Optics (Volume IV, Third edition), McGraw-Hall, 2010.
- (3) John Lekner. Theory of Reflection of Electromagnetic and Particle Waves. Martinus Nijhoff Publishers, 1987.
- (4) 李正中. 薄膜光学与镀膜技术. 4版. 艺轩图书出版社.
- (5) 唐晋发, 郑权. 应用薄膜光学. 上海: 上海科学技术出版社, 1984.
- (6) 林永昌, 卢维强. 光学薄膜原理. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- (7) 范修正. 光学薄膜的特性及应用. PPT. 2009.

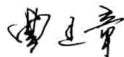
此外,本书在编写过程中还参考和引用了大量国内外文献和国内许多优秀硕士和博士论文,在此对所列文献作者深表感谢。

本书的编写得到深圳大学电子科学与技术学院领导的重视和大力支持,在此表示诚挚的谢意。作者的导师西北工业大学的陈国瑞教授和西安交通大学的宋建平教授阅读了部分稿件并提出有益建议,特表示感谢。深圳大学电子科学与技术学院2009级本科生在使用本书初稿过程中,陈运同学利用假期认真阅读了第1章、第5章和第7章讲稿,提出了一些笔误之处。

本书完稿后,学院办公室的张鹏同学帮忙打印了书稿,在此一并表示感谢。在编写本书过程中,深圳大学图书馆的李玲老师帮忙检索和打印了许多文献,特表示感谢。

本书出版得到深圳大学电子科学与技术学院学科建设基金和深圳市微纳光子信息技术重点实验室资助。

虽然作者在编写本书过程中,对数学公式经过认真推导,对稿件几经校正,但书中涉及内容广泛,限于作者水平,书中疏漏之处在所难免,恳请读者及同行予以批评指正。



2013年10月于深圳大学

E-mail: caojianzhang@sina.com

第一篇 薄膜光学基本理论

第 1 章 薄膜光学的电磁理论基础	1	2.5.2 全透射	37
1.1 麦克斯韦方程	1	2.5.3 反射系数、透射系数振幅和相位随 入射角变化	38
1.2 平面电磁波	6	2.6 反射率和透射率	39
1.2.1 复矢量波动方程——齐次亥姆霍兹 方程	6	2.6.1 理想介质分界面的反射率和透射率	40
1.2.2 理想介质中的平面波解	7	2.6.2 吸收介质分界面的反射率和透射率	41
1.2.3 吸收介质中的平面波解	8	2.6.3 空气与金属导体表面的反射率 ...	43
1.3 平均电磁能流密度——光强	9	习题	44
1.4 电磁波谱、光谱	10	参考文献	44
习题	12	第 3 章 平面光波在平界面层状介质薄膜 中的反射与透射	45
参考文献	12	3.1 法向阻抗和光学有效导纳的概念 ...	45
第 2 章 平面光波在两介质分界平面上的 反射与透射	14	3.2 平面分界面单层均匀介质薄膜的 反射与透射	47
2.1 各向同性理想介质界面的反射与 透射	14	3.3 平面分界面多层均匀介质薄膜的 反射与透射	53
2.1.1 S 波反射与透射	14	3.3.1 平面分界面多层均匀介质薄膜反射系 数和透射系数计算的矩阵方法	53
2.1.2 P 波反射与透射	16	3.3.2 多层增透膜和高反射膜的基本构成 特点	55
2.2 各向同性吸收介质界面的反射与 透射	18	3.4 非均匀介质膜层的特征矩阵	61
2.2.1 S 波反射与透射	18	3.4.1 一阶近似	62
2.2.2 P 波反射与透射	20	3.4.2 二阶近似	63
2.3 非均匀介质界面的反射与透射 ...	21	3.5 各向异性介质薄膜的分层矩阵计 算方法	64
2.3.1 几何光学近似条件下非均匀介质中 的波传播	21	3.5.1 各向异性介质中的矩阵波动方程 ...	64
2.3.2 任意非均匀介质界面的反射系数 方程	24	3.5.2 各向异性介质薄膜的矩阵波动方程	66
2.4 各向异性介质界面的反射与透射 ...	30	3.5.3 均匀各向异性介质薄膜矩阵波动方 程的解	70
2.4.1 平面对称各向异性介质中麦克斯韦 方程的分量形式	31		
2.5 反射系数和透射系数随入射角的 变化	36		
2.5.1 全反射与倏逝波	36		

3.5.4 单轴各向异性介质薄膜的特征矩阵	72	4.2 导纳图解法	87
3.5.5 非均匀各向异性介质薄膜矩阵波动 方程的数值解	74	4.2.1 单一等效界面等反射率导纳圆图和 等相位导纳圆图	87
3.5.6 单层各向异性介质薄膜的反射与 透射	75	4.2.2 单层膜系等折射率导纳圆图和等相 位导纳圆图	89
习题	79	4.2.3 多层膜系等折射率导纳圆图	92
参考文献	79	4.3 金属膜导纳圆图	97
第4章 膜系设计图示法	81	4.4 膜系层间电场分布	99
4.1 矢量法	81	习题	100
		参考文献	101

第二篇 光学薄膜分类及应用

第5章 增透膜	102	6.8 金属反射镜	134
5.1 表面反射对光学系统性能的影响	102	6.8.1 常用金属反射镜	134
5.2 基底介质非相干叠加的透射率 ..	104	6.8.2 金属-介质反射镜	136
5.3 透射滤光片组合透射率	106	6.9 影响反射特性的因素	137
5.4 均匀介质增透膜	107	6.10 高反射镜应用实例	143
5.4.1 单层均匀介质增透膜	107	6.10.1 激光高反射镜	143
5.4.2 多层均匀介质增透膜	108	6.10.2 光刻机系统 193nm 高反射膜	144
5.5 非均匀介质增透膜	113	6.10.3 DLP/LCoS 投影薄膜——宽角度 高反射镜	145
5.6 入射角变化对透射率的影响	115	习题	146
5.7 增透膜应用实例——液晶显示增 透膜	117	参考文献	146
习题	118	第7章 带通滤光片	149
参考文献	118	7.1 带通滤光片的特性描述	149
第6章 高反射膜	120	7.2 带通滤光片的基本构型——法布 里-珀罗干涉仪及其变形	150
6.1 反射镜组合的反射率	120	7.3 法布里-珀罗干涉仪透射率计算	151
6.2 周期多层膜系的反射率	121	7.3.1 单层薄膜反射与透射计算的有效 界面法	151
6.2.1 周期多层膜系的特征矩阵	121	7.3.2 膜系透射定理	153
6.2.2 周期多层膜系的反射率和透射率	122	7.3.3 法布里-珀罗干涉仪的透射率计算	155
6.3 [HL] ^m 类型的周期多层膜	123	7.3.4 法布里-珀罗干涉仪透射特性分析	156
6.4 (0.5L)H(0.5L) ^m 类型的对称 周期多层膜	126	7.3.5 特殊带通滤光片信噪比的计算 ..	164
6.5 周期多层膜构成的宽带高反射膜	128	7.4 窄带和中等带宽滤光片	164
6.6 中远红外区域的多层高反射膜 ..	129	7.4.1 法布里-珀罗干涉滤光片	164
6.7 软 X 射线区域的多层高反射膜 ..	131		

7.4.2 窄带平顶多腔带通滤光片	172	等效相位	224
7.4.3 诱导带通滤光片	174	9.2.2 多层膜透射率的不变特性	224
7.5 超窄带带通滤光片	183	9.2.3 周期对称多层膜通带内波纹的压缩	227
7.6 宽带带通滤光片	185	9.2.4 四种介质周期对称膜系构成的带阻滤光片	230
7.7 带通滤光片的角特性	186	9.3 非周期对称多层膜构成的带阻滤光片	231
7.8 极远紫外及软 X 射线区域带通滤光片	190	9.4 正弦周期折射率带阻滤光片	232
7.9 多通道窄带带通滤光片	192	9.4.1 正弦周期折射率带阻滤光片的基本构成特点	233
习题	193	9.4.2 正弦周期折射率带阻滤光片设计的傅里叶变换方法	234
参考文献	193	习题	241
第 8 章 截止滤光片	196	参考文献	241
8.1 截止滤光片的特性描述	196	第 10 章 分光镜	243
8.2 吸收型截止滤光片	197	10.1 中性分光镜	243
8.3 干涉型截止滤光片	198	10.1.1 金属膜中性分光	244
8.3.1 1/4 波长周期膜系的透射特性	198	10.1.2 介质膜中性分光	245
8.3.2 周期对称膜系的光学等效导纳和等效相位	199	10.1.3 金属-介质膜中性分光	247
8.3.3 [(0.5H)L(0.5H)]和[(0.5L)H(0.5L)]类型对称膜系的光学等效导纳和等效相位	201	10.2 双色分光镜	249
8.3.4 [(0.5H)L(0.5H)] ^m 和[(0.5L)H(0.5L)] ^m 类型周期对称膜系的透射率	203	10.3 偏振分光	254
8.3.5 透射带内波纹的压缩	208	10.3.1 偏振特性的描述	254
8.3.6 截止带的展宽	210	10.3.2 平板偏振分光镜	255
8.3.7 透射带的展宽和压缩	212	10.3.3 棱镜偏振分光	258
8.4 金属-介质膜截止滤光片	218	10.3.4 宽角宽带偏振分光	259
8.5 热反射镜、冷反射镜和太阳能电池覆盖膜	218	10.4 消偏振分光	262
习题	221	10.4.1 偏振分离的描述	263
参考文献	221	10.4.2 介质膜消偏振分光设计实例	267
第 9 章 带阻滤光片	223	10.4.3 金属-介质膜消偏振分光设计实例	271
9.1 带阻滤光片的特性描述	223	10.4.4 其他消偏振分光设计方法	273
9.2 周期对称膜系构成的带阻滤光片	223	10.5 分光中的消色差问题	280
9.2.1 单个周期对称膜层的等效导纳和		习题	281
		参考文献	282

第三篇 薄膜技术基础

第 11 章 薄膜制备技术	283	11.1.1 真空的基本知识	283
11.1 真空技术简介	283	11.1.2 真空的获得	284

11.1.3 真空的测量	286	12.3.2 散射测量	342
11.2 薄膜制备方法——物理气相沉积	289	12.3.3 薄膜表面轮廓及粗糙度测量	344
11.2.1 蒸镀法	289	12.4 光学薄膜常数测量	347
11.2.2 溅射法	300	12.4.1 光度法	348
11.3 薄膜制备方法——化学气相沉积	306	12.4.2 全反射衰减法	354
11.3.1 化学气相沉积的原理	307	12.4.3 椭圆偏振法	357
11.3.2 常压化学气相沉积	308	12.5 光学薄膜激光损伤阈值检测	358
11.3.3 低压化学气相沉积	308	12.5.1 光学薄膜激光损伤机理	359
11.3.4 等离子体增强化学气相沉积	309	12.5.2 影响光学薄膜激光损伤阈值的因素	360
11.3.5 光化学气相沉积	310	12.5.3 激光损伤阈值测量方法	362
11.3.6 金属有机化学气相沉积	311	12.5.4 提高光学薄膜损伤阈值的途径	366
10.3.7 原子层沉积	312	12.6 薄膜微结构和化学成分检测	368
11.4 薄膜制备方法——液相沉积	313	12.6.1 薄膜微结构	368
11.4.1 化学镀	313	12.6.2 薄膜微结构检测	371
11.4.2 阳极氧化法	314	12.6.3 雕塑薄膜	372
11.4.3 溶胶-凝胶法	314	12.6.4 薄膜化学成分检测	373
11.4.4 电镀	315	12.7 薄膜非光学特性测量	375
11.4.5 LB膜制备技术	315	12.7.1 薄膜应力测量	375
11.5 光刻蚀	316	12.7.2 薄膜附着力测量	383
11.5.1 光刻工艺	316	12.7.3 薄膜硬度测量	388
11.5.2 光刻胶	317	12.7.4 薄膜密度和堆积密度测量	391
11.5.3 掩模	318	12.7.5 薄膜恒温、恒湿和液体侵蚀环境特性检测	394
11.5.4 曝光	318	习题	394
11.5.5 刻蚀方法	318	参考文献	395
11.5.6 无掩模刻蚀	321	第13章 光学薄膜材料	399
11.5.7 刻蚀图形及折射率	323	13.1 薄膜结晶形态几何描述	399
习题	323	13.1.1 晶体结构的基本概念	399
参考文献	324	13.1.2 晶体中的缺陷	402
第12章 光学薄膜检测技术	326	13.1.3 单晶、多晶和非晶薄膜	405
12.1 光谱分析技术基础	326	13.2 金属薄膜	406
12.1.1 光度计和光谱仪的基本构成	326	13.2.1 银膜(Ag)	406
12.1.2 紫外-可见分光光度计和傅里叶变换红外光谱仪	330	13.2.2 铝膜(Al)	408
12.2 薄膜透射率和反射率测量	333	13.2.3 金膜(Au)	413
12.2.1 透射率测量	333	13.2.4 铬膜(Cr)	416
12.2.2 反射率测量	334	13.2.5 铂膜(Pt)	417
12.3 薄膜吸收和散射测量	338	13.3 半导体薄膜	418
12.3.1 吸收测量	338	13.3.1 锗薄膜(Ge)	418

13.3.2 硅薄膜(Si)	423	13.4.4 二氧化硅薄膜(SiO_2)	447
13.3.3 氧化铟薄膜(In_2O_3)	427	13.4.5 氧化钽薄膜(Ta_2O_5)	448
13.3.4 氧化锌薄膜(ZnO)	429	13.5 毒性薄膜材料	450
13.3.5 硫化锌薄膜(ZnS)	433	习题	450
13.3.6 二氧化锡薄膜(SnO_2)	436	参考文献	451
13.4 介质薄膜	440		
13.4.1 氟化镁薄膜(MgF_2)	440	附录 A 元素周期表	453
13.4.2 氧化铝薄膜(Al_2O_3)	441	附录 B 光学薄膜材料有用光谱范围	454
13.4.3 氧化铅薄膜(PbO)	444	附录 C 常见薄膜材料参数	455

第一篇 薄膜光学基本理论

第 1 章 薄膜光学的电磁理论基础

20 世纪上半叶,通过大量的光的干涉、衍射和偏振实验,证明光具有波动性。到了 1864 年麦克斯韦建立经典电磁理论之后,光作为电磁波频谱中的特定波段在理论和实验上得到证实,由此光的电磁理论随之诞生。光学薄膜的理论基础是光的电磁理论,其内容包括:光的干涉、偏振和吸收,平面电磁波及平面电磁波在介质表面的反射和透射等。鉴于后续章节的需要,本章简要介绍麦克斯韦方程、描述介质特性的物质方程、平面电磁波的解形式,以及光强和电磁波谱。

1.1 麦克斯韦方程

宏观上讲,光的电磁理论全面揭示了光的主要性质,不仅适合各向同性介质,也适合各向异性介质;不仅适用于均匀介质,也适合非均匀介质;不仅适合吸收介质,也适合导体。麦克斯韦方程是描述一切宏观电磁现象的普遍规律,因而,薄膜光学中描述光传播特性的光波动方程可以由麦克斯韦方程导出。下面介绍在不同介质情况下光传播所满足的麦克斯韦方程的限定形式。

为了讨论方便起见,考虑时谐电磁场,即空间任一点的电场强度和磁场强度随时间作正弦或余弦变化,场量随时间变化的因子取 $e^{j\omega t}$,则有

$$\begin{cases} \mathbf{E}(\mathbf{r};t) = \operatorname{Re} [\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}) e^{j\omega t}] \\ \mathbf{D}(\mathbf{r};t) = \operatorname{Re} [\tilde{\mathbf{D}}(\mathbf{r}) e^{j\omega t}] \\ \mathbf{H}(\mathbf{r};t) = \operatorname{Re} [\tilde{\mathbf{H}}(\mathbf{r}) e^{j\omega t}] \\ \mathbf{B}(\mathbf{r};t) = \operatorname{Re} [\tilde{\mathbf{B}}(\mathbf{r}) e^{j\omega t}] \end{cases} \quad (1-1)$$

式中, $\tilde{\mathbf{E}}$ 、 $\tilde{\mathbf{D}}$ 、 $\tilde{\mathbf{H}}$ 和 $\tilde{\mathbf{B}}$ 为时谐量的复振幅矢量,仅是空间坐标 \mathbf{r} 的函数,与时间变量无关; ω 为光波角频率; $\operatorname{Re}[\cdot]$ 表示取实部,如果场量是时间 t 的正弦函数,在式(1-1)中应该取虚部,即 $\operatorname{Im}[\cdot]$ 。

在无源区域,介质介电常数为 ϵ ,且介质的电导率 $\sigma \neq 0$,则时谐形式的麦克斯韦方程为

$$\begin{cases} \nabla \times \tilde{\mathbf{H}} = j\omega \tilde{\epsilon} \tilde{\mathbf{E}} \\ \nabla \times \tilde{\mathbf{E}} = -j\omega \tilde{\mathbf{B}} \\ \nabla \cdot \tilde{\mathbf{B}} = 0 \\ \nabla \cdot \tilde{\mathbf{D}} = 0 \end{cases} \quad (1-2)$$

式中

$$\tilde{\epsilon}_c = \epsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (1-3)$$

为介质的等效复介电常数。介电常数的虚部非零表明介质中存在吸收。

在求解具体的薄膜光学问题时,麦克斯韦方程还涉及反映介质特性的关系,即电磁场量之间关系的物质方程

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{D}} = \epsilon_0 \tilde{\epsilon}_r \tilde{\mathbf{E}} \\ \tilde{\mathbf{B}} = \mu_0 \tilde{\mathbf{H}} \\ \tilde{\mathbf{J}} = \sigma \tilde{\mathbf{E}} \end{cases} \quad (1-4)$$

式中, $\epsilon_0 \approx 8.85 \times 10^{-12}$ (F/m) 为真空介电常数; $\tilde{\epsilon}_r$ 为复相对介电常数; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m) 为真空磁导率; σ 为电导率。式(1-4)中取 $\mu = \mu_0$ 是假定光学介质为非磁性介质。

式(1-2)和式(1-4)构成麦克斯韦方程的限定形式,当 $\tilde{\epsilon}_r$ 和 σ 给定之后,就可以针对具体问题进行求解。

下面就薄膜光学中涉及的介质参数作简单讨论。

(1) 对于各向同性线性均匀介质,介质非导电 $\sigma = 0$, $\tilde{\epsilon}_r$ 取实常数,则式(1-3)简化为

$$\tilde{\epsilon}_c(\mathbf{r}) = \epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon_0 n^2 \quad (1-5)$$

式中, n 表示介质的折射率,均匀介质取常数值。

(2) 对于各向同性线性非均匀介质,介质非导电 $\sigma = 0$, $\tilde{\epsilon}_r$ 为实函数,则有

$$\tilde{\epsilon}(\mathbf{r}) = \epsilon(\mathbf{r}) = \epsilon_0 \epsilon_r(\mathbf{r}) = \epsilon_0 n^2(\mathbf{r}) \quad (1-6)$$

非均匀介质折射率 n 随空间变量变化。

(3) 金属材料对光的吸收体现在电导率 $\sigma \neq 0$ 。在金属材料中,由于电子运动是自由的,所以在光波交变电场的作用下,通过电子运动方程的求解,可得金属材料的电导率为

$$\sigma = \frac{Ne^2}{m_e} \tau \quad (1-7)$$

式中, N 为单位体积的导电电子数; m_e 为电子质量; $-e$ 为电子电荷; τ 称为弛豫时间,表示在时间 τ 内电流密度衰减到初始值的 $1/e$; $m_e \tau^{-1}$ 代表电子运动的阻尼系数。

在介质均匀的情况下,利用麦克斯韦方程(1-2)可导出金属材料的介电常数为

$$\tilde{\epsilon}_c(\omega) = \epsilon_0 \tilde{\epsilon}_r(\omega) = \epsilon_0 \tilde{N}^2(\omega) = \epsilon_0 \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + j\omega\tau^{-1}} \right] \quad (1-8)$$

式中, \tilde{N} 为复折射率; ω 为光波角频率; ω_p 为金属的等离子体频率,大小为

$$\omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{m_e \epsilon_0}} = \sqrt{\frac{\mu_0 \sigma c^2}{\tau}} \quad (1-9)$$

式中, c 表示真空中的光速。

令

$$\tilde{\epsilon}_r = \epsilon_r - j\epsilon_i, \quad \tilde{N} = n - ja \quad (1-10)$$

式(1-8)和式(1-10)联立求解,得到

$$\begin{cases} n^2 - \alpha^2 = \frac{\omega^4 + \omega^2 \tau^{-2} - \omega_p^2 \omega^2}{\omega^4 + \omega^2 \tau^{-2}} \\ n\alpha = \frac{1}{2} \frac{\omega_p^2 \omega \tau^{-1}}{\omega^4 + \omega^2 \tau^{-2}} \end{cases} \quad (1-11)$$

式中, n 称为导电介质的折射率; α 称为消光系数。由式(1-11)可以看出, 导电介质的折射率和消光系数是光波频率的函数, 所以光波在导电介质中传播或在导电介质表面反射和透射都存在色散。

(4) 对于通常的光学介质, 其特征表现为在某一光频范围的辐射是透明的, 如玻璃对于可见光波段是透明的, 而半导体锗对于波长大于 $2\mu\text{m}$ 的红外波段是透明的, 等等。图 1-1 给出的是一些常用光学介质的透光范围。实际上, 光学介质与金属导体一样, 对光也有吸收, 这样就出现光学介质的非透光范围。但光学介质对光吸收的微观机理与金属对光的吸收机理不同。光学介质中没有自由电子, 当光波通过介质时, 介质中的束缚电荷会重新排列形成电偶极子, 所以可把介质看作是由电偶极子构成的。当入射光波的频率与电偶极子的固有频率一致时, 会发生共振现象, 对光产生强烈吸收。而在其他情况下, 介质对光吸收很小, 表现为透明。因此, 介质对光的吸收分为两类: 一般吸收和选择吸收。一般吸收与波长无关, 吸收系数很小; 选择吸收与波长紧密相关, 吸收系数很大。选择吸收与构成介质的电偶极子有关, 反映了介质中原子结构的本质。

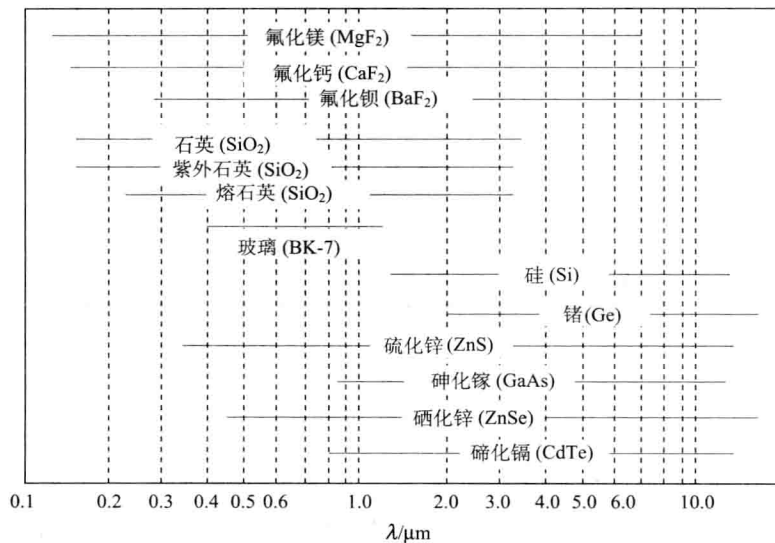


图 1-1 常用光学材料的透光范围

光学介质的折射率随波长而改变的现象称为介质的色散。色散与吸收密切相关, 根据经典振子模型, 可以说明色散和吸收现象。假设单原子中有 Z 个电子, f_i 个电子对应的振子固有角频率和衰减系数分别为 ω_{0i} 和 γ_i , 则由振子的运动方程求解可得介质的相对介电常数为

$$\tilde{\epsilon}_r = \tilde{N}^2(\omega) = 1 + \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_e} \sum_i \frac{f_i}{\omega_{0i}^2 - \omega^2 - j\gamma_i \omega} \quad (1-12)$$

式中, $\tilde{N} = n - j\alpha$ 为复折射率; N 为介质单位体积中的原子数; m_e 为电子质量; e 为电子电荷;

ω 为光波角频率。式(1-12)是对一个原子中的所有振子类型求和,显然应有

$$\sum_i f_i = Z \quad (1-13)$$

式(1-12)是由稀薄气体推导出来的,对于稠密介质液体和固体,需要考虑偶极振子间的相互作用,对式(1-12)进行修正,则可得到

$$\frac{\tilde{N}^2 - 1}{\tilde{N}^2 + 2} = \frac{Ne^2}{3\epsilon_0 m_e} \sum_i \frac{f_i}{\omega_{0i}^2 - \omega^2 - j\gamma_i \omega} \quad (1-14)$$

当 $\omega_{0i}^2 - \omega^2 \gg \gamma_i \omega$ 时,即电偶极子的固有频率远远大于入射光频时,则有

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{Ne^2}{3\epsilon_0 m_e} \sum_i \frac{f_i}{\omega_{0i}^2 - \omega^2} \quad (1-15)$$

该式表明折射率取实数,对应于光学介质是透明的,但折射率也与入射光频有关,属一般吸收。一般吸收折射率随波长的增加而减小,这种现象称为正常色散。图 1-2 给出的是几种玻璃的折射率随波长变化的曲线,图中阴影部分对应于可见光波段。由图可以看出,在正常色散范围,折射率在短波区域变化较快,长波区域变化缓慢。

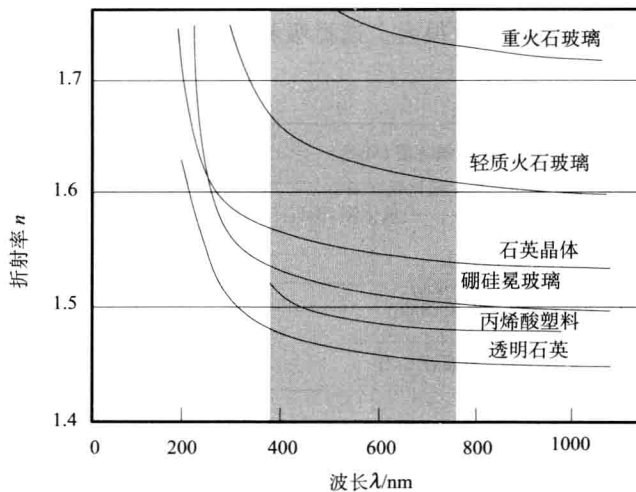


图 1-2 几种玻璃的折射率随波长的变化曲线

当 $\omega = \omega_{0i}$ 时,即当入射光频率接近电偶极子的固有频率,式(1-14)中的衰减项 $\gamma_i \omega$ 起作用,介质折射率为复值,属选择吸收,介质对光不透明。在此波段,折射率随波长的增加而增加,称为反常色散。因此在 ω_{0i} 邻近频带出现吸收带,在吸收带内折射率随频率的增加(波长的减小)而减小,如图 1-3 所示。

图 1-4 给出的是其他一些常用光学晶体的折射率随波长和频率的变化曲线。

(5) 如果介质具有平面对称的各向异性(即单轴晶体),如液晶,那么,介电常数具有对角张量的形式,即

$$\tilde{\epsilon}_c(\mathbf{r}) = \epsilon_0 \overline{\overline{\epsilon}}_r(\mathbf{r}) = \epsilon_0 \begin{bmatrix} \epsilon_{r1} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{r1} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{r3} \end{bmatrix} = \epsilon_0 \begin{bmatrix} n_o^2 & 0 & 0 \\ 0 & n_o^2 & 0 \\ 0 & 0 & n_c^2 \end{bmatrix} \quad (1-16)$$

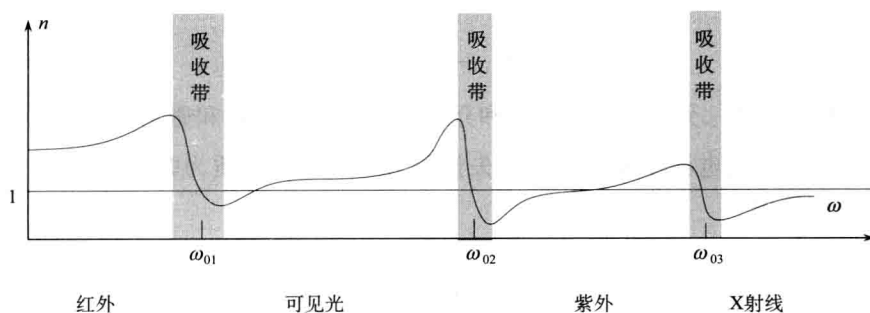


图 1-3 折射率随频率的变化曲线

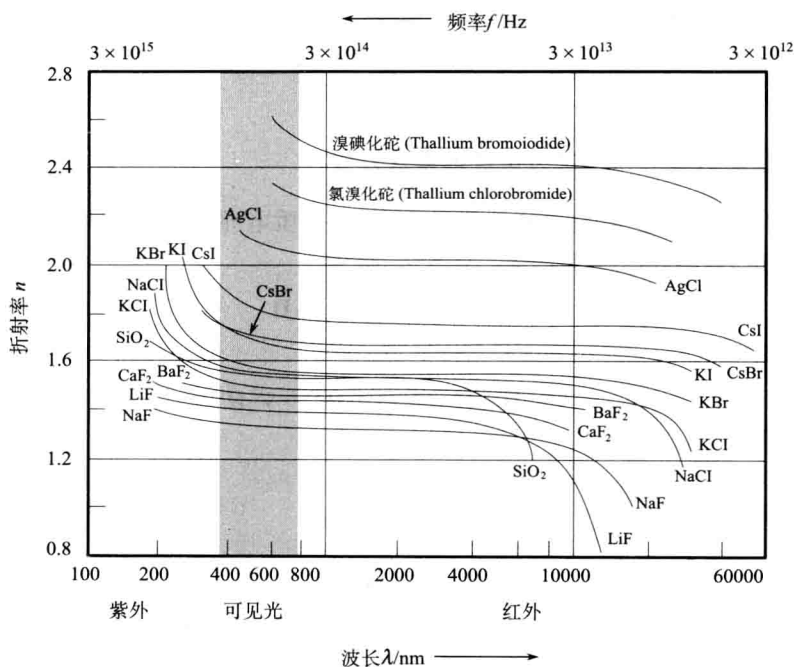


图 1-4 常用光学晶体的折射率随波长和频率的变化曲线

AgCl(氯化银)、BaF₂(氟化钡)、CsI(碘化铯)、CsBr(溴化铯)、
CaF₂(氟化钙)、KI(碘化钾)、KBr(溴化钾)、KCl(氯化钾)、
LiF(氟化锂)、NaCl(氯化钠)、NaF(氟化钠)、SiO₂(二氧化硅)

式中, n_o 和 n_e 分别称为寻常光和非寻常光的折射率。

实际的薄膜光学问题求解, 场中存在多种介质, 光波传播在介质分界面上必须满足电磁场边界条件, 其矢量形式为

$$\begin{cases} \mathbf{n} \times (\tilde{\mathbf{E}}_1 - \tilde{\mathbf{E}}_2) = 0 \\ \mathbf{n} \times (\tilde{\mathbf{H}}_1 - \tilde{\mathbf{H}}_2) = \tilde{\mathbf{J}}_s \end{cases} \quad (1-17)$$

式中, $\tilde{\mathbf{E}}_1$ 、 $\tilde{\mathbf{H}}_1$ 和 $\tilde{\mathbf{E}}_2$ 、 $\tilde{\mathbf{H}}_2$ 分别表示介质 1 和介质 2 分界面两侧的电场和磁场复振幅矢量; $\tilde{\mathbf{J}}_s$ 为分界面上的自由电流面密度复振幅矢量。

如果把边界条件写成标量形式, 有

$$\begin{cases} \tilde{E}_{1t} = \tilde{E}_{2t} \\ \tilde{H}_{1t} - \tilde{H}_{2t} = \tilde{J}_s \end{cases} \quad (1-18)$$

式中, \tilde{E}_{1t} 、 \tilde{E}_{2t} 和 \tilde{H}_{1t} 、 \tilde{H}_{2t} 分别表示介质 1 和介质 2 分界面上电场和磁场复振幅矢量的切向分量; \tilde{J}_s 为分界面上自由电流面密度复振幅矢量的大小。如果介质为非导电介质, $\tilde{J}_s = 0$, 则磁场的边界条件简化为

$$\tilde{H}_{1t} - \tilde{H}_{2t} = 0 \quad (1-19)$$

式(1-18)和式(1-19)就是光波在层状介质薄膜中传播时必须满足的边界条件。

1.2 平面电磁波

光波在薄膜介质中传播都假定是以平面波形式传播, 因此, 下面从麦克斯韦方程出发推导平面光波的解形式。

1.2.1 复矢量波动方程——齐次矢量亥姆霍兹方程

假设均匀线性各向同性介质, 介电常数 ϵ 为常数, 介质电导率为 σ , 由麦克斯韦方程式(1-2)第一式两边取旋度, 并将式(1-2)中的第二式代入, 得到

$$\nabla \times \nabla \times \tilde{\mathbf{H}} = \omega^2 \tilde{\epsilon}_c \mu_0 \tilde{\mathbf{H}} \quad (1-20)$$

利用矢量恒等式

$$\nabla \times \nabla \times \tilde{\mathbf{H}} = \nabla(\nabla \cdot \tilde{\mathbf{H}}) - \nabla^2 \tilde{\mathbf{H}} \quad (1-21)$$

且 $\nabla \cdot \tilde{\mathbf{H}} = 0$, 有

$$\nabla^2 \tilde{\mathbf{H}} + \tilde{k}_c^2 \tilde{\mathbf{H}} = 0 \quad (1-22)$$

同理可得

$$\nabla^2 \tilde{\mathbf{E}} + \tilde{k}_c^2 \tilde{\mathbf{E}} = 0 \quad (1-23)$$

式(1-22)和式(1-23)就是吸收介质中磁场和电场的齐次矢量亥姆霍兹方程, 也称复矢量波动方程。 \tilde{k}_c 称为复波数, 其值为

$$\tilde{k}_c = \omega \sqrt{\mu \left(\epsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \right)} \quad (1-24)$$

如果介质无吸收, 即 $\sigma = 0$, 则波数为实数, 有

$$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \quad (1-25)$$

则方程(1-22)和方程(1-23)就化为理想介质中的复矢量波动方程。

波数 k 也称为空间角频率。波数 k 与波速 v 及角频率 ω 之间的关系为

$$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon} = \frac{\omega}{v} = \frac{\omega}{c} n \quad (1-26)$$

式中

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} = \frac{c}{n} \quad (1-27)$$

为光波在介质中传播的速度; c 为真空中的光速; n 为介质的折射率。