



光科学与应用系列

总主编 王之江

光学薄膜及其应用

范正修 邵建达 易葵 贺洪波 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

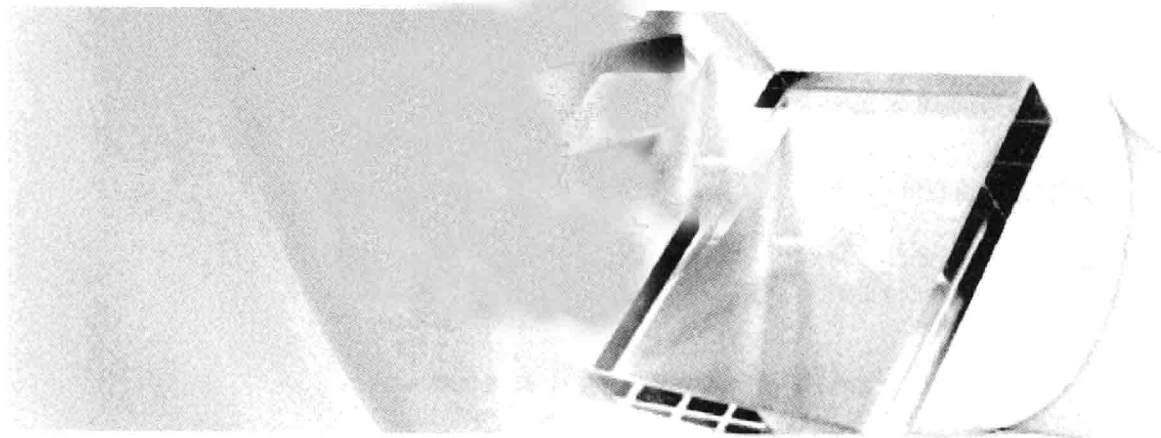
国家科学技术学术著作出版基金资助出版

光科学与应用系列

总主编 王之江

光学薄膜及其应用

范正修 邵建达 易葵 贺洪波 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书主要讨论光学薄膜的基本性质、几类特殊光学薄膜的相关性质以及光学薄膜在激光系统中的应用。不仅论述了薄膜的光学特性,还深入地阐述了薄膜的力学特性和在强光作用下的特殊性质。除了讨论一般光学性能之外,更突出了光学薄膜的损耗特性、不均匀及渐变特性、双折射特性和位相延迟及群延迟特性。在光学薄膜相关性质的讨论过程中,始终与其实际应用紧密联系在一起,突出了现实性、实用性和针对性。

本书可供光学薄膜和其他薄膜领域研究人员、技术人员、各类从业人员参考,也可供薄膜元件的应用者或其他相关人员参考,亦可作为大专院校相关专业的参考书或研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

光学薄膜及其应用/范正修等编著. —上海:上海交通大学出版社,2013
(光科学与应用系列)
ISBN 978-7-313-10078-8

I. ①光… II. ①范… III. ①光学薄膜 IV. ①TB43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 163456 号

光学薄膜及其应用

编 著: 范正修等

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 韩建民

印 制: 上海万卷印刷有限公司

开 本: 787mm×960mm 1/16

字 数: 720 千字

版 次: 2014 年 2 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-10078-8/TB

定 价: 139.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 38.25

印 次: 2014 年 2 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 021-56928211

丛书编委会

总主编

王之江(中国科学院院士)

副总主编

楼祺洪(中国科学院上海光学精密机械研究所研究员)

刘立人(中国科学院上海光学精密机械研究所研究员)

编 委(以拼音为序)

陈良尧(复旦大学信息科学与工程学院教授)

陈险峰(上海交通大学物理系常务副主任、光科学与工程研究中心主任、教授)

李育林(中国科学院西安光学精密机械研究所研究员)

刘 旭(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室主任、教授)

饶瑞中(中国科学院安徽光学精密机械研究所副所长、研究员)

王清月(天津大学超快激光研究室教授)

徐剑秋(上海交通大学物理系教授)

翟宏琛(南开大学现代光学研究所教授)

赵葆常(中国科学院西安光学精密机械研究所研究员)

Ting-Chung Poon(美国 维珍尼亚理工州立大学电子与计算机工程系教授
Department of Electrical and Computer Engineering, Virginia Polytechnic
Institute and State University)

总 序

光学是物理学的一部分,是物理学的一个分支,也是当前科学研究中最活跃的学科之一,光学的发展是人类认识客观世界的进程中一个重要的组成部分。光学从产生开始就具有强烈的应用性,并形成了光学工程这一独特技术领域,在人类改造客观世界的进程中发挥了重要作用。光学实验的结果曾经推动了近代相对论和量子论的发展。光学为多个学科提供了重要工具,如望远镜对于天文学与大地测量学;显微镜对于生物医学与金相学;光谱仪对于化学和材料科学。光学的发展还为生产技术提供了许多重要的观察和测量工具。

从爱因斯坦辐射理论可以预见到激光存在。20世纪中叶,激光问世对光学及相关科学和技术影响很大。激光的本质是受激辐射形成的高亮度、高功率密度,从而派生出种种前所未有的非线性物理现象;形成非线性光学、激光光谱学等新学科分支;开拓了远紫外到太赫兹等新辐射波段;提供了超快过程研究的工具。激光作为新光源已应用于多个科研领域,并很快被运用到材料加工、精密测量、信号传感、生物医学、农业等极为广泛的技术领域。产生了光通讯、光盘等新产业。此外,激光还为同位素分离、受控核聚变以及军事上的应用,展现了光辉的前景,成为现代物理学和现代科学技术前沿的重要组成部分。

信息科学原先以电子学为基础,如电报、电话、雷达等领域。现代科技的发展使图像信息日益重要,光信息的获取、传输、存储、处理、接收、显示等技术在近代都有非常大的进步。光信息科学已是信息科学的重要组成部分。

总之,现代光学和其他学科、技术的结合,在人们的生产和生活中发挥着日益重大的作用和影响,成为人们认识自然、改造自然以及提高劳动生产率的越来越强有力的武器。学术的力量是科技进步的基础,上海交通大学出版社在这个时候策划出版一套“光科学与应用”系列丛书,是一件非常合乎时宜的事情。将许多专家、学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来,对促进我国光学事业的发展具有十分重要的现实意义。

本套丛书的内容涵盖光学领域先进的理论方法和科研成果。图书类别主要以专著、教材为主。旨在从系统性、完整性、实用性和技术前瞻性角度出发,把理论知识与实践经验结合起来,更好地促进光学领域的学术交流与合作、让更多的学者了解该领域的科研成果和研究趋势,为促进我国光学领域科研成果的转化、加速光学技术的发展提供参考和支持。

可以说,本套丛书承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命,凝结了众多国内外光学专家、学者的智慧和成果。期望这套丛书能有益于光学专业人才的培养、有益于光学事业的进一步发展。同时能为祖国吸引更多的愿投身于光学事业的仁人志士。

王之江

前 言

光学薄膜是一类重要的光学元件,广泛应用于现代光学、光电子学、光学工程及其相关的科学技术领域。在光的传输、调制、光谱和能量的分割与合成以及光与其他能态的转换过程中起着不可替代的作用。

如果从 Fraunhofer 利用化学方法制备出减反射层算起,光学薄膜已经有近两百年的历史。但是,光学薄膜真正作为一类光学元件应用于光学系统,应该从 20 世纪 30 年代扩散泵开始应用于真空系统算起。近几十年来,特别是电子计算机广泛应用于光学薄膜的设计和薄膜制备过程以来,光学薄膜元件和技术得到突飞猛进的发展,形成一种欣欣向荣的大好局面。

最早论述光学薄膜性质及其制备技术的专著是 Heavens 1955 年出版的 *Optical Properties of Thin Solid Films* 及 Holland 1956 年出版的 *Vacuum Deposition of Thin Films* 这两本书,20 世纪 60 年代初就有了中译本。在光学薄膜的发展历程中,光学薄膜的专著出版了很多本,比较有代表性的是 1969 年 Macleod 编著的 *Thin Film Optical Filters*; 1976 年 Knittl 编著的 *Optics of thin film*; 其中, *Thin Film Optical Filters* 2001 年已经有第三版问世,每一版都反映光学薄膜发展的一个新阶段。国内比较有影响的是唐晋发等 1984 年出版的《应用薄膜光学》。在此基础上他们在 2006 年又出版了《现代光学薄膜技术》,不仅充实了薄膜技术的内容,光学薄膜本身的科学内容也有开阔和加深。

在学术会议方面,影响比较大的是“Optical Interference Coating Topical Meeting”,每三年举办一次,到 2013 年已经举行了 12 届,其中 2013 年会议共收到论文 330 余篇,可谓盛况空前。该专题会议的论文不仅数量越来越大、学术水平越来越高,而且涉及范围也越来越广。集中反映光学薄膜在激光系统中应用状况的会议是在美国 Boulder 召开的“Laser Induced Damage in Optical Materials”,从 20 世纪 60 年代末开始,每年举行一次,至今已达 45 届,极大地推动了激光材料、激光薄膜及激光破坏机制的发展。

光学薄膜的直接理论基础是薄膜光学,它是建立在光的干涉效应的基础上、论述光在分层介质中传播行为的一门学科。即便是科学技术日新月异飞速发展的今天,该理论仍可以比较准确地描述光在原子层、纳米层一直到数十微米层厚的薄膜中的传播行为,由此设计出不同波长、不同性能、适应不同要求的光学薄膜元件。传统的光学薄膜是一类被动的、线性的光学元件,随着一些光学性能可调控的主动薄膜材料被引入到光学薄膜的设计和应用之中,光学薄膜也突破了传统的限制,发展为一种既能实现一般被动传输功能,又可实现对光束主动调控或转换的功能性光学元件。随着科学技术的不断发展和对光学薄膜需求的不断加深、加广,薄膜光学也必然会不断地充实和深化,在多种学科的相互渗透中得到发展并开阔自己的学科内容。除了基本的光学性质之外,现代光学薄膜还要涉及光学薄膜的力学性质,结构性质,非线性性质以及光与薄膜作用过程中的光热、光声、光电、光伏效应和强激光作用下薄膜的破坏效应,这些问题一般要涉及更深入、更广泛的科学内容。

光学薄膜的性能要求与其具体应用密切相关。不同领域、不同系统以及不同应用环境会对光学薄膜的性能提出不同的要求。

(1) 应用于高功率激光系统的光学薄膜突出的要求就是具有足够高的破坏阈值。近几十年来,高功率激光薄膜的研究基本都是围绕这个问题进行。随着激光波长、脉冲宽度、结构及重复率的变化,薄膜的破坏机制及相应的控制和改进手段都会有很大不同。此外,考虑到激光系统长期工作的稳定性、可靠性以及在不同环境下应用的问题,光学薄膜抗激光强度的累积效应和环境的影响,也是光学薄膜必须研究的课题。光学薄膜在超短脉冲激光系统中的应用,主要在两个方面开阔了光学薄膜器件的要求。其一是啁啾脉冲反射镜。这类反射镜,不仅要求较高的反射率,而且要求对群延迟色散进行调控,以实现超短脉冲激光在传输和放大过程中所产生的延迟量进行补偿。目前啁啾反射膜可以在 600 nm 的波长范围内实现足够量的群延迟色散补偿,可以获得脉冲宽度为 3.5 fs 的激光输出。其二是介质膜脉冲压缩光栅,这类光学元件把光学薄膜和光栅结合在一起,构成一种新型的光学薄膜。

(2) 用于激光陀螺和引力波测量的光学薄膜,要求有极低的散射损耗和极高的反射率。目前,反射率高达 99.9998%,散射率低于 1 ppm (1 ppm = 10^{-6}) 的光学薄膜元件已经成功地用于相应的仪器和系统。

(3) 用于光通信的光学薄膜,其突出的特点是在极高性能的前提下还要有极高的环境稳定性和时间稳定性,正是在光通信的推动下,光学薄膜技术得到

长足的进步。目前,半宽度仅有 0.4 nm 通信波段的密集型超窄带矩形滤光片已经获得应用,它在 50℃ 及零下 60℃ 的温度区间内波长漂移小于 0.1 nm。层数近 400 层、厚度达 65 μm 的宽波段波分复用滤光片也已发展为产品。

(4) 用于光显示的光学薄膜,包括分色/合色滤光片、全色高反射率波导管等,要求最特殊的光学薄膜是宽角宽带偏振分光膜,该薄膜要求在角宽大于 $\pm 6^\circ$ 的条件下,在可见光范围内实现消光比大于 1000 的偏振分光。

(5) 用于荧光和拉曼探测的滤光片突出的要求是极高的截止深度。目前这类滤光片在保证透射峰具有足够高的透射率的前提下,截止波长的光密度可以达到 8,甚至更高。

(6) 用于空间系统的光学薄膜,需要考虑的问题是真空工作环境。在高达上百摄氏度及零下百余摄氏度的温度变化条件下薄膜元件性能基本不变,且稳定地运行。另外,在特殊条件下,薄膜会受到空中射线的辐照造成元件性能下降。元件的使用寿命也是其最主要的指标之一。目前,空间遥感应用的滤光片已经向集成化和阵列化发展,在分辨率进一步提高的基础上,确保器件更高的稳定性、可靠性和足够长的寿命。

极紫外和 X 射线多层膜的成功研制和迅速发展,给 X 射线光学带来革命性的变化。如今,各种波长和不同类型的 X 射线多层膜元件已经在同步辐射、等离子体探测、空间射线探测、X 射线成像以及激光技术等多个方面获得广泛应用。正因为软 X 射线反射膜在光刻技术中的成功应用,才使更新一代的光刻机成为现实。

光学薄膜是薄膜科学的一个重要分支。薄膜的制备技术、测试分析技术如沉积、生长、结构、形貌、物理、化学、力学等一些基本特性对于各类薄膜来说都是相通的,不同类型的薄膜只是表现为一些具体性质和具体应用的差别,而具体的性质很大程度上由薄膜的基本性质决定。就光学薄膜来讲,其具体的性质是薄膜态材料的光学性质,而光学性质是由薄膜的组分、结构、形貌等一些基本性质决定的。不仅如此,光学薄膜的性质很大程度上会受到光、电、磁、声、环境和温度等其他物理参数的调控,薄膜的不同性质之间有着共同的基础又相互影响和转换。而且,现代的光学仪器或科学仪器本身就是各种薄膜和不同元件的组合,元件之间的性能也是相互贯通和影响的。不从薄膜科学的整体来把握光学薄膜,不可能更能动地把握光学薄膜和更充分地应用光学薄膜,更不可能把光学薄膜推向新的高度。

从光学的发展来看,微纳光学已经成为现代光学的重要分支。不论从理论

基础还是从技术基础来看,光学薄膜本身就属于微纳光学。在厚度方向上,光学薄膜本身就是纳米、亚纳米甚至是原子尺度的;从平面结构来看,不论是现代光学薄膜中的显微列阵薄膜、雕塑薄膜,还是光学薄膜与各种不同的微纳结构组合的新型元件如多层膜光栅、导模共振滤光片以及纳米颗粒嵌合薄膜等一些新的结构,已经把光学薄膜从一维延伸到多维。

传统意义上,光学薄膜是研究光束在分层介质中纵向传输特性的学科,光学波导是研究光束横向传输特性的学科,把光学薄膜和光学波导以及各类功能薄膜结合起来,便可以形成集成光学的基本构架。从广义上来看,集成光学可以看做是光学薄膜在功能上和维度上的延伸。

传统光学薄膜本身就是一种一维光子晶体,一般光子晶体就是光学薄膜在维度上的延伸。不过,光学薄膜关注的是相关结构的光谱性质,光子晶体更关注由它们构成的光子能带结构和光子在不同结构中的运动特性。

在现代光学中,在光学薄膜的分层中加入各种各样的微结构或微组分,或者在不同的表面微结构上制备光学薄膜,以期产生更多的新性质和合成更多更有效的新器件,已成为光学薄膜发展的重要方向。新一代的光学薄膜已经把传统的薄膜光学、衍射光学以及等离子体激波等多方面学科结合在一起。不仅在维度上打破了原来的界限,而且在性能上也由被动向能动上延伸,光学薄膜在与其他薄膜和其他微结构的结合和融合中进入一个新的发展阶段。

光学薄膜的内容是相当丰富的。本书主要是结合一些光学薄膜元件及其应用研究其光学性能及其他相关特性,即便在这些范围内,也只能就我们了解的或接触过的非常有限的内容进行研究或评述。本书共分三大部分。第一部分叙述光学薄膜的基本特性,包括光学薄膜的光学性质、力学性质和光学薄膜元件的一些设计方法。第二部分介绍几类特种光学薄膜,包括紫外薄膜、极紫外和软 X 射线薄膜、多层膜光栅和雕塑薄膜。第三部分讲述光学薄膜在激光系统中的应用,包括几种主要的光学薄膜元件和激光对光学薄膜的破坏机制研究。

本书的主要内容是建立在中科院上海光机所光学薄膜实验室及历届研究生相关工作的基础之上的。从完整性出发,也融入了一些相关知识和结果。可供从事相关研究工作的科学技术人员和相关专业的研究生作为参考。

由于我们的知识水平和认识水平有限,书中存在的错误,敬请读者和同仁们批评指正。

目 录

1 光学薄膜的基本性质和设计方法	1
1.1 光学薄膜的光学性质	1
1.1.1 薄膜光学的理论基础	1
1.1.2 光学薄膜的吸收	7
1.1.3 吸收对光学薄膜性能的影响	11
1.1.4 光学薄膜的散射	15
1.1.5 光学薄膜的不均匀性	36
1.1.6 光学薄膜的各向异性	47
1.1.7 光学薄膜的偏振特性	56
1.1.8 光学薄膜的相位延迟	75
1.1.9 光学薄膜的群延迟及群延迟色散	85
参考文献	94
1.2 光学薄膜的力学性质	96
1.2.1 薄膜应力的形成及分类	97
1.2.2 薄膜内应力的力学模型	99
1.2.3 薄膜应力的微观力学模型	100
1.2.4 沉积工艺对光学薄膜应力的影响	102
1.2.5 多层膜应力	113
1.2.6 光学薄膜应力发展的实时监测	118
1.2.7 光学薄膜的应力破坏	132
参考文献	134
1.3 光学薄膜的设计	136
1.3.1 光学薄膜的分析设计	136
1.3.2 光学薄膜自动设计	154
1.3.3 膜系设计实例	159
参考文献	161

2 几类特殊的光学薄膜	163
2.1 紫外光学薄膜	163
2.1.1 紫外光及紫外光学薄膜的一般特性	163
2.1.2 影响紫外高反膜光学性能的主要因素	168
2.1.3 几种紫外激光薄膜	173
参考文献	216
2.2 极紫外和软 X 射线薄膜	217
2.2.1 软 X 射线多层膜设计的基本理论	218
2.2.2 软 X 射线及极紫外薄膜的一般设计结果	225
2.2.3 多层膜的性能分析	234
2.2.4 软 X 射线多层膜反射镜的研制	242
2.2.5 性能测试	244
2.2.6 几种反射膜的研制	248
2.2.7 软 X 射线多层膜分光元件的研制	256
2.2.8 反射型软 X 射线位相光栅的研制	259
参考文献	260
2.3 介质膜光栅	262
2.3.1 多层介质膜光栅	262
2.3.2 多层介质膜光栅的衍射特性分析	274
2.3.3 多层介质膜脉冲压缩光栅的优化设计	282
2.3.4 介质膜光栅中的导模共振	290
参考文献	332
2.4 雕塑薄膜	333
2.4.1 倾斜沉积雕塑薄膜的基本性质	334
2.4.2 有效介质理论介绍	336
2.4.3 雕塑薄膜的制备及结构特征	342
2.4.4 几种雕塑薄膜	344
参考文献	369
3 光学薄膜在激光系统中的应用	371
3.1 概述	371
参考文献	374
3.2 激光系统中的几类激光薄膜	375
3.2.1 反射膜	375

3.2.2 激光减反射薄膜	379
3.2.3 激光偏振膜	390
3.2.4 波长分离膜	397
3.2.5 高斯输出镜	407
3.2.6 负色散补偿反射镜	422
参考文献	441
3.3 光学薄膜的激光破坏	443
3.3.1 激光对光学薄膜破坏的一般规律	444
3.3.2 激光对光学薄膜破坏的热过程分析	448
3.3.3 光学薄膜激光破坏的热力耦合	460
3.3.4 光学薄膜的缺陷破坏	472
3.3.5 光学薄膜中的节瘤缺陷	497
3.3.6 光学薄膜的非线性破坏	529
3.3.7 多脉冲激光对光学薄膜的破坏	558
3.3.8 真空环境下光学薄膜的激光破坏	566
参考文献	584
附录 各章节参考研究生论文题目	589
索引	592
致谢	595

1 光学薄膜的基本性质和设计方法

1.1 光学薄膜的光学性质

光学薄膜是一种用于改变光束传输特性的光学元件,在光学技术中应用的薄膜器件主要有两种:改变光束切向传播特性的称为薄膜波导;改变光束法向传播特性的称为光学薄膜。光学薄膜几乎在所有与光有关的系统或设备中出现,起到增加透射、加强反射、折射光束、起偏、检偏、分割光谱和光强、调节位相等作用。可以这样说,没有光学薄膜,就没有现代光学的发展。

光学薄膜是由特定光学常数和厚度的分层介质组成的,理想而典型的光学薄膜层与层之间相互平行,界面光滑而界线分明,在此基础上建立起光学薄膜的基本理论——薄膜光学。

1.1.1 薄膜光学的理论基础

光学薄膜设计的理论基础是麦克斯韦方程组,从理论观点来说,研究薄膜系统的光学特性就是研究平面电磁波通过分层介质的传播,因此处理薄膜问题的最有效方法是解麦克斯韦方程组^[1]:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 4\pi\rho \quad (1-1-1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1-1-2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} (\mathbf{j} + \mathbf{j}_D) \quad (1-1-3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1-1-4)$$

式中, $\mathbf{E}$ 为电场强度矢量, $\mathbf{H}$ 为磁场强度矢量, $\mathbf{D}$ 为电位移矢量, $\mathbf{B}$ 为磁感应强度矢量, $\mathbf{j}$ 为电流密度矢量, $\mathbf{j}_D$ 为位移电流密度矢量($\mathbf{j}_D = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$), ρ 为电荷密度。

考虑到介质对电磁场的影响,在麦克斯韦方程组的基础上还需联系电磁场基

本矢量关系的物质方程,即

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (1-1-5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1-1-6)$$

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \quad (1-1-7)$$

式中, ϵ 为介电常数, μ 为磁导率, σ 为电导率。

由麦克斯韦方程可以推得电场矢量 $\mathbf{E}$ 和磁场强度矢量 $\mathbf{H}$ 以及电磁波传播方向 $\mathbf{k}$ 之间的关系为

$$Y = \frac{|\mathbf{H}|}{|\mathbf{k} \times \mathbf{E}|} \quad (1-1-8)$$

Y 称为介质的光学导纳,需要注意的是,只有在光波段,即 μ 足够接近于 1 的情况下,介质的光学导纳在数值上才等于介质的折射率。结合 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 的边界条件,即电场矢量 $\mathbf{E}$ 和磁场强度矢量 $\mathbf{H}$ 的切向分量都是连续的,当反射光束、折射光束和入射光束都在同一入射平面的条件下,可以推导出反射定律,折射定律和菲涅尔反射系数,分别由式(1-1-9)~式(1-1-11)给出。

$$\theta_0 = \theta_r \quad (1-1-9)$$

表示光从一种介质到另一种介质反射,入射角等于反射角。

$$N_0 \sin \theta_0 = N_1 \sin \theta_1 \quad (1-1-10)$$

式中, θ_0 为光在介质 1 中的入射角, θ_1 为光在介质 2 中的折射角,

$$r = \frac{N_0 - N_1}{N_0 + N_1} \quad (1-1-11)$$

倾斜入射时,引进修正导纳 η ,它类似于导纳 N ,用 η_0 和 η_1 来代替式(1-1-11)中的 N_0 和 N_1 ,便可求得倾斜入射时的反射系数和透射系数,其表达式如式(1-1-12)~式(1-1-15)所示。

对 P 偏振光(即 TM 波), $\eta_P = N/\cos \theta$; 对 S 偏振光(即 TE 波), $\eta_S = N \cos \theta$ 。则有

$$r_P = \frac{\eta_{0P} - \eta_{1P}}{\eta_{0P} + \eta_{1P}} = \frac{N_0 \cos \theta_1 - N_1 \cos \theta_0}{N_0 \cos \theta_1 + N_1 \cos \theta_0} = \frac{\tan(\theta_1 - \theta_0)}{\tan(\theta_1 + \theta_0)} \quad (1-1-12)$$

$$r_S = \frac{\eta_{0S} - \eta_{1S}}{\eta_{0S} + \eta_{1S}} = \frac{N_0 \cos \theta_0 - N_1 \cos \theta_1}{N_0 \cos \theta_0 + N_1 \cos \theta_1} = \frac{\sin(\theta_1 - \theta_0)}{\sin(\theta_1 + \theta_0)} \quad (1-1-13)$$

$$t_P = \frac{2\eta_{0P}}{\eta_{0P} + \eta_{1P}} \cdot \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta_1} = \frac{2N_0 \cos \theta_0}{N_0 \cos \theta_1 + N_1 \cos \theta_0} = \frac{2 \sin \theta_1 \cos \theta_0}{\sin(\theta_0 + \theta_1) \cos(\theta_0 - \theta_1)} \quad (1-1-14)$$

$$t_S = \frac{2\eta_{0S}}{\eta_{0S} + \eta_{1S}} = \frac{2N_0 \cos \theta_0}{N_0 \cos \theta_0 + N_1 \cos \theta_1} = \frac{2 \sin \theta_1 \cos \theta_0}{\sin(\theta_0 + \theta_1)} \quad (1-1-15)$$

式中, r, t 分别为反射系数和透射系数, 下标 P 和 S 分别表示平行分量(P)和垂直分量(S)。相应的透射率和反射率分别为

$$R = \left(\frac{\eta_0 - \eta_1}{\eta_0 + \eta_1} \right)^2 = \begin{cases} \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_0)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_0)} & (\text{TE}) \\ \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_0)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_0)} & (\text{TM}) \end{cases} \quad (1-1-16)$$

$$T = \frac{N_1 \cos \theta_1}{N_0 \cos \theta_0} |t|^2 = \begin{cases} \frac{\sin 2\theta_0 \sin 2\theta_1}{\sin^2(\theta_0 + \theta_1)} & (\text{TE}) \\ \frac{\sin 2\theta_0 \sin 2\theta_1}{\sin^2(\theta_0 + \theta_1) \cos^2(\theta_0 - \theta_1)} & (\text{TM}) \end{cases} \quad (1-1-17)$$

式(1-1-12)~式(1-1-15)就是普遍适用的菲涅耳公式, 在计算透过率时考虑了透射光束和入射光束的截面比例因子。当第二介质为吸收介质时, 只要将复折射率 $N_1 = n_1 - ik_1$ 代替原来各式中的 N_1 即可, 这时 θ_1 是复数, 折射角为 θ_1 的实部。菲涅耳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耳系数相互迭加的结果。

对于单层薄膜, 其合成振幅为

$$r = \frac{r_1 + r_2 e^{-2i\delta_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-2i\delta_1}} \quad (1-1-18)$$

$$t = \frac{t_1 t_2 e^{-i\delta_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-2i\delta_1}} \quad (1-1-19)$$

1) 递推法计算多层膜的光学性质

递推法是把前面所有膜层等效为一个界面, 用反射系数和位相来表示总的性质。递推法如图 1-1-1 所示^[2]。从入射介质开始的第 $k+1$ 个界面为基底与第 k 层膜的界面, 其界面反射系数为 $\rho_{k+1} = r_{k+1}$ 。设第 k 层膜的折射率为 N_k , 与 $k-1$ 层膜的等效界面反射系数为 r_k 。

新构成的等效界面的菲涅耳系数为

$$\rho_k e^{i\phi_k} = \frac{r_k + \rho_{k+1} e^{-2i\delta_k}}{1 + r_k \rho_{k+1} e^{-2i\delta_k}} \quad (1-1-20)$$

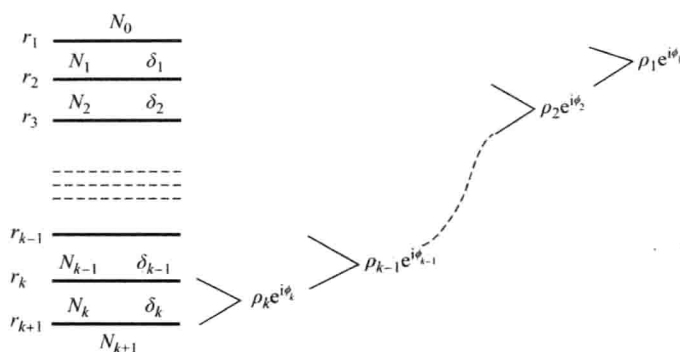


图 1-1-1 递推法求解菲涅尔系数

式中, $\delta_k = \frac{2\pi}{\lambda} N_k d_k \cos \theta_k$ 。这样从基底一直递推到入射介质便可以获得整个膜系的菲涅尔系数 ρ_1 和 ϕ_1 。

在光学薄膜发展的初级阶段,递推法曾经是进行膜系计算和设计的主要方法。随着计算机技术的飞速发展,它的作用逐渐被矩阵法替代。

2) 费涅尔系数矩阵法计算薄膜的光学性质

光学薄膜矩阵算法主要有两种:一种为菲涅尔系数矩阵;另一种为特征矩阵。首先介绍菲涅尔系数矩阵法。

用 E^+ , H^+ 表示正向传播的电场矢量和磁场矢量的切向分量, E^- , H^- 表示反向传播的电场矢量和磁场矢量的切向分量,则有

$$E = E^+ + E^-, H = H^+ + H^-$$

根据电磁场在界面上的连续性条件,对 $z = 0$ 界面

$$E_0^+ + E_0^- = E_1^+ + E_1^-$$

$$n_0 E_0^+ - n_0 E_0^- = n_1 E_1^+ - n_1 E_1^-$$

由 $r_0 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}$, $t_0 = \frac{2n_0}{n_0 + n_1}$, 则有

$$\begin{bmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{bmatrix} = \frac{1}{t_0} \begin{bmatrix} 1 & r_0 \\ r_0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix}$$

对 $z = d_1$ 界面

$$E_1^+ e^{-i\delta_1} + E_1^- e^{i\delta_1} = E_2^+ + E_2^-$$

$$n_1 E_1^+ e^{i\delta_1} - n_1 E_1^- e^{-i\delta_1} = n_2 E_2^+ - n_2 E_2^-$$