



装备科技译著出版基金

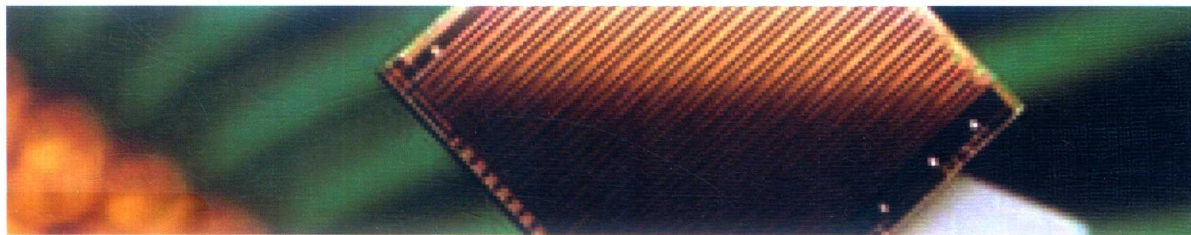
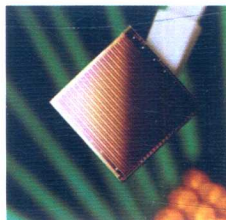
现代光学工程精品译丛

 Springer

光学薄膜材料的 理论与实践

Optical Coatings: Material Aspects in Theory and Practice

【德】 Olaf Stenzel 著
张立超 才玺坤 等译
梁中翥 牟珂 校



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

现代光学工程精品译丛

光学薄膜材料的 理论与实践

Optical Coatings: Material Aspects in
Theory and Practice

[德] Olaf Stenzel 著

张立超 才玺坤 时 光 武潇野 贺健康 译
梁中翥 牟 珂 校

国防工业出版社

• 北京 •

著作权合同登记 图字：军-2016-097 号

图书在版编目 (CIP) 数据

光学薄膜材料的理论与实践 / (德) 奥拉夫·斯腾泽尔 (Olaf Stenzel) 著 ; 张立超等译. —北京: 国防工业出版社, 2017.1

书名原文: Optical Coatings: Material Aspects in Theory and Practice

ISBN 978-7-118-11177-4

I. ①光… II. ①奥… ②张… III. ①光学薄膜—研究
IV. ①TB43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 306165 号

Translation from English Language Edition:

Optical Coatings: Material Aspects in Theory and Practice

By Olaf Stenzel

Copyright ©Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Springer-Verlag is a part of Springer Science+Business Media

All Right Reserved

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 插页 12 印张 22¼ 字数 448 千字

2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 98.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

译者序

无论是自 1817 年弗朗禾费采用酸蚀法第一次制备出了广义的减反膜起,还是在 20 世纪 30 年代由于真空技术的发展而开启了大规模的薄膜工业制造时代,光学薄膜都是光学系统中的重要组成部分。由于光学元件与(空气、浸液等)工作环境介质的界面处存在着折射率突变这种天然的不理想特征,必须采用特殊设计的膜系对界面进行修饰,因此早期的传统薄膜主要面向于对光能的利用,例如有效地实现减反、高反或者特定比例的分束等。而随着薄膜膜系的设计、制备以及表征技术的不断突破,此后逐步实现了对入射光波的精细化操控,如针对不同波长需求的光谱裁剪(各种滤光片)以及偏振、位相的操控(偏振片、啁啾镜等)等,薄膜元件也已在激光应用、生化分析、信息技术等众多领域成为核心元件。

如今,对于光学薄膜的应用早已进入工程阶段,人们使用 Macleod、Optilayer 等成熟的软件设计各种复杂的膜系,采用以各种物理气相沉积技术为主的方式将其制备并投入实际应用,仿佛整个过程就是一个标准的计算机辅助设计(CAD)。那么,目前在此领域内还存在什么样的问题呢?面对这种现状,本书的作者着重阐述了两类问题:

一方面,作者强调:薄膜设计已经日益工程化与便捷化,这使人们更加倾向于将薄膜的制备与实现视作一个对膜层的几何参数进行优化的数学问题,但实际上,能否对各个膜层的材料特性(光学常数、应力、漂移等)进行有效的控制,对于能否实现这些理论设计也必不可少。目前,各种经典的光学薄膜著作主要针对的是如何优化膜系设计,目前尚缺少对于薄膜材料特性的系统论著,尤其是当考虑到这些材料特性之间实际上具有复杂的关联时。对已有的大量文献结果进行归纳总结,对其合理地建立相互之间的模型关系(甚至是定量的关系),是目前薄膜从业者普遍希望实现的,同时也是作者在书中所追求的目标。

另一方面,正如作者在第 1 章中所述:“尽管‘每当人们开启光源时,究竟是什么真正地入射到了表面上’并不是一个稀松平常的问题,但事实上,从数十年前起,光学薄膜其实就已经能够可靠地操纵入射光子在表面处的集体行为了。”无论是薄膜的设计与制造者,还是对光学薄膜元件具有各种需求的应用者,都希望了解:在应用光学发展日新月异(如光学元件由传统的曲面过渡到二元光学形

式,再扩展至超材料/超表面的不断发展迭代)的大行业背景下,光学薄膜又经历了哪些发展,存在着什么样的应用潜力呢?为此,作者也面向材料混合物、异构薄膜、强烈多孔材料/表面结构材料与金属岛状薄膜等新型薄膜,对理解其特性所需要的物理图像、制备与表征方法以及具体的案例进行了深入的阐述。

与大部分的其他薄膜光学参考书籍不同,本书并未对薄膜光学的理论细节及相关的公式推导投入过多的关注,而只是在为了透彻地解释相关的物理图像时,才进行了必要的相关介绍。所以,本书可以被视为光学薄膜研究领域的进阶读物,与相应的入门教材(如 Macleod 所著的 *Thin-Film Optical Filters*) 配合使用,会具有更好的效果。

本书主要由4个主要部分及其附录构成。第一部分(第1~4章)总结了光学薄膜所涉及的重要理论基础,给出了关于色散模型、菲涅耳公式,以及对单层和多层膜基本光学特性的简洁概述。第二部分(第5、6章)解释了逆向搜索问题,即由已知光谱反推薄膜参数(如由测量光谱反演膜层的光学常数、计算制造过程中所涉及的膜系结构反演等)。第三部分(第7、8章)总结了选定的纯净镀膜材料的实测光学特性,并以孔隙度出发,对光学常数、应力、漂移等建立了特性关联的模型。第四部分(第9~13章)对异构薄膜、强烈多孔材料与表面结构、电介质混合物以及金属岛状膜进行了介绍。本书适合于从事光学薄膜、薄膜材料研究的专业人员阅读,也可用作薄膜科学与技术各相关研究方向的研究生的参考书。希望本书能够为应用光学中各相关领域提供有益的推动作用,使薄膜光学元件更好地服务于各种光学及光电系统。

译著由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所超精密光学工程研究中心的光学镀膜团队成员共同完成,才玺坤翻译了第1、2、7、12章,时光翻译了第3、4章,武潇野翻译了第5、6章,贺健康翻译了第8~11章,张立超翻译了序、前言、致谢、第13章和附录、符号和缩略语,全书由张立超统稿,梁中翥、牟珂进行了专业校对与最终审核。本书的出版得到了中国科学院上海光学精密机械研究所齐红基研究员与哈尔滨工业大学孙晔教授的极大支持,得到了国防工业出版社冯晨老师的帮助与指导,在此表示衷心感谢!

译者

2016年4月于长春

序

这是一部我期待已久的专著。光学镀膜的先驱弗朗西斯·特纳（Francis Turner）曾经告诉我，在光学薄膜发展的早期阶段，他和其他从业者曾经认为“薄薄的固体膜层”是对他们所研究的薄膜中膜层的正确和充分的描述。从那时起，我们已经获得了很多收获，尤其是明确了一个事实，即透彻地了解材料是对光学薄膜融会贯通的重要前提。这的确是一个艰难的学习过程，事实上，我们目前仍然处于学习过程中。经验是良师，虽然随之学习往往且慢且苦。但是我们如何能够发现更好的选择呢？本书为我们提供了一个契机，作者在其中提供了足够丰富和深入的介绍与分析。当然，具体的知识总是来自于原始文献。但是这些文献通常是零散的，不可避免地未加解释就直接承认既往知识，而且是由多个作者采用多种风格创作。为了实现有效的学习，需要有一位作者采用尽量简单的术语，从头开始、不厌其烦地向我们解释那些极端复杂难解的现象。直到目前，一直缺少这样条理清晰、思路连贯的描述。我们通常采用数学作为最有力的表述工具。它赋予我们无与伦比的预测能力，但其本身并不总是最佳的理解工具。理解——即什么是最重要的事情——一旦被获得，则分析也就水到渠成了。这就是本书的主旨，即专注于理解。它首先指出了一个简单但是却被忽略的事实，而这一事实一经解释就会变得完全显而易见：薄膜并不同于大多数其他形式的材料，它是被其表面所主导的。任何光学薄膜领域的工作者，都应该单独阅读本书的第1章。

我们这些光学薄膜技术领域的从业者，即使是新手也一定会积累了一些经验。我们有时候会观察到很奇怪的现象，如果放在过去，这就往往会被视为运气问题，因此在当时，光学镀膜工作常常被描述成一种魔法，这是真实存在的事实而不是玩笑话！当然，其实那些问题本来就与运气或魔法无关，其产生基于两个事实：其一是薄膜的复杂本质很难通过其外在的表现而获得透彻的理解；其二是我们尚缺乏合适的逻辑框架以归纳来自于经验的认识。作为本书的主题，作者给出了包含所有逻辑细节的框架。我们被带入一种思维，即如何理解材料的基本光学性质，以及这些光学性质如何被其原子和分子的排布与微观结构所影响。本书介绍了描述材料行为的几种模型，并将其推广到具有更加丰富结构特征的材料混合物。本书已经包含了关于不同种类光学薄膜的足够多的知识，无需同其他阅读

材料配合使用。本书也介绍了一些非常重要的特殊光学薄膜材料。目前，在光学薄膜领域，一些刻意而为的、特征尺寸异于原子结构的横向结构材料正日趋重要，在本书中可以获得对此类材料的最通俗易懂的介绍。虽然我可以逐章地介绍整本书，但是若想充分地领略全书的精髓，您仍然须要亲身阅读。

作为一个参考知识体系，本书中的各章相互独立，可以单独阅读。但就我的个人经验而言，这本书让人爱不释手，需要一气呵成地读完。一经读到，本书将成为您最常用的参考资料。

安吉斯·麦克劳德 于图森

前言

接下来，对他而言最奇怪的事情发生了，
一盏烛灯出现在他的视线中，
他观察着，眨了眨眼睛，目不转睛地盯着烛光，
随着幻景闪烁，
他沐浴在光的盛宴中，
其天赋由此被激活。

《关于婴儿》，威廉·布施作品（1884）

亲爱的感兴趣的读者：

很高兴您能够手握此书，或是在 Springer 出版社的网站上，或者在您的书商处阅读此前言。您知道，光学是物理学中的一个迷人的子篇章，在如何能够更加让人信服地描绘光学现象中天然魅力的方面，超越由威廉·布施所创作的上述引文是十分困难的。但是也许您还不知道，是马克斯·玻恩将这个美好的插图故事译成了英语^[1]，我也正是在撰写本书的过程中才了解到这一事实。

关于目前存在的数千种以光学为主题的书籍，我无法准确地说出其数量。但是在这茫茫的书海之中，此刻您却正在阅读这个特殊的前言。因此，我想通过这一前言向大家介绍本书的背景动机和目的等相关信息，这可能会便于您决定是否要读这本书。

首先我想向大家介绍这本书的前身的一些情况。18 年前，我撰写了一部德文教科书，由柏林 Akademie 出版公司于 1996 年出版，名为 *Das Dunnschichtspektrum: Ein Zugang von den Grundlagen zur Spezialliteratur*（《薄膜光谱：从基础到专业文献》）。这本最初的著作有 190 页的篇幅，其中充满了推导和方程式，取材在很大程度上受惯常的个人经验的影响，而这些经验来自于指导学生以及和他们一同工作的过程中。该书的重点是针对固体薄膜的光学响应，介绍正规的理论处理方法，目标受众为相关研究方向中讲德语的硕士与博士研究生。

很荣幸在 9 年之后，能够与我的初次合作者，柏林海德堡 Springer - Verlag 的 Claus Ascheron 在新书的项目中再次合作，而这次则是一部英文书。最终这本书于 2005 年出版，名为《薄膜光谱物理介绍》。这本书已经有 275 页的规模，在一定程度上包含了对第一部书中正规理论处理的扩展，并且充实进了更加偏重于应用方面的内容。这又是一部典型的教科书，一切推导均从麦克斯韦方程组或者薛定谔方程出发，目前这本书是大学课程“薄膜光学”的教材，面向位于耶拿

的马弗里德里希·席勒大学应用物理学院的阿贝光子学中心所属的硕士研究生。

而现在,又经过了9年,这本新书问世了。本书更像是其前身的补充,但却拥有不同的关注点,同时也追求更加广泛的受众。与其前身相比,本书并不是一部在大学课程讲义的基础上而改编的教材。本书的内容大体上来自于那些我曾经在不同的短期课程上使用过的材料。这些课程旨在通过更加集中的方式实现进一步的先进职业培训与认证,它们在历届光学干涉薄膜(OIC)研讨会以及许多应用光学专业沟通培训研讨会(Optence and OTTI, 德国)期间进行。事实上,在这类课程中几乎不提供公式推导,而是将重点放在实例上。因此,会提供大量的试验数据,有时还会结合直观和说明性的方法,以及不同的“经验法则”和“便利技巧”方法进行数据评估。我力图将这些大量的知识浓缩入一部更进一步的书籍,利用几个章节的篇幅完成介绍,其中包含标准背景材料的精华内容,以及一些基础模型假设的相关考虑。考虑到事实上并不容易找到被广为接受,且同时在文献中处理方法一致的基础模型。因此,(主要涉及第3章和第4章)关于物理模型关联的讨论仅代表作者的个人观点,勿须所有业界同仁均赞同这些看法。

本书的最后部分包含了关于纳米结构和混合物薄膜的几个额外章节。其材料也同样来自于两个教程,这些教程都是由我应《先进光学技术》期刊之邀撰写或合著而成,本书结束于这些内容。

因此,在本书中只给出了少量的推导,如果读者确实有这方面的需要,(在大多数情况下)可以参阅附录。实际上,在各章节中所涉及的推导都在文献[2]中给出,因此本书的文本中没有进行任何推导。从这种意义上说,这本新书是前一部的补充之作。请对特定公式感兴趣的读者参阅文献[2]或其他的薄膜教科书。当读者对方程的来龙去脉并不感兴趣时,可以直接阅读本书而不必参考其他来源。

此外,本书既不是薄膜光学或者膜系设计的入门书,也不是一本关于其字面意义即光学常数的参考书。目前已有这样的书籍(见第1章中的介绍)。至于光学常数表,您可以参阅文献[3]。而本书旨在发展经典的并且有时是说明性的物理图像,这些物理图像面向不同薄膜材料特性的起源以及特性之间的关联,以及如何将这些关联的相关知识应用于氧化物、氟化物、金属、有机薄膜、混合物和纳米结构薄膜材料等的薄膜理论与实践。在可能的情况下,尽量避免引入量子力学推导。

可能会有人质疑这种做法,并且提出:量子力学理论已经高度发展,因此只要能够构造出一个合适的哈密顿量,就可以在数学上计算任何事物。如果这样的话,在如今这样的时代,采用这些古老而简单的经典方法会有什么用处呢?

答案是:事实没有他们所想象的那样简单。相反地,经典物理学所能做到的是为我们提供关键图像,用于针对一个被特定方程所描述的过程,来解释其在实践中被初始化的时候,在现实中将会发生什么样的事情。

正是这一点在召唤着物理学家的想象力,这种想象力能够将经典模型转化为强大的启发式物理工具。我很高兴能够在本书中引用由广受赞誉的表面与薄膜光

谱专家 Peter Grosse 所著的一部专著^[4]中的序言，在这部著作中，就如何应用 Drude 理论解决现阶段的问题，利用全书的篇幅发展了这一论断。

由于我的第一本书有 190 页，而第二本则是 275 页，我觉得应该以一个 $275 \times 275/190$ ，即约 400 页的篇幅继续（并完成）这个系列。当完成这篇手稿时，我想拿在您手上，或者呈现在屏幕上的书籍应该在篇幅上接近于这一目标。

再提供一个历史方面的备注：当探寻古典文学，但同时又兼顾现代中篇小说时，您会惊讶于其中关于物理和光学现象的丰富多彩的描述。约翰·沃尔夫冈·冯·歌德、E. T. A. 霍夫曼和其他人的作品中充满了大量对物理和光学现象的隐喻，以及在他们所处的时代中，对于科学奇景所做出的观察。其中一些甚至可以下溯至现代光学薄膜问题，例如在霍夫曼的天才作品《消失的反射》中人在镜子中影像的消失等。当然，魔术师 Dapertutto 绝不是一位薄膜科学家，但是时至今日，这种受控反射却仍然难以实现，所以我更愿意将其称为 Dapertutto 减反问题。

由于高度欣赏这些作家的创造性思维，我决定在本书的每一章之前，采用一个适合于介绍该章节特殊题材的（文献）引用作为这一章的引子。尽管已经提到了一些作者，但有趣的材料也可见于埃德加·爱伦·坡、约翰·罗纳德·瑞尔·托尔金、斯蒂芬·金以及其他作者的作品中。我希望您能在阅读到这个系列引文时获得一些乐趣，而如果您像我一样是一名讲师，也许您能够发现其中的一些引用对您所讲述的课程是有益和有促进性的。

由于本书的目的之一是通过可公开获得的试验材料来说明某些关联的有效性，这使我不得不大量地使用参考文献，其中必要的数据通过列表形式给出。而参考文献的原始材料一般被直接置于文本中或者图片的说明文字中。

所有的引文被统一列于参考文献一节中，位于相应的章节之末。一些文献来源于网络；我想当您读到这本书时，可能这些资源已经无法获得，实际上这些文献是于 2012 年时在網上能够获得的内容。

有许多人在撰写本书时对我提供了帮助和（有时甚至是在无意中）激励，我决定单独开辟一个致谢的小章节。这一刻请允许我向您对本书的兴趣表示感谢，并且表达我的愿望，希望您足够偏爱此书，并转入第 1 章开始阅读。

献上我最美好的祝愿。

Olaf Stenzel

参考文献

1. W. Busch, *Klecksels the Painter*, Translated from the German by Max Born, (Frederick Ungar Publishing Co., New York, 1965)
2. O. Stenzel, *The Physics of Thin Film Optical Spectra. An Introduction*, (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2005)
3. E.D. Palik (ed.), *Handbook of Optical Constants of Solids*, (Academic Press, Orlando, 1998)
4. P. Grosse, *Freie Elektronen in Festkörpern*, (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1979)

致 谢

如果想使本书获得令人满意的效果,我们就需要针对在固体薄膜中所观察到的现象,就简单的经典模型对这些现象的适用性做出考察。而且由于任何与实践相关的理论可能会在未来被试验数据所支持或者证伪,因此有必要在书中广泛地提供相应的试验数据资料。这些资料是在最近 10 年中,在许多同事与合作者的帮助下积累而成的,但无法在此提及每一个人。作为代替,我想对 IntIon、nanomorph、TACo、TAILOR 和 PluTO 等项目的参与机构中的全体成员表达我的谢意,并向德国的 BMWi、BMW A 和 BMBF 等资助部门致谢。关于合作者和公司/研究所的更具体的数据可以在相关的作者名录以及被引文献的致谢中找到,所有这些数据都早于本书的创作期间被初次发表。

我非常感谢 Johannes Ebert (Laseroptik 有限公司)、Thomas Kohler (不莱梅计算材料科学中心)、Todd Perkins (Kaiser 光学系统公司) 和 Bettina Loycke (Wiley-VCH 出版有限公司) 提供了具体图片,以及在本专著中复制这些图片的许可。大量本书中所采用的材料是我在 Fraunhofer IOF 研究所工作期间获得的,很荣幸地向 Norbert Kaiser 致谢,他允许我在此著作中使用相应的试验数据,以及 Torsten Feigl、Hagen Pauer、Ulrike Schulz、Kevin Füchsel、Astrid Bingel 和 Steffen Wilbrandt 向我提供了相应的图片材料。

关于梯度折射率膜层与皱褶滤光片特性的附加计算(第 4、9 和 10 章)是由 Tatjana Amotchkina (当时他还在莫斯科国立大学)完成的。基于离子束溅射(第 11 章)方法制备的铝-氧氟薄膜的数据由 Henrik Ehlers (汉诺威激光中心)提供。在第 5 章中用于演示的 ITO (铟锡氧化物)薄膜和铝膜样品由 Daniel Gäbler (X-FAB 半导体制造公司)提供。他们贡献了这些外部资料,这对完成本书的基础数据库具有极大的帮助。

Steffen Wilbrandt 校对了第 5 章。Rebecca Sequeira Schäffer (IOF) 能够在最短的时间内完成对文献的组织。Dieter Gäbler 向我慷慨地提供了对铝进行氢氧修饰的特殊材料。

Josephine Wolf、Matthias Böhme、Johannes Gäbler 和 Steffen Wilbrandt (全部来自耶拿的 IOF) 为本书中的图片与文稿准备提供了技术支持。标题页中的图片也

由 Johannes Gäbler 完成。

我想对我所提及的所有人表达我的特别感谢。

最后请允许我向安吉斯·麦克劳德 (Angus Macleod) 教授表达深深的感激, 当我计划撰写本书时, 他很快洞悉了我的写作意图, 并将其浓缩成一篇精心雕琢的珍贵的序, 而且同时将本书置于更加广阔的薄膜科学背景之中进行了推介。

Olaf Stenzel

目 录

第1章 引言

1.1 概述	1
1.2 薄膜物理与固体物理	3
1.3 小议光学薄膜制备	6
1.3.1 PVD 和 CVD 技术	6
1.3.2 关于 PIAD 的一些考虑	8
1.3.3 特性关联	11
1.4 本书的内容与组织结构	13
参考文献	13

第一部分 基础篇

第2章 光学常数的基本知识

2.1 线性光学的基本经典色散模型	18
2.2 介电函数的解析性质	22
2.3 经典图像下的光学常数与质量密度	25
2.4 经常用于薄膜表征实践的其他色散模型：经典以及高级模型	29
2.4.1 基本评述	29
2.4.2 Brendel 模型	34
2.4.3 Tauc - Lorentz 模型	37
2.4.4 Cody - Lorentz 模型	37
2.4.5 Forouhi Bloomer 模型	38
2.5 材料混合物	38
2.5.1 总体思路	38
2.5.2 Maxwell Garnett (MG) 方法	41

2.5.3 Lorentz-Lorenz (LL) 方法	42
2.5.4 等效介质近似 (EMA) 或 Bruggeman 方法	42
2.5.5 基于 Maxwell Garnett (MG) 方法的一个模型计算	43
参考文献	44

第3章 平面界面

3.1 菲涅耳公式	48
3.2 真实的薄膜, 真实的表面	51
3.2.1 一些试验结果	51
3.2.2 光学各向同性评述	53
3.2.3 光学不均匀性评述	55
3.2.4 表面粗糙度评述	55
3.3 突变界面与连续形貌的对比	61
3.4 强度系数	63
参考文献	69

第4章 薄膜、基底和多层膜

4.1 单层膜	71
4.1.1 通用方程	71
4.1.2 半波长膜层	73
4.1.3 1/4 波长膜层	73
4.1.4 存在微弱折射率梯度的膜层 (正入射情形下)	77
4.2 基底	80
4.3 基底上的单层膜	82
4.4 多层膜	84
4.5 范例	85
4.5.1 均匀的 1/4 波长和半波长膜层	85
4.5.2 1/4 波长双层膜系	86
4.5.3 1/4 波长 (QW) 膜堆	87
4.5.4 布拉格反射镜	93
4.5.5 皱褶滤光片	95
4.5.6 窄带滤光片 (NBP)	98
参考文献	100

第二部分 逆向搜索过程

第5章 薄膜光学常数的试验确定

5.1 试验技术	104
5.1.1 离线光度法	104
5.1.2 热漂移或真空漂移的测试	113
5.1.3 薄膜生长过程中的在线透过率光谱	114
5.1.4 椭偏法评述	116
5.2 基底的光学参数	117
5.3 薄膜: 光学带隙的快速确定	117
5.4 薄膜: 包络法	119
5.4.1 正入射	119
5.4.2 倾斜入射	121
5.5 薄膜: 基于振子模型的曲线拟合程序	122
5.5.1 常规数学方法	122
5.5.2 数据间隔选取的一些考虑	124
5.5.3 范例	127
5.5.4 与其他方法相比的一致性程度	132
5.6 薄膜: 不显性使用色散模型情况下的光学常数确定	133
5.7 基于在线透过率数据的多层膜系统的直接再优化工程	135
参考文献	138

第6章 膜系设计中的材料问题

6.1 引言	142
6.2 通用规则	143
6.2.1 一个可解定理和基于极大值原理的几个推论	143
6.2.2 截止波长和可实现的折射率范围	145
6.2.3 倾斜入射	146
6.3 $1/4$ 膜堆和光学常数	148
6.4 宽带减反膜和光学常数	149
6.5 可行性分析与计算制造	152
6.5.1 动机	152
6.5.2 关于计算制造运行的思路	153
6.5.3 误差数据的获取	154

6.5.4 范例：增益平坦滤光片	160
6.5.5 将计算制造整合入薄膜生产链	161
参考文献	162

第三部分 用于紫外/可见波段应用的基本镀膜材料

第7章 氧化物薄膜：多孔薄膜与致密薄膜

7.1 引言	166
7.2 最简化的理论考虑	167
7.3 重要氧化物镀膜材料的参数关联	174
7.3.1 二氧化钛 TiO_2	174
7.3.2 五氧化二铌 Nb_2O_5	176
7.3.3 五氧化二钽 Ta_2O_5	177
7.3.4 二氧化锆 ZrO_2	178
7.3.5 二氧化铪 HfO_2	179
7.3.6 三氧化二铝 Al_2O_3	180
7.3.7 二氧化硅 SiO_2	182
参考文献	183

第8章 其他紫外/可见波段的镀膜材料

8.1 氟化物薄膜	186
8.2 作为真空紫外反射镜的氟化物增强型铝膜	191
8.3 反射镜中的银膜	194
8.4 有机薄膜及其衍生物	197
8.4.1 非晶氢化碳膜	197
8.4.2 有机分子薄膜的特性：范例	200
8.4.3 扩展细节：分子光谱半经典描述的基本思想	207
参考文献	214

第四部分 亚波长和纳米结构薄膜

第9章 异构薄膜：概述

9.1 一种分类尝试	220
9.2 光栅波导结构	224
9.2.1 总体思路	224

9.2.2 传输模和光栅周期	226
9.2.3 吸收的影响	228
9.2.4 范例:窄线宽反射镜设计	229
参考文献	231

第10章 强烈多孔材料和表面结构

10.1 在减反用途中作为低折射率材料的蛾眼结构	232
10.1.1 周期蛾眼结构举例	232
10.1.2 塑料表面上的随机蛾眼结构	233
10.1.3 蛾眼结构功能原理评述	234
10.2 吸收材料上的随机表面结构	236
10.3 多孔二氧化硅膜层	238
参考文献	239

第11章 电介质混合物

11.1 研究动机	241
11.2 无机混合薄膜实例	244
11.2.1 氧化物混合材料的光学参数	244
11.2.2 混合物薄膜中的应力	246
11.3 无机-有机混合薄膜浅析	247
参考文献	249

第12章 金属岛状薄膜

12.1 首要的考虑	251
12.2 在电介质主体中的金属岛:光学薄膜设计中的一种可用构件	255
12.3 金属岛状薄膜的等效光学常数	258
12.4 试验举例	265
12.4.1 试验方法的一些简单介绍	265
12.4.2 例1:氧化铝中的岛状铜膜——等效光学常数对铜含量的 依赖关系	267
12.4.3 例2:氧化铝中的岛状银膜——等效光学常数对沉积温度的 依赖关系	273
12.5 光学监控的细节	275
12.5.1 理论方法	275
12.5.2 实例:铝膜生长的监控	277