

# 光学薄膜技术

国防工业出版社

# 光学薄膜技术

[英] H. A. 麦克劳德 著

周九林 尹树百 译

国防工业出版社

1974

## 内 容 简 介

本书系根据〔英〕H. A. 麦克劳德 (Macleod) 原著《THIN-FILM OPTICAL FILTERS》译出，删去了其中第十章和第十一章，并结合目前光学薄膜的生产与科研实际的需要，以及光学薄膜技术的发展情况，补进了若干译文，同时改用了《光学薄膜技术》作为本书译名。

本书较系统地介绍了常用光学薄膜的原理、设计计算、镀制方法、材料工艺以及膜厚监控技术。全书共分十章：引论、数学基础、减反射膜、中性反射镜和分光镜、多层高反射膜、截止滤光片、带通滤光片、镀制方法和薄膜材料、膜厚均匀性和层厚监控、特殊膜系，书末附有光学薄膜材料的特性。

本书可供工程技术人员、科研人员以及高等院校有关专业的师生参阅；其中部分内容可供光学镀膜工人阅读。

THIN-FILM OPTICAL FILTERS

H. A. Macleod

LONDON, ADAM HILGER, LTD

1969

### 光学薄膜技术

〔英〕H. A. 麦克劳德 著

周九林 尹树百 译

国防工业出版社

北京市书刊出版业营业登记证出字第44号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092 1/32 印张 147/8 317千字

1974年12月第一版 1974年12月第一次印刷 印数：0,001—7,200册

统一书号：15034·1365 定价：1.55元

# 目 录

第一章 引论	7
早期的历史	8
几种光学膜系	12
第二章 数学基础	17
麦克斯韦方程和平面电磁波	17
坡印廷 (Poynting) 矢量	21
单一界面的反射率	22
单层薄膜的反射率	28
多层膜系的反射率	31
反射率、透射率和吸收率	33
关于公式 (2.53) 的进一步说明	35
矢量法	39
另一种计算方法	41
计算多层膜的史密斯 (Smith) 方法	44
史密斯圆图	47
两个或多个表面的非相干反射	50
第三章 减反射膜	53
低折射率基片的减反射膜	54
高折射率基片的减反射膜	78
补充材料	93
化学溶液离心式成膜的厚度控制	93
三层宽带减反射膜 (化学法)	99
用于电影摄影物镜的宽带减反射膜	103

激光材料表面的消反射条件.....	108
用有机玻璃镀制红外减反射膜.....	117
<b>第四章 中性反射镜和分光镜</b> .....	<b>123</b>
高反射镜.....	123
中性分光镜.....	132
中性密度滤光镜.....	139
<u>补充材料</u> .....	141
超高真空蒸镀金膜和银膜.....	141
<b>第五章 多层高反射膜</b> .....	<b>149</b>
法布里-珀罗干涉仪.....	149
多层介质膜.....	156
<u>补充材料</u> .....	178
低损耗多层介质反射膜.....	178
<b>第六章 截止滤光片</b> .....	<b>188</b>
薄膜吸收滤光片.....	188
干涉截止滤光片.....	190
<u>补充材料</u> .....	243
用化学浸蚀法制造红外长(波)通滤光片.....	243
一些常用红外材料的透射率和反射率.....	246
<b>第七章 带通滤光片</b> .....	<b>257</b>
宽带滤光片.....	257
窄带滤光片.....	261
滤光片的实测特性.....	313
<u>补充材料</u> .....	317
现代窄带介质干涉滤光片.....	318
影响窄带介质干涉滤光片通带定位的因素.....	332
用“直透控制法”镀制窄带介质干涉滤光片.....	345
<b>第八章 镀制方法和薄膜材料</b> .....	<b>354</b>

薄膜的镀制	355
光学特性的测量	360
机械特性的测量	367
膜料的毒性	371
常用膜料的特性	372
真空室内的状况对膜料折射率的影响	380
<b>第九章 膜厚均匀性和层厚监控</b>	<b>383</b>
膜厚均匀性	383
基片的镀前处理	395
层厚监控	397
<b>补充材料</b>	<b>417</b>
波长扫描监控器	420
双色监控仪	426
两类层厚监控方法的精度分析	432
<b>第十章 特殊膜系</b>	<b>439</b>
偏振分光镜	439
消色差四分之一波片和半波片	443
光学隧道滤光片	445
二向分色镜	448
反热滤光镜和冷光镜	452
<b>附录 薄膜材料的特性</b>	<b>454</b>
<b>参考文献</b>	<b>458</b>

# 光学薄膜技术

〔英〕H. A. 麦克劳德 著

周九林 尹树百 译

国防工业出版社

1974

## 内 容 简 介

本书系根据〔英〕H. A. 麦克劳德 (Macleod) 原著《THIN-FILM OPTICAL FILTERS》译出，删去了其中第十章和第十一章，并结合目前光学薄膜的生产与科研实际的需要，以及光学薄膜技术的发展情况，补进了若干译文，同时改用了《光学薄膜技术》作为本书译名。

本书较系统地介绍了常用光学薄膜的原理、设计计算、镀制方法、材料工艺以及膜厚监控技术。全书共分十章：引论、数学基础、减反射膜、中性反射镜和分光镜、多层高反射膜、截止滤光片、带通滤光片、镀制方法和薄膜材料、膜厚均匀性和层厚监控、特殊膜系，书末附有光学薄膜材料的特性。

本书可供工程技术人员、科研人员以及高等院校有关专业的师生参阅；其中部分内容可供光学镀膜工人阅读。

THIN-FILM OPTICAL FILTERS

H. A. Macleod

LONDON, ADAM HILGER, LTD

1969

### 光学薄膜技术

〔英〕H. A. 麦克劳德 著

周九林 尹树百 译

国防工业出版社

北京市书刊出版业营业登记证出字第014号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092 1/32 印张 147/8 317千字

1974年12月第一版 1974年12月第一次印刷 印数：0,001—7,200册

统一书号：15034·1365 定价：1.55元



## 译 序

薄膜光学作为现代光学的一个重要分枝，随着科学技术的发展已经有了很快的进展。特别是最近十多年来，激光技术的飞速发展对于薄膜光学更是一个巨大的推动。目前光学薄膜已经非常广泛地应用到各种科学技术领域，例如天文物理学、宇航技术、红外物理学、光学仪器，以及激光技术等等。

本书系根据麦克劳德 (Macleod) 原著《薄膜滤光镜》(Thin-Film Optical Filters) 译出。原书第十章和第十一章的内容偏离主题“光学薄膜的设计与制造”太远，故将其删去；同时结合目前关于光学薄膜的生产与研究的实际需要，以及光学薄膜技术的进展，在有关各章中补入若干译文，定名为《光学薄膜技术》。

补充译文的目的是：提供原书理论阐述的具体实例；介绍一些独特的镀制工艺；克服原书取材范围的偏狭性。

由于光学薄膜技术本身在不断地发展，而译者的水平有限，实践经验不多，因此，译文和补充材料未必全都切当，恳切希望读者批评指正。

# 目 录

第一章 引论 .....	7
早期的历史 .....	8
几种光学膜系 .....	12
第二章 数学基础 .....	17
麦克斯韦方程和平面电磁波 .....	17
坡印廷 (Poynting) 矢量 .....	21
单一界面的反射率 .....	22
单层薄膜的反射率 .....	28
多层膜系的反射率 .....	31
反射率、透射率和吸收率 .....	33
关于公式 (2.53) 的进一步说明 .....	35
矢量法 .....	39
另一种计算方法 .....	41
计算多层膜的史密斯 (Smith) 方法 .....	44
史密斯圆图 .....	47
两个或多个表面的非相干反射 .....	50
第三章 减反射膜 .....	53
低折射率基片的减反射膜 .....	54
高折射率基片的减反射膜 .....	78
<u>补充材料</u> .....	93
化学溶液离心式成膜的厚度控制 .....	93
三层宽带减反射膜 (化学法) .....	99
用于电影摄影物镜的宽带减反射膜 .....	103

激光材料表面的消反射条件	108
用有机玻璃镀制红外减反射膜	117
<b>第四章 中性反射镜和分光镜</b>	<b>123</b>
高反射镜	123
中性分光镜	132
中性密度滤光镜	139
<b>补充材料</b>	<b>141</b>
超高真空蒸镀金膜和银膜	141
<b>第五章 多层高反射膜</b>	<b>149</b>
法布里-珀罗干涉仪	149
多层介质膜	156
<b>补充材料</b>	<b>178</b>
低损耗多层介质反射膜	178
<b>第六章 截止滤光片</b>	<b>188</b>
薄膜吸收滤光片	188
干涉截止滤光片	190
<b>补充材料</b>	<b>243</b>
用化学浸蚀法制造红外长(波)通滤光片	243
一些常用红外材料的透射率和反射率	246
<b>第七章 带通滤光片</b>	<b>257</b>
宽带滤光片	257
窄带滤光片	261
滤光片的实测特性	313
<b>补充材料</b>	<b>317</b>
现代窄带介质干涉滤光片	318
影响窄带介质干涉滤光片通带定位的因素	332
用“直透控制法”镀制窄带介质干涉滤光片	345
<b>第八章 镀制方法和薄膜材料</b>	<b>354</b>

薄膜的镀制	355
光学特性的测量	360
机械特性的测量	367
膜料的毒性	371
常用膜料的特性	372
真空室内的状况对膜料折射率的影响	380
<b>第九章 膜厚均匀性和层厚监控</b>	<b>383</b>
膜厚均匀性	383
基片的镀前处理	395
层厚监控	397
<b>补充材料</b>	<b>417</b>
波长扫描监控器	420
双色监控仪	426
两类层厚监控方法的精度分析	432
<b>第十章 特殊膜系</b>	<b>439</b>
偏振分光镜	439
消色差四分之一波片和半波片	443
光学隧道滤光片	445
二向分色镜	448
反热滤光镜和冷光镜	452
<b>附录 薄膜材料的特性</b>	<b>454</b>
<b>参考文献</b>	<b>458</b>

## 第一章 引 论

本书是为光学薄膜的制造者与使用者撰写的入门著作。主要内容包括光学薄膜的设计、制造、性能及其应用，并编入了必要的薄膜光学的数学基础，以便读者进行薄膜计算<sup>①</sup>。若需对薄膜计算进行更为全面的探讨，读者可查阅瓦西切克 (Vasicek)<sup>(1)</sup>所著的《薄膜光学》一书。同样，对于某些镀膜方法也不去深究，因为霍兰 (Holland)<sup>(2)</sup>已著有一本关于真空镀膜的教程<sup>②</sup>。关于仅由少数几层膜组成的膜系<sup>③</sup>，诸如分光膜、高反射膜、减反射膜和金属-介质滤光片，其详细资料以及有关各种镀制技术，在安德斯 (Anders)<sup>(3)</sup>的著作中已作了实用的介绍。同时还有一本希文斯 (Heavens)<sup>(4)</sup>著的书<sup>④</sup>，论述了薄膜 (主要是单层膜) 的基本光学性质，以及关于薄膜计算的若干知识。

本书的篇幅不可能容纳全部薄膜光学器件的内容，而只能详述其中的一些类型。

- 
- 这一段和下面一段在译校时作了部分删节。——译者
  - 中译本为《真空镀膜技术》，林树嘉译，国防工业出版社。——译者
  - 原书用广义的“滤光片”名称泛指各类光学膜系。为了不与我国习用的“滤光片”一词的含义相混淆，特将“filter”译为“膜系”；在个别文句中译为“薄膜”。——译者
  - 中译本为《固体薄膜的光学性质》，尹树百译，国防工业出版社。  
——译者

## 早期的历史

罗伯特·波义尔(Robert Boyle)和罗伯特·胡克(Robert Hooke)各自独立发现的所谓“牛顿环”现象,可以说是现代薄膜光学的萌芽。这种现象的解释在今天被认为是极其简单的:它仅仅是由于在厚度变化的单层薄膜内的干涉所致。但是,在那个时代,因为关于光的本性的理论远远落后于客观实际,所以这种现象以及同一时期伊萨克·牛顿对薄膜所作的一系列类似的观察结果,几乎过了150年以后才为科学家们所解释。在1801年11月12日,托马斯·杨(Thomas Young)对英国皇家协会发表著名的贝克莱演说时,阐述了光的干涉原理,并对这种效应作了第一个圆满的解释。正如亨利·克鲁(Henry Crew)<sup>(9)</sup>所指出,“这种简单而又惊人的重要的事实——投射到同一点上的两束光线可以彼此叠加而在该点产生暗影——据我看来,是一个突出的发现,……”。奥古斯廷·琼·菲涅耳(Augustin Jean Fresnel)更进一步地传播了杨所主张的光的波动理论,特别是用在衍射领域内。在1832年,菲涅耳提出了反射与折射定律,至今仍称为“菲涅耳定律”,它是研究薄膜系统内的干涉的基础。在1873年,詹姆斯·克拉克·麦克斯韦(James Clerk Maxwell)的巨著《论电与磁》问世了,这时分析薄膜光学问题所必需的全部基本理论才告完成。

约瑟夫·夫琅和费(Joseph Fraunhofer)于1817年制成了可以说是第一批减反射膜。较详细地引用他的观察结果是值得的,因为这些论述表明,甚至在那样早的时代,夫琅和费就对产生这类效应的物理原因有了相当透彻的理解。下

面是夫琅和费原著的一段译文，其原文收集在1888年出版的文集中<sup>(6)</sup>。

在引证我关于这个题目所做的实验之前，先介绍我所采用的方法，用它可在短期内鉴别出玻璃是否能抗大气的影响。一块长期暴露于大气而被蚀刻的玻璃，若将其一个表面研磨并尽可能精细地抛光，然后用浓硫酸或浓硝酸浸湿这个表面的一部分，例如浸湿一半表面，并让酸蚀作用经历24小时。将酸清洗干净之后便可发现，经酸浸的那部分表面所反射的光强远低于另一半表面的反射光强，即酸浸过的那部分表面暗然失泽，不过丝毫未遭蚀刻，因为其透射光仍和另一半表面一样，以致仔细检查也不能找出差别来。但若使光接近垂直入射，则很容易检查出两半表面反射光的强弱差别。玻璃愈易失泽和遭浸蚀，这种差别就愈大。若玻璃表面抛光不太精细，则上述差别就不太明显。对于不易失泽的玻璃，硫酸与硝酸便不起作用……。经过硫酸或硝酸的这种处理之后，有些牌号的玻璃表面呈现美丽鲜艳的色彩；若使光沿各种不同角度入射，则色彩宛如肥皂泡一样变幻无穷。

在1819年对正文所加的附录中写到：

对于所有的透明媒质来说，只要它们是很薄的，其反射光均呈现色彩。例如，若将酒精薄薄地涂敷在抛光的玻璃上，并使之逐渐蒸发，在蒸发行将结束时，便出现与失泽玻璃一样的色彩。若将虫胶溶在相当大量的酒精中，并将此溶液极薄地涂敷在抛光的温热金属表面上，

则酒精将迅速蒸发掉，而留下的虫胶便形成一层透明坚硬的釉子；如果这层釉足够薄，则将显现色彩。由于因失泽而显现色彩的玻璃，当入射光的倾斜角变大或变小时，其色彩随之变幻。所以，毫无疑问，这些色彩与肥皂泡的彩虹、两块抛光的玻璃平板相叠合时呈现的色彩，或概括地说与透明薄膜的色彩，有着完全相同的性质。因此，在显现出色彩的失泽玻璃表面上必然有薄薄一层玻璃质，它的折射率不同于其基底玻璃的折射率。只要玻璃表面局部失掉了某种成分，或在表面层玻璃的某种成分与有关材料组合成为新的透明物质时，就会出现上述情况。

夫琅和费显然没有按这一独特方法去发展玻璃的减反射膜，可能是因为在那个时代，光学部件尚不十分复杂，因而对减反射膜的需求也就不迫切。也可能是因为夫琅和费疏忽了关键之处：失泽玻璃不仅其反射率降低，而且同时其透射率也得到了增加。

1886年，洛德·瑞利 (Lord Rayleigh)<sup>(7)</sup> 在英国皇家协会报告说，失泽的冕玻璃平板，其反射率比刚抛光的玻璃板更低，原因是玻璃形成了薄薄的一层膜，它的折射率低于其基底材料的折射率。瑞利显然是不知道夫琅和费更早期的工作。

其后于1891年，丹尼斯·泰勒 (Dennis Taylor) 的名著《望远镜物镜的调整与试验》的初版问世了，其中写到：

关于上面所提及的失泽，在使用几年后的普通物镜的火石玻璃透镜上是十分明显的。我们很高兴的是，能够使这种火石玻璃的拥有者放心；通常用怀疑眼光看待



的这层使玻璃失泽的薄膜，却正是观测者的“挚友”，因为它增加了他的物镜的透射率<sup>(8)</sup>。

事实上，泰勒发展了一种用化学浸蚀产生失泽的加工方法<sup>(9)</sup>。科尔摩根 (Kollmorgen) 继承了这一工作，并进一步发展了化学浸蚀法，使之用于处理各种不同牌号的玻璃<sup>(10)</sup>。

同时，在十九世纪，干涉量度学有了巨大进展。从薄膜角度来看，最有意义的进展是1899年出现的法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 干涉仪<sup>(11)</sup>，它已成为薄膜滤光片的一种基本的结构形式。

因此，十九世纪末叶已为薄膜光学继后四十余年的发展奠定了基础。尚需解决的只是实际镀制薄膜的方法问题。

虽然溅射法差不多在十九世纪中叶就发现了，而在廿世纪初叶又发现了真空蒸发法，但在1930年以前，它们显然不能作为实用的镀膜方法。因为主要困难是当时缺乏真正适用的抽气机。到了1930年，C. R. 伯奇 (Burch) 关于扩散泵油的工作才使得有可能制造镀膜用的抽气机。几乎同时，德国的鲍尔 (Bauer)<sup>(12)</sup> 制出了减反射膜 (他是在研究卤化物的基本光学性质时，附带制得了能降低反射率的膜层)，而丰德 (Pfund)<sup>(13)</sup> 镀出了分光镜的高反射膜。丰德将硫化锌蒸镀在玻璃片上制成迈克耳逊 (Michelson) 干涉仪的低损耗分光镜。他还提到，二氧化钛是一种更适合的膜料。同一时期，美国的约翰·斯特朗 (John Strong) 在减反射膜方面<sup>(14)</sup> 做了积极的工作。他用氟化物作膜料 (其折射率近似渐变)，在一种场合使玻璃对可见光的反射率降低54%，而在另一种场合降低了89%。现代的减反射膜的性能并未比后者提高多少。