

〔英国〕O. S. 希文斯著

固体薄膜的光学性质

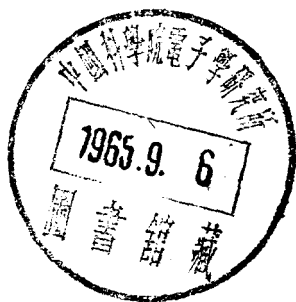


国防工业出版社

固体薄膜的光学性质

[英国] O. S. 希文斯著

尹树百译



国防工业出版社

1965

內 容 簡 介

本书为英国里丁大学物理学讲师 O. S. 希文斯所著。书中叙述了薄膜的形成、薄膜的结构及其光学常数的测量。此外，在本书的最后一章中还专门介绍了薄膜在光学上的实际应用。

书中所搜集的材料对从事薄膜工作的科研人员和工程技术人员均有参考价值。

OPTICAL PROPERTIES OF THIN SOLID FILMS

[英国] O. S. Heavens

BUTTERWORTHS SCIENTIFIC PUBLICATIONS 1955

固体薄膜的光学性质

尹树百译

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 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

850×1168¹/₃₂ 印张 7¹/₂ 191 千字

1965 年 5 月第一版 1965 年 5 月第一次印刷 印数：0,001—2,900 册

统一书号：15034·817 定价：(科八-1) 1.60 元

目 录

著者序	3
第一章 緒論	7
第二章 薄膜的形成	12
第三章 固体薄膜的結構	28
第四章 薄膜光学	48
第五章 薄膜的厚度及光学常数的測量	97
第六章 薄膜的光学測量結果	149
第七章 薄膜在光学上的实际应用	196

固体薄膜的光学性质

[英国] O. S. 希文斯著

尹树百译



国防工业出版社

1965

內 容 簡 介

本书为英国里丁大学物理学讲师 O. S. 希文斯所著。书中叙述了薄膜的形成、薄膜的结构及其光学常数的测量。此外，在本书的最后一章中还专门介绍了薄膜在光学上的实际应用。

书中所搜集的材料对从事薄膜工作的科研人员和工程技术人员均有参考价值。

OPTICAL PROPERTIES OF THIN SOLID FILMS

[英国] O. S. Heavens

BUTTERWORTHS SCIENTIFIC PUBLICATIONS 1955

固体薄膜的光学性质

尹树百译

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 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

850×1168¹/₃₂ 印张 7¹/₂ 191 千字

1965 年 5 月第一版 1965 年 5 月第一次印刷 印数：0,001—2,900 册

统一书号：15034·817 定价：(科八-1) 1.60 元

著 者 序

早在十七世紀，薄膜的光學性質便有科學研究的記載。這些記載與其他許多光學實驗結果一起，記述在牛頓的具有獨特風格的早期著作“光學”中。牛頓的貢獻在於：在廿世紀編寫的光學著作中，仍然必須參考他的著述（這不僅是從歷史角度出發）。在牛頓時代，光傳播的机理雖然存在著一團疑問，但對於薄膜顏色與其厚度的關係所進行的觀察一直証實是有用的，而且它還是今天某些薄膜厚度測量方法的基础。

近年來，隨著制备薄膜方法的发展，大大激起了人們對薄膜光學性質的興趣。目前，能够获得的丰富資料值得集成一部專冊。雖然薄膜的光學性質仍有許多問題未获解决，但對其一般特征已有相当了解。研究薄膜結構的方法不断迅速進展，進一步有助於對薄膜所呈現的光學現象進行解釋，同時，快速計算技術方面的发展對研究多層膜系性質所費的劳动大为減輕。本書最后一章將論述薄膜的实际应用，目前，在這方面取得了相当惊人的進展。

我衷心感謝 R.W. 迪奇布恩 (Ditchburn) 教授的幫助和鼓勵以及 R.A. 赫曼 (Hyman) 先生幫助校對。我也感謝 F. 阿貝勒 (Abelès) 博士 (巴黎)，P. 魯阿德 (Rouard) 教授和 D. 迈勒 (Malé) 博士 (馬賽) 以及 A.F. 特勒 (Turner) 博士 (紐約) 等不因彼此遠隔而給予我的幫助。我還要感謝我的妻子勤懇地幫助准备抄本。

下述刊物允許复印图表，本人亦表示謝忱：

Journal of Applied Physics, vol. 14 (表 3.1).

Optik, vol. 7 (图 3.9).

Journal of Scientific Instruments, vol. 29 (图 5.1).

Canadian Journal of Research, vol. 26 (图 5.12).

Journal of Chemical Physics, vol. 17 (表 5.1).

Philosophical Magazine, vol. XLI (图 5.24).

Journal of the Optical Society of America, vol. 40
(图 6.9).

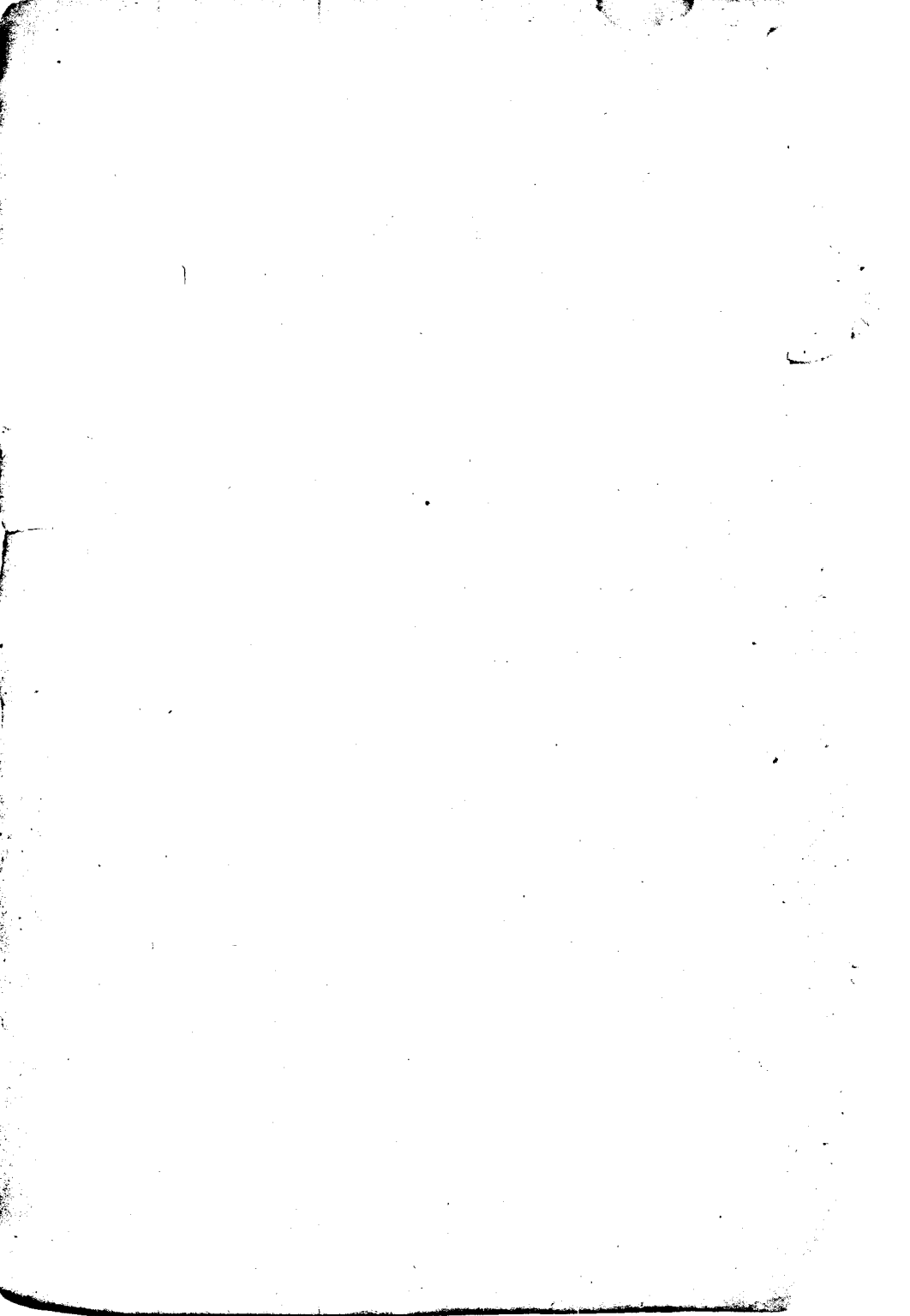
并感謝保希-罗姆 (Bausch & Lomb) 光学公司允許复制
图7.8。

O. S. 希文斯

1954, 12

目 录

著者序	3
第一章 緒論	7
第二章 薄膜的形成	12
第三章 固体薄膜的結構	28
第四章 薄膜光学	48
第五章 薄膜的厚度及光学常数的測量	97
第六章 薄膜的光学測量結果	149
第七章 薄膜在光学上的实际应用	196



第一章 緒 論

1.1 薄膜重要性的成长

差不多在本世紀的前半期，人們對薄膜光學性質的興趣大都限於干涉量度學中反射膜的应用，在這方面，薄膜的重要性是很明顯的。用具有高分辨率的儀器如法布里—珀羅干涉儀能夠進行高度準確的光譜工作，從而在這個領域中取得了很大的進展。可是薄膜所起的作用純系從實用角度着眼，對薄膜內在性質的研究很少給予注意。

早期研究結果，薄膜光學性質與大塊材料的光學性質之間有很大的差異，吸收材料尤其如此。即使考慮到材料的綫度在一個方向上受了限制，所能估計出的兩者性質上的差異仍遠小於實際差別[●]。那時認為薄膜具有反常特性，但為解釋反常性而提出的那些方法，後來却發現是無用的。近廿年來，人們對薄膜的光學性質及其他性質的興趣大為增長。薄膜的製備技術與研究方法的发展使對薄膜的性質得到較清楚的認識，對其光學特性得到了解。

薄膜的用途與研究逐日增長的原因是：一方面由於真空技術的迅速發展，另一方面由於作測試用的電子光學方法的進展。製備與研究薄膜所必需的低氣壓容易獲得，才使迅速發展成為可能。此外，電子顯微術能使我們直接得到有關知識，不然，這些知識就難以準確地推斷出來。根據電子光學証明，除某些特殊情況外，薄膜差不多總呈無序狀態（即為非結晶的聚集物——譯注）。低序態

● 薄膜可認為是厚度受限制的大塊材料（即後者可視為無限多層薄膜疊加而成），考慮到此點所能估計出的差異仍比兩者實際差別小得多，故不能僅以厚度之不同解釋兩者性質之不同，其原因要複雜得多。——譯注

能够解释薄膜特性中所出现的许多明显反常，从而为发展理论研究提出一个重大课题。

1.2 薄膜淀积方法

淀积薄膜——特别是光学系统中应用的薄膜——最广泛采用的方法是热蒸发法。在下章中将着重叙述这一方法。在控制测试方面，没有任何一种方法能像热蒸发法这样完善。利用适当的遮板和光阑，并在薄膜淀积过程中巧妙地移动标的物，则实际上可在表面上获得任意分布的膜层。这使我们立刻联想到这能直接应用于制造各种非球面工作中。根据几何光学研究，知道这是很有用的。不用热蒸发法，而用其他方法来制备许多这样形式的非球面是极其困难的，以致该方法无实用价值。这些及其他应用将在最后一章中讨论。

薄膜淀积过程伴随着许多复杂的因素，这就导致不同观测者对薄膜所作的研究结果缺乏一致性。在薄膜性质与其形成条件的依赖关系被认识以前，对许多重要因素的控制给予很小注意。对薄膜性质有影响的因素是：淀积率，碰撞原子的速度，衬底表面的结构与状况，薄膜的时效等。缺乏关于这些因素以及其他决定薄膜性质的许多因素的资料，因而要对不同工作者的结果加以比较极感困难。电子光学方法能够估计蒸发条件对薄膜性质与结构的影响。因此，在不同来源的有关薄膜数据之间有望取得较大程度的一致性。

1.3 薄膜系统光学性质的计算

当一束光通过折射率呈不连续变化（或变化发生在小于光波长的距离内）的层状媒质时，则发生多次反射。若界面间的距离相当小，以致各多次反射光束彼此相干，则系统的反射光或透射光的强度便由振幅的代数和给出。应用适当的边界条件，按麦克斯韦方程计算各振幅之和。对于被已知反射率的两界面夹住的单

层膜而言，其反射率与透射率由爱里和给出；大家熟知的法布里—珀罗标准具便是如此。这种处理是近似的，因为假定光在标准具的两反射面上反射时的位相变化相同。实际上，采用金属反射面时，计算并非正确。不过，如果反射面的反射率很高，则误差便不大，因而在干涉仪中通常是这样安排的。若不从考虑银膜具有有效反射率，而从所有膜层的光学常数来计算标准具的性质，则问题就变得很复杂。然而，这正是从光学常数与膜厚的给定值计算膜系光学性质的普遍问题。

不难看出，多次反射的逐次求和方法对于多层膜系几乎没有多大用处。有可能找到更简捷的途径。但是，在未涉及每层媒质内的波的合振幅之前，仍可假定求和法有效。因而，应用对合成波的边界条件，便不难求得反射率与透射率的表达式。原则上，任何层数的膜系均可直接求解，因为显然可利用膜系的各参数算出反射率和透射率。实际上，两层以上膜系的 R 与 T 的表达式极其复杂烦琐，且取决于膜层系透明或系吸收。即使是单层膜的 R 与 T 的简洁表达式，由于含有复菲涅耳系数，因而仍显得繁杂。

研究此问题所用的各种方法将于第四章讨论。论及的方法不需要高深的数学知识便能应用。虽然，在某些场合中，有可能提出更恰当的处理与更简洁的表达式，但是，一般来说，这就需要多数物理学工作者所未具备的相当湛深的数学技巧。

1.4 薄膜的测量

随着薄膜工作重要性的增长，有关薄膜性质的知识便日渐需要，从而要求发展适于研究薄膜的方法。许多测量薄膜厚度的早期方法，要求预知薄膜折射率，反之亦然。最近，提出了能独立地确定折射率与厚度的方法，这些不利用假定薄膜的任何性质（或许，化学成分除外）与大块材料的性质相同的方法是多么的需要。

最大的困难是测量吸收材料，特别是强吸收材料（金属）薄膜。

对于这类薄膜只有当测量了它两侧的透射光及反射光的振幅与位相后，才能确定它的光学常数。这类测量要作到高度准确是有困难的。早期测量方法不能同时给出光学常数与厚度，其缺陷已为许多刊出的光学常数之间有显著差异一事清楚表明。这些数值之差别，一方面可能是由于采用不适当的测量方法，另一方面可能是由于薄膜的光学常数随制备条件而显著变化所致。

金属薄膜的光学常数随厚度不同而显著变化的原因已被证明是由于膜层的聚集性质所致。观测金属薄膜的光学性质所推断出的膜层结构与直接由电子显微术观察到的，或间接由电子衍射与其他实验推断出的膜层结构表现出明显的一致。

1.5 薄膜的用途

随着可拆卸的真空系统设计迅速发展，薄膜的数量与应用范围均疾速增加。小型真空镀膜装置差不多业已成为研究实验室的基本设备。在工业生产方面，真空蒸发系统已加入日常生产过程的行列中，对于透镜镀膜来说，甚至发达到连续作业的地步。（使人感觉矛盾的是，目前透镜制造厂生产无透光膜透镜还较生产镀有透光膜的透镜困难得多，镀有透光膜的表面具有更高的硬度，因而镀有透光膜的产品较未镀膜的原材料更不易划出道痕）。

在实验室中，薄膜可以应用在许许多多不同方面的工作上。采用镀膜电极常可给电学实验带来方便，这种电极既能紧贴表面，又不会使表面受到机械损伤。红外光谱仪中使用的收湿的光学零件上可镀以适当的不溶膜进行保护。同样地，反射表面亦可镀以保护膜防止大气侵蚀。静电电荷常对使用细悬线的试验起阻碍作用，在有关元件上镀以金属膜即可减少这种作用；对阴极射线管的荧光屏作同样处理，则既可消除讨厌的电荷，又可增加图像的亮度。用蒸发膜作热电偶则能大大克服测量表面温度的困难。此外，近红外区的大多数光学测量均依据热蒸发膜层的光导性质。

在薄膜的各种应用中，最大的成就也许在多层滤光片刀面。

由简单的降低反射的低折射率层及增高反射的高折射率层发展到相当复杂的多层膜系，它们具有极为有用的光学性质。在这方面計有：窄透过带滤光片，截止式宽带滤光片，低通和高通滤光片，这些几乎可按预期要求制成。由于薄膜的制备与控制技术并未落后于理論工作，所以制备层数极多的某些滤光片并非难事。

从近年发表的有关固体薄膜光学性质的許多文章中清楚看出，一部完美的論著应当是百科全书式的。本书是从仍在迅速发展的领域中抽出的某些材料組成；这些材料清楚表明了薄膜在光学研究上的地位及其局限性。

第二章 薄膜的形成

2.1 引 言

本章将詳細論述各种薄膜制备方法的实验技术。由于热蒸发法已得到最广泛的发展，因此，着重叙述之。与下述其他各方法（其中有不少方法的实验过程易于控制）相比较，热蒸发法具有許多优点。用热蒸发法易于获得高純度的薄膜，且受干扰条件的影响极小。虽然热蒸发法有这許多好处，但蒸发膜性质的許多研究結果并未經常表现出所期的一致性。彼此差异的原因常常不是由于方法本身任何固有的障碍，也許更多的是由于不同观察者缺乏对許多实验因素的控制所致——实验者往往很难說明薄膜制备时的准确条件。

蒸发法并不能普遍应用于实践中，因为对于高熔点材料，不可能使衬底不过分受热。而将薄膜淀积好。在薄膜淀积过程中，衬底溫度对决定薄膜的结构有重大作用，因此，欲得重复性結果，就应避免使用任何不能严格控制此因素的方法。对于不宜采用热蒸发法的金屬，一般采用溅射法。比較溅射法与热蒸发法看出，在溅射率与蒸发率均具有同一数值的条件下，溅射源的平均溫度却远低于蒸发源的，因此，衬底表面接受的輻射热亦远少于后者。在热蒸发技术发展以前，曾广泛采用溅射法，許多关于薄膜淀积的基本問題的早期研究工作（2.6节）多对溅射材料而进行的。目前的趋势是，只要能应用蒸发法的地方，大家都宁願采用蒸发法，而不采用溅射法，因为前者对有价值的諸实验条件較能滿意控制。此外，維持溅射过程需要一定量的气体，因而对膜层可能有影响，而用蒸发法則能避免这种影响。最近发展的在磁場中进行的溅射方法能在比以前低得多的压强下进行工作。

現存各方法的重要性主要在于实用。目前,对电镀膜或化学淀积膜的性质所进行的工作很少,但那些具有实用价值的膜层除外。例如,由于发现某些化学淀积膜可以作减反光膜与高反射膜(7.2, 7.3节),因此对它們的光学特性加以研究。

2.2 热蒸发过程

我們首先研究,当蒸汽凝結为膜层时,为使膜层所受的外界因素影响为最小而必須实现的諸条件。对蒸发膜的状态与性质产生影响的因素估計有:

- (i) 镀膜室内剩余气体的种类和压强。
- (ii) 凝結到表面上的原子束强度。
- (iii) 衬底表面的状况与性质。
- (iv) 蒸发源温度及碰撞原子的速度。
- (v) 蒸发器材料对待蒸发材料的污染。

剩余气体

用蒸发法淀积薄膜必須滿足如下条件:汽化原子的平均自由路程应大于系統的尺寸,或更明确地說,应大于蒸发源至标的物的距离。在这一条件下,镀膜室中蒸发原子与剩余气体原子的碰撞次数可忽略不計。下表列出銀原子在剩余氧的各种压强时的平均自由路程值。

对于实验室常用的、大小約几十厘米的真空系統而言,在 10^{-5} 毫米水銀柱压强下工作便滿足平均自由路程条件。但是,若欲使剩余气体对薄膜結構的影响减小到可以忽略的程度,則必須滿足更严格的补充条件。这涉及到剩余气体原子在薄膜淀积过程中碰撞到衬底表面的次数。根据分子运动

表 2.1

压 强 毫米水銀柱	平均自由路程 厘 米
10^{-3}	4.5
10^{-4}	45
10^{-5}	450
10^{-6}	4500
10^{-7}	45000