

光学薄膜及其进展

范正修

(中国科学院上海光学精密机械研究所中国科学院强激光材料重点实验室, 上海 201800)

摘要 对光学薄膜的性能及制备技术等方面进行了简要的评述, 并指出随着科学技术的进步, 光学薄膜及相关技术不论从广度还是深度来看都得到了显著发展。

关键词 薄膜; 薄膜技术; 制备; 检测; 监控

中图分类号 O484 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0900131

Development and Recent Progress of Optical Thin Films

Fan Zhengxiu

(Key Laboratory of Materials for High Power Lasers, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Development of deposition technology and properties of optical thin films is reviewed. It shows that rapid advances in properties and application fields are achieved for optical thin films with the progress of science and technology.

Key words thin films; thin film technology; preparation; measurement; monitor

OCIS codes 310.6860; 310.6845; 310.3840; 310.4165; 310.6870

1 引 言

光学薄膜是一类重要的光学元件, 它广泛地应用于现代光学、光电子学、光学工程以及其他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 年代扩散泵应用于真空系统开始。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*^[1] 及 Holland 1956 年出版的 *Vacuum*

Deposition of Thin Films^[2] 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 Macleod 的 *Thin Film Optical Filters*^[3], 该书 2001 年已经有第三版问世, 每一版都反映了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 1976 年出版的《应用薄膜光学》。在此基础上 2006 年又出版了《现代光学薄膜技术》^[4], 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。其他专著如 Herman 1996 年出版的 *Optical Diagnostics for Thin Film Processing*^[5], Freund 等 2003 年出版的 *Thin Film Materials Stress Defect Formation and Surface Evolution*^[6] 以及 Lakhtakia 在 2006 年出版的 *Sculptured Thin films Nanoengineered Morphology and Optics*^[7] 等, 都在不同方面反映了光学薄膜的进展。

在会议方面, 影响比较大的是在美国举行的

收稿日期: 2011-07-18; **收到修改稿日期:** 2011-08-08

作者简介: 范正修 (1940—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学薄膜及薄膜技术等方面的研究。先后获得全国科学大会重大科技成果奖、国家科学技术进步二等奖、中国科学院自然科学二等奖、上海市科技进步二等奖等。

E-mail: zxfan@mail.schnc.ac.cn

“Optical Interference Coating Topical Meeting”,每三年一次,到2010年已经举行了11届,其中2010年出版的论文集收集论文170余篇,可谓盛况空前。该专题会议的文章不仅数量越来越大,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42届^[8],极大地推动了激光材料、激光薄膜及激光破坏机制研究的发展。

由于光学薄膜涵盖的内容非常丰富,对其进行全面论述是很困难的。在这篇文章里,仅能就个人的知识和认识水平对光学薄膜的内容及其发展概况做简要的叙述。

2 光学薄膜的性质及功能

光学薄膜最基本的功能是反射、减反射和光谱调控。依靠反射功能,它可以把光束按不同的要求折转到空间各个方位;依靠减反射功能,它可以将光束在元件表面或界面的损耗减少到极致,完美地实现现代光学仪器和光学系统的设计功能;依靠它的光谱调控功能,实现光学系统中的色度变换,获得五彩缤纷的颜色世界。不仅如此,光学薄膜又是光学系统中的偏振调控、相位调控以及光电、光热和光声等功能调控元件,光学薄膜的这些功能,在激光技术、光电子技术、光通信技术、光显示技术和光存储技术等现代光学技术中得到充分的应用,促进了相关技术和学科的发展^[3]。另一方面,科学技术的不断发展,不仅对光学薄膜提出更多更新的要求,而且提供了源源不断的技术支撑,这一切又促进了光学薄膜的持续发展。正是学科之间这种相互促进、相互依赖的助推关联,不断把光学薄膜学科和技术推向更高更新的发展阶段,使其更好地应用于各个科学技术领域,促进了科学技术的不断发展和人类生活的不断改善。

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基础上的、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数十微米层、纳米层甚至原子层厚的薄膜中的传播行为,由此设计出不同波长、不同性能、适应不同要求的薄膜元件^[3,4]。传统的光学薄膜是一类被动的线性光学元件,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,现代光学薄膜还涉及到光学薄膜的力学、结构、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,这些问题涉及到更深入更广泛的科学内容^[6,7]。

3 光学薄膜的制备、控制及测试技术

光学薄膜的迅猛发展依赖于薄膜技术的迅猛发展。薄膜技术主要包括薄膜的制备技术、薄膜的控制技术和薄膜的测试分析技术。

3.1 光学薄膜的制备技术

薄膜的制备技术就是把体材料变成薄膜态材料的技术,如何把相应的薄膜材料按照特定的要求沉积为薄膜,对于高性能光学薄膜来说,无疑是最重要的。常用的制备技术是真空热蒸发,最常用的蒸发手段是电阻蒸发和电子束蒸发。这些年来,尽管光学薄膜制备技术得到长足发展,但是真空热蒸发依然是最主要的沉积手段,当然热蒸发技术本身也随着科学技术的发展“与时俱进”。在光学薄膜发展的过程中,各种先进的薄膜制备技术不断充实到光学薄膜制备的行列中来,其中包括离子束溅射技术,离子镀技术,离子辅助沉积技术,磁控溅射技术,分子束外延技术,激光沉积技术,溶胶-凝胶技术,化学气相沉积技术,原子层沉积技术以及分子静电自组装技术等。这些技术用于光学薄膜的制备,不仅大大拓宽了光学薄膜可以利用的材料范围,而且极大地改进了光学薄膜的性能和功能,进而给光学薄膜提供了更为广阔的发展空间。

3.2 光学薄膜的控制技术

光学薄膜的控制技术是薄膜制备过程中沉积参数和薄膜基本性能的监控技术,通过过程参数的监控,可以保证所制备的光学薄膜符合设计要求。监控参数越准确、精度越高,光学薄膜器件的最终性能与设计性能越接近。

光学薄膜的控制首先是薄膜厚度的控制。最常用的方法有光控法和晶振法^[4],前者控制的是光学厚度,对于规整膜系的控制有着明显的优越性;后者控制的是质量厚度,更多地用于薄膜沉积速率的控制和一些非规整膜系的控制。在现代光学薄膜的制

备过程中,一般都把两者结合起来,互相补充,互相印证,实现薄膜厚度的全自动控制。由于计算机技术在薄膜技术中的充分应用,可以在制备过程中不断对实际薄膜性能进行拟合和自动补偿,从而实现薄膜过程的能动控制^[5]。

光学薄膜的控制技术远不限于厚度控制,为了制备质量更稳定性能更好的光学薄膜,必须对薄膜制备进行全过程控制。在薄膜沉积的过程中,必须进行真空气氛和湿度的控制,基底及环境温度的控制,薄膜材料的组分和结构的控制,蒸气源均匀性和工作状态的控制等,以保证薄膜具有设定的组分、结构及满足设计和使用要求的光学性质、力学性质以及物理与化学性质^[9]。

3.3 光学薄膜的测试技术

光学薄膜的测试,主要包括光学薄膜的器件性能和材料性能等几个方面的内容。通过测试,不仅可以给出元件的性能和质量,作为它的质量评价和应用过程中的标准参数,通过薄膜宏观与微观、终态与中间过程的检测,分析薄膜宏观与微观以及各个参数之间的内在联系,得到薄膜设计性能与实际性能和器件性能存在差别的内在原因,为薄膜科学的发展和薄膜性能的改进提供必要的依据。人们通常说,测试的精度有多高,元件的性能就有多好,可以形象地反映测试技术在光学薄膜研制过程中的重要性^[4]。

光学薄膜的测量首先是光谱性能的测量,该功能是由分光光度计实现的。早期的分光光度计主要用于化学分析,随着光学薄膜需求的增多,一些厂家和公司已经制备出专门用于光学薄膜的光谱性能测量的光谱仪器和用于多种性能表征的仪器设备。这些设备不仅可以用于一般的透射谱和吸收谱测量,还可以测量光学薄膜的积分散射以及在不同角度下的反射率和偏振特性。

除了光谱性能,光学薄膜的基本性能还包括薄膜的吸收、散射、应力、机械强度以及膜层的厚度、折射率和消光系数^[9]。此外,一些有特殊要求的薄膜需要进行高低温、高低湿度、耐辐照及耐酸碱等多种例行检验。对于激光薄膜来说,还要进行激光破坏阈值或抗激光特性的检验。为了进行这些性能的检测,已经建立了一些通用的测试设备和测试方法,不少实验室还针对不同的元件和特殊的要求建立了专门的装置和采用特定的方法^[8]。

从薄膜态材料的角度出发,光学薄膜不仅要关注其宏观器件特性,也要关注其微观的结构特性和

材料特性。目前,各种各样的用于材料和表面测量的仪器和方法,包括 X 射线衍射和拉曼散射、透射电镜和扫描电镜、俄歇和光电子能谱、二次电子能谱和卢瑟福背散射以及原子力显微镜等,已经在光学薄膜的研制中得到广泛的应用。通过相应的测量和分析,可以准确地获得薄膜的结晶特性、表面界面和剖面形貌、组分和杂质及其演化特性、各种结构缺陷特性等,为薄膜性能的有效分析、改进和功能控制打下坚实的基础。

4 光学薄膜的应用

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

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围绕这个问题进行。目前,1064nm 的激光反射膜,在 1 ns 脉宽的条件下破坏阈值已经达到 100 J/cm^2 以上,用溶胶-凝胶法在熔石英基底上制备的 351 nm 减反射膜在 3 ns 脉宽条件下的破坏阈值也已超过 20 J/cm^2 。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和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,主要在两个方面扩展了光学薄膜器件的要求:1)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延迟量的补偿。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。2)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,目前尺寸为米级的脉冲压缩光栅已经研制成功,其平均衍射效率大于 95%^[8]。

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 1×10^{-6} 的光学薄膜元件已经成功地应用于相应的仪器和系统^[9]。

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,半峰全宽仅有 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,它在一 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度区间内波长漂移小于 0.1 nm。层数近 400 层、厚度达 $65\text{ }\mu\text{m}$ 的宽波段波分复用滤光片也已发展为产品^[9]。

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,其中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^[9]。

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前提下,截止波长的光密度可以达到 8,甚至更高^[9]。

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,应确保器件更高的稳定性、可靠性和足够长的寿命。

随着科学技术的发展,光学薄膜不仅在原有学科范围内不断深入、发展和提高,而且其学科及技术范畴也不断开阔,更加体现出其多学科综合性的特点。从学科的交叉、渗透和发展的角度来考虑,光学薄膜应该放到更高层次、更宽范围进行分析研究。

5 光学薄膜与薄膜科学

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,诸如沉积、生长、结构、形貌、物理、化学和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。不从薄膜的基本性质上来把握,不可能获得具体性质千变万化的根本原因。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、结构和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,且相互影响和转换。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上来把握光学薄膜,不可能能动地把握光学薄膜和充分地应用光学薄膜,更不可能把光学薄膜推向新的高度^[6]。

6 光学薄膜与微纳光学和光子学

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。光学薄膜本身就是典型的微纳结构。在厚度方向上,光学薄膜的尺寸可以小到亚纳米甚至更小。在平面方向上,它是由各种不同形态的纳米颗粒组成的。当薄膜的厚度在纳米、亚纳米尺度时,这些纳米颗粒可能是不连续的或局部连续的。不同结构下光学薄膜的各种性质一定程度上与微纳光学结构的性质是相通的^[6]。

集成光学可以在微观尺度上实现光学和光电子学各项功能,是现代光学研究的重要内容之一。光学薄膜是集成光学系统中的重要构件。

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^[7,10]。

光子晶体是现代光子学的一个重要分支。光子晶体与光学薄膜所研究的几何尺度是一样的,所以,从某种意义上来说,光学薄膜与光子晶体可以看做一个问题的两个方面。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扩展。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^[6,10]。

不论从理论基础还是从技术基础上来看,光学薄膜本身就属于微纳光学。如果从光学薄膜平面结构的变化对薄膜光学性质的影响来分析,或者是现代光学薄膜中新发展的显微阵列薄膜、雕塑薄膜等不同类型的结构薄膜来研究,光学薄膜本身已经从一维延伸到多维^[7]。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,以期产生更多的性质,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。诸如多层膜光栅、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。现代光学薄膜已经在维度上打

破了原来的范畴,在性能上也由被动向能动延伸。光学薄膜已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^[7]。

7 结 论

20世纪90年代科学家曾经预言,21世纪是光子世纪。光学薄膜是传输光子并实现其各种功能的重要载体和部件,人们在期待光学、光电子学及光子学得到突破性发展的同时,必然会看到光学薄膜进一步的繁荣和发展。

参 考 文 献

- 1 O. S. Heavens. *Optical Properties of Thin Solid Films*[M]. London: Butterworths Scientific Publication, 1955
- 2 L. Holland. *Vacuum Deposition of Thin Films*[M]. London;

- Chapman & Hall, 1956
- 3 H. A. Macleod. *Thin-Film Optical Filters*[M]. Third Edition, London: Institute of Physics Publishing, 2001
- 4 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. *Modern Optical Thin Film Technology*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006
唐晋发, 顾培夫, 刘旭等. *现代光学薄膜技术*[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006
- 5 I. P. Herman. *Optical Diagnostics for Thin Film Processing*[M]. San Diego: Academic Press, 1996
- 6 L. B. Freund, S. Suresh. *Thin Film Materials; Stress Defect Formation and Surface Evolution*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004
- 7 A. Lakhtakia. *Sculptured Thin Films Nanoengineered Morphology and Optics*[M]. Bellingham: SPIE Press, 2005
- 8 G. J. Exarhos, V. E. Gruzdev, J. A. Menapace *et al.*. *Laser-induced damage in optical materials;2010* [C]. *SPIE*, 2010, **7842**
- 9 N. Kaiser, M. Lequime, H. A. Macleod. *Advance in Optical Thin Films III*[M]. Bellingham: SPIE Press, 2008
- 10 J. Singh. *Optical Properties of Condensed Matter and Applications*[M]. Chichester: John Wiley and Sons Ltd., 2006