

文章编号 1004-924X(2016)12-2908-08

高性能偏振膜的研制

朱美萍*, 孙建, 张伟丽, 赵元安, 刘晓凤, 赵娇玲, 易葵, 邵建达
(中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800)

摘要:综述了国内外科研人员在高性能偏振膜的研制方面开展的工作, 主要涉及偏振膜光谱性能、抗激光损伤阈值和膜层应力控制等方面的研究。针对我国神光系列装置对偏振膜的性能要求, 简述了中国科学院上海光学精密机械研究所采用电子束沉积技术在光谱性能、损伤阈值和面形精度三个方面开展的研究工作。给出了在薄膜设计、制备和后处理等方面进行的研究和取得的进展。结合上述研究成果, 得到了低缺陷密度、低应力的高性能偏振膜。由本科研团队研制的布儒斯特角薄膜偏振器在 2012 年和 2013 年 SPIE 激光损伤国际会议(SPIE Laser Damage)组织的全球性偏振膜激光损伤阈值水平竞赛中连续取得了 p 分量损伤阈值和平均损伤阈值最佳的结果。另外, 通过解决应力诱导膜层龟裂的重大技术问题, 在国内首先推出了大口径偏振片, 该大口径偏振片满足透射率 $T_p > 98\%$, 反射率 $R_s > 99\%$ 的光谱性能要求和 17 J/cm^2 (9 ns) 的通量运行要求, 有力支撑了我国 SGII-UP 大型激光装置的稳定运行。

关键词:高功率激光; 薄膜偏振片; 激光损伤阈值; 应力控制; 综述

中图分类号: O484.1; O436.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162412.2908

Development of high performance polarizer coatings

ZHU Mei-ping*, SUN Jian, ZHANG Wei-li, ZHAO Yuan-an,
LIU Xiao-feng, ZHAO Jiao-ling, YI Kui, SHAO Jian-da

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

* Corresponding author, E-mail: bred@siom.ac.cn

Abstract: The research and achievements of high performance polarizer coatings by many scholars around the world are reviewed, including the spectral properties, laser damage threshold and stress control. For the performance requirements of polarizer coatings in China Shenguang series facilities, it describes the investigation of spectral properties, laser damage threshold, and figure accuracy of the polarizer coatings based on electron beam depolarization by Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics of the Chinese Academy of Sciences(SIOM). Much work and achievements on design, preparation and post-treatment of the coating are given. On the basis of the research achievements, high performance thin films polarizer with low defect density and low stress have obtained. The Brewster angle thin film polarizer developed by our team has participated in the International Laser Damage Competition held on the SPIE 2012 Laser Damage & SPIE 2013 Laser Damage Symposium. The p-polarized LIDT(Laser Induced Damage Threshold) as well as the average of p-polarized and s-polarized

收稿日期: 2016-10-26; 修订日期: 2016-11-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61505227)

LIDT achieves the best results. The stress-induced crazing of large aperture polarizer coating is also solved, by which the manufacturing of large aperture polarizer is implemented in China, showing the spectral properties of $T_p > 98\%$, $R_s > 99\%$ and the flux property of 17 J/cm^2 (9 ns). Now, the prepared large aperture polarizer has supported the stable operation of ShenguangII-UP laser facility.

Key words: high-power laser; thin-film polarizer; laser damage threshold; stress control; review

1 引言

薄膜偏振片通常用作光开关或隔离元件,是激光系统中必不可少的元件,对整个激光系统的设计起着重要的作用。应用于高功率激光系统的偏振膜应兼具优异的光谱性能、高的抗激光损伤阈值和良好的波面质量。为了获得高性能的偏振膜,国内外研究人员开展了大量的研究工作。在光谱性能方面,美国 LLNL 国家实验室的 C. J. Stolz 等人从理论上研究了短波通、长波通和 F-P 带通设计作为初始膜系对偏振膜带宽、误差敏感性和消光比的影响^[1]。美国罗彻斯特大学 LLE 实验室的研究人员借助扫描电子显微镜(SEM)获得了石英晶振片随沉积在其上的膜层厚度变化的校正因子,从而得以精确地控制膜层厚度,满足了美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)对偏振膜元件的光谱性能要求^[2]。

损伤阈值方面的研究工作涉及镀膜材料的选择、膜系设计和激光预处理等多个方面。近年来在提升损伤阈值方面最显著的成果之一是采用金属 Hf 替代 HfO_2 作为初始镀膜材料来制备 HfO_2 膜层,使膜层中的节瘤缺陷密度降低了 2~3 倍,大幅提升了薄膜元件的抗激光损伤阈值。在膜系设计方面,研究人员在驻波场和保护膜方面做了大量的工作^[3-4]。研究表明,激光预处理的本质是利用亚阈值状态的激光能流,以较轻微的方式去除深藏于介质膜内部的节瘤缺陷,从而降低缺陷区的局部吸收和电场畸变,有效提高介质膜的抗激光损伤能力。20 世纪 80 年代末期,LLNL 实验室的研究人员发现激光预处理过程中会出现一些损伤诊断系统无法识别的微小破坏。这些破坏引起的散射光变化,与缺陷以及系统噪音引起的散射光变化相当,因此微小破坏的存在不会影响元件的光学性能^[5]。这个发现使得人们对高功率系统中光学薄膜元件的损伤及预处理技术有了更深的认识。基于此认识,高功率系统中

元件的激光损伤判定从器质性损伤转向了功能性损伤,激光预处理技术从理想的无损预处理转向了有损预处理,这也是近年来提升薄膜元件抗激光损伤阈值方面一个显著的成果^[6-8]。激光预处理技术能够实现去除膜层节瘤缺陷和检验光学薄膜元件损伤阈值水平的双重目的。

膜层应力控制也是至关重要的研究工作。一方面,有效地控制膜层应力才能够满足装置对偏振片全频段的面形精度要求^[9-10];另一方面,若不能有效地控制膜层应力,膜层应力太大会引起膜层龟裂的问题。美国 NIF 装置和法国兆焦耳激光系统(Laser MegaJoule, LMJ)原型装置(LIL)中使用的偏振膜均曾遭遇膜层龟裂的技术问题。2004 年, E. Lavastre 等人^[11]报道了 LIL 装置中使用的偏振片在整个通光口径内约有 10 条宽度小于 $3 \mu\text{m}$ 的裂纹。不过,这些偏振片仍成功通过了原型装置的全口径运行测试。2005 年, J. B. Oliver 等人^[2]在 BK7 基底上成功制备了对角线达 0.9 m 的偏振片。该偏振片具有优良的光谱性能和损伤阈值,并且在干燥环境下具有足够低的薄膜应力。尽管如此,在石英基底上制备在干燥环境中使用的低应力偏振片仍然是一件富有挑战性的工作。

针对我国神光系列装置对偏振膜的性能要求,上海光机所从薄膜设计、制备到后处理等方面开展了大量的研究工作。本文综述了上海光机所在高性能偏振膜方面的研究成果。

2 光谱性能

偏振片要求在足够宽的光谱区域内具有高的 p 偏振分量透射率和高消光比。随着光学薄膜设计软件的迅速发展,通过商业化的膜系设计软件能够设计出满足光谱性能要求的膜系结构。

精确地控制膜层厚度是制备出理想光谱性能偏振片的关键。由于石英晶振控制法对沉积参数(包括沉积速率、沉积真空、晶振片冷却水温等)的

变化非常敏感,一旦某个沉积参数发生变化,控制厚度便会发生偏离,从而造成元件光谱性能的变化。我们提出了一种光控-晶控综合膜厚监控方法^[12]。该方法结合了两种膜厚控制方法的优点,即使在沉积参数稍有变动的情况下,也能精确地控制膜层的厚度,获得理想的光谱性能。此外,我们还提出了一种基于多个控制片的纯光学膜厚控制方法。该方法能够降低膜层厚度的控制误差,获得与理论设计接近的光谱性能^[13]。图 1 所示是小口径偏振片的实测光谱性能曲线(光束入射角度为 56.5°)。

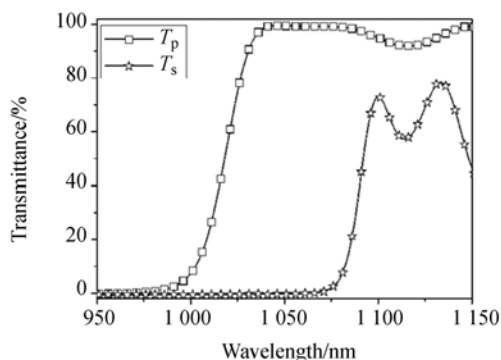


图 1 小口径偏振片的实测光谱性能曲线

Fig. 1 Measured spectra of thin film polarizer

3 损伤阈值

大量研究结果表明,在纳秒级脉宽激光的作用下,光学薄膜元件的损伤阈值受制于基底加工、薄膜制备,以及后续的存储和使用过程中引起的各种类型的缺陷。在高功率激光薄膜制备工艺水平已经发展到一定程度的今天,在影响基频偏振膜(s分量)元件激光损伤阈值的众多因素中,普遍认为节瘤缺陷是薄膜激光损伤的主要诱因。因此,薄膜元件抗激光损伤性能的提高可以从两方面着手:(一)降低膜层中的缺陷密度;(二)提高缺陷点的抗激光损伤阈值。基于对激光损伤起源和损伤机制的理解,我们主要从膜系设计、膜层沉积工艺、后处理等方面开展了 ICF 激光装置用偏振膜元件的研制工作。

3.1 薄膜设计

膜系设计除了要满足光谱性能指标之外,还应充分考虑膜系结构对薄膜抗激光损伤性能的影响。20 世纪 70 年代,上海光机所在国内率先开

展了驻波场效应的相关研究,并将驻波场设计的概念融入到具体的膜系设计中。膜层内部及其不同镀膜材料的界面存在很多“不可见”的纳米吸收性缺陷,当位于高电场处时,这些缺陷容易吸收大量的热,并通过热力耦合产生宏观破坏。因此,驻波场效应是在高损伤阈值偏振膜膜系设计时必须考虑的问题。

由于氧化硅(SiO_2)层与氧化铪(HfO_2)层的界面(HfO_2 层作为基底层)存在比 HfO_2 层与 SiO_2 层界面(SiO_2 层作为基底层)更多的“不可见”的纳米吸收性缺陷,而 SiO_2 材料具有比高折射率材料更高的激光损伤阈值,因此,通过驻波场设计将电场峰值移动到 SiO_2 材料中,降低 SiO_2 层与 HfO_2 层的界面电场,能够提高膜层的抗激光损伤性能。针对偏振膜开展的研究结果表明:偏振膜中电场峰值越低、峰值电场所处的位置距离空气越远,损伤阈值越高^[13]。此外,我们还着重研究了内保护层和外保护层在提升激光薄膜损伤能力中的作用,通过引入内、外保护层能够增强膜层与基底的结合力和膜层的力学强度,显著提升基频偏振膜的抗激光损伤阈值。目前,上海光机所已形成了一套完整的高性能激光薄膜综合设计方法。

3.2 薄膜沉积工艺

21 世纪初期,上海光机所开始采用 HfO_2 作为初始镀膜材料。自此, $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 多层膜开始在国内神光系列装置中展露头角。在近十年的研究历程中,我们一直致力于研究初始镀膜材料为 HfO_2 的薄膜制备工艺,包括材料的预熔工艺、薄膜沉积工艺等。

膜层沉积过程中膜料的喷溅是膜层中节瘤缺陷种子的主要来源之一。产生膜料喷溅最重要的原因之一是蒸发过程中膜料的放气。膜料制备过程中总会存在不同程度的掺气,当其受热时就会膨胀而释放,并产生微小颗粒的喷溅。镀膜前对材料进行充分的预熔,是减少因放气而产生喷溅的最有效方法。图 2 所示是我们采用不同预熔工艺预熔的 HfO_2 材料制备的多层膜的激光损伤阈值,通过优化镀膜前的 HfO_2 材料预熔工艺能够大幅度抑制 HfO_2 在镀膜过程中产生的喷溅,从而提升多层膜的抗激光损伤能力。

尽管膜层中的缺陷密度已经很低,个别存在的节瘤仍然是制约基频反射膜功能性损伤阈值的

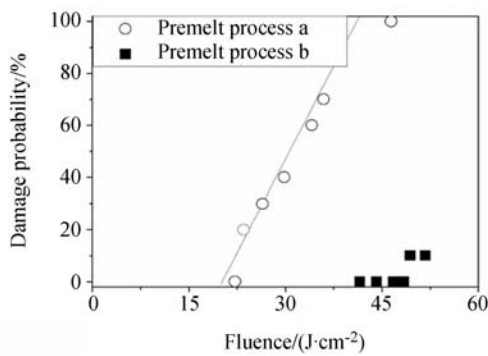


图 2 两种不同工艺预熔的 HfO₂ 膜料制备的多层膜的激光损伤阈值

Fig. 2 Damage threshold of multilayer dielectric coatings by two different HfO₂ premelt processes

主要因素之一。从缺陷的分析结果来看,以 HfO₂ 和 SiO₂ 为初始材料制备的反射膜样品中的节瘤缺陷种子大多起源于膜层中,即多为非基底种子节瘤缺陷。为了进一步降低起源于膜层中的节瘤缺陷,我们从 2010 年开始研究以金属 Hf 取代 HfO₂ 作为初始镀膜材料的镀膜工艺。以金属 Hf 作为初始镀膜材料有以下优点:首先,金属 Hf 比 HfO₂ 具有更高的热导率,利用金属 Hf 作为初始材料能够获得密度更高的块状材料,降低了块状材料中存在空穴的几率,切断了导致材料喷溅的源头。其次,与 HfO₂ 不同,金属 Hf 不存在单斜晶相到四方晶相的相变过程,不像 HfO₂ 材料一样会产生体积膨胀,从而降低了压力,减少了可能出现的颗粒喷溅源头。最后,在金属 Hf 材料与水冷坩埚直接接触的边缘部分和电子束接触的熔融表面之间没有温度诱导的相变。此外,采用金属 Hf 作为初始镀膜材料能够获得均匀的材料蒸发分布。

在金属 Hf 的工艺研究方面,成效较为突出的工艺改进是金属 Hf 电子束扫描轨迹的优化。随着膜料的蒸发,坩埚边缘也会沉积一些膜料。由于金属 Hf 具有较高的热导率,蒸发材料表面的电子束焦斑离水冷坩埚边缘的距离不同,在坩埚边缘附近产生的温度也会有很大差异。如果焦斑距离坩埚边缘很近,产生的温度就足够使得沉积在坩埚边缘的材料再次蒸发,从而在膜层中引起节瘤缺陷。采用光学显微镜对膜层中的节瘤缺陷密度进行检测,结果如图 3 所示。通过优化电

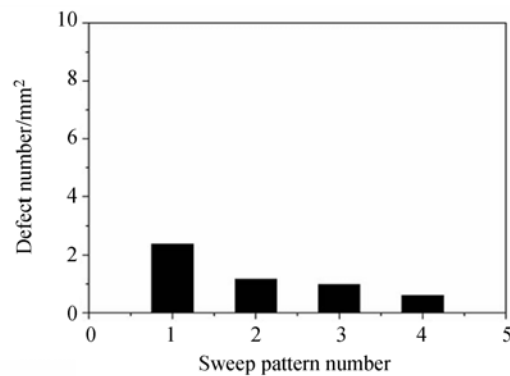


图 3 金属钪电子束扫描轨迹对样品节瘤缺陷密度的影响

Fig. 3 Influence of Hf electron beam scanning track on defect density of samples

子束扫描轨迹,可将厚度为 4 μm 的多层膜中的节瘤缺陷密度从 2.4 个/mm² 降低到 0.6 个/mm²,进而大幅提升了薄膜的激光损伤阈值,如图 4 所示。

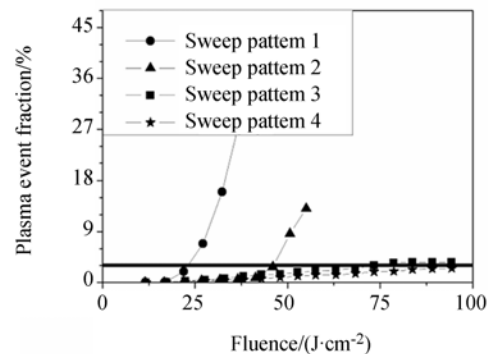


图 4 金属钪电子束扫描轨迹对样品激光损伤阈值的影响

Fig. 4 Influence of Hf electron beam scanning track on laser induced damage threshold of samples

3.3 后处理

尽管研究人员对薄膜沉积前和薄膜沉积中可能引起膜层缺陷的因素进行了大量的研究与分析,并采取了一系列措施有效地抑制了膜层缺陷的产生,然而迄今为止,仍未能完全抑制薄膜中的缺陷。针对这一问题,研究人员提出薄膜后处理技术,以降低膜层微缺陷,或者在一定激光通量下稳定膜层的微缺陷,从而达到提高薄膜激光损伤阈值的目的。上海光机所建立了国内首套面向工程应用的大口径光学元件激光预处理平台;此外,还提出了一种基于离子的后处理技术,研究了该

技术对薄膜微缺陷和激光损伤阈值的影响。

3.3.1 激光预处理

图 5 是上海光机所研制的国内首套大口径光学元件激光预处理平台,我们借助该平台在国内率先开展了激光预处理方面的研究工作。元件实际使用的过程中,一定尺度范围内的稳定损伤点并不会显著影响光束质量,也不会调制光束引起后续的元件损伤,因此部分损伤点的存在并不会对元件的使用性能造成原则性的影响。激光预处理允许部分损伤点的存在,但损伤对元件性能带来的负面影响必须控制在系统正常运行容忍的范围内,即不产生功能性损伤的范围内。



图 5 上海光机所研制的国内首套大口径光学元件激光预处理平台

Fig. 5 The first set of large-aperture optical component laser conditioning platform produced by SIOM

节瘤缺陷会诱导出带有小坑的等离子体烧蚀。通过激光预处理,逐步拾升辐照节瘤缺陷的能量,能够有效去除节瘤缺陷,使膜层承受更高的激光能量。相比于以 50.6 J/cm^2 ($1\ 064 \text{ nm}$, 5 ns , 通量) 直接辐照的样品,多台阶激光预处理到 50.6 J/cm^2 ($1\ 064 \text{ nm}$, 5 ns , 通量) 后样品的等离子体烧蚀损伤的数量和尺寸明显减少,如图 6 所示。功能性损伤对等离子体烧蚀占比提出了一定的限制,通过激光预处理可以降低等离子体烧蚀占比,提升薄膜元件的功能性损伤阈值。等离子体烧蚀是由节瘤缺陷喷射造成的。研究结果表明,烧蚀占比与激光辐照台阶的选取密切相关,激光辐照的能量密度越大,所形成的烧蚀区域尺寸也就越大,因此要去除节瘤缺陷的同时尽量减小烧蚀区域,预处理的能量密度应稍大于节瘤缺陷的损伤阈值。基于这个原则,利用密集拾升的能量

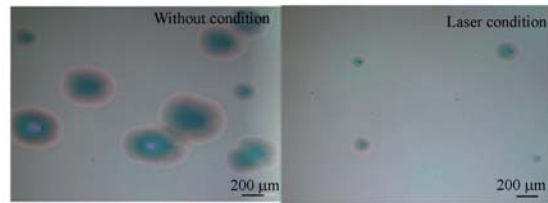


图 6 处理样品和非预处理样品表面的损伤情况

Fig. 6 Damage morphologies of sample before and after laser conditioning

辐照样品,使各个节瘤缺陷在其阈值附近喷射,可将烧蚀点数和烧蚀尺寸控制在最小的范围内,达到最佳的预处理效果。对于小光斑扫描激光预处理而言,处理时间也是需要考虑的一个问题。处理时间过长,不仅导致元件成本上升,还会给预处理系统的稳定运行带来压力。

台阶的选择应该照顾到尽可能多的缺陷,使得缺陷密度较大的那类缺陷在其阈值附近喷射,忽略那些去除缺陷较少的能量台阶,尤其是去除缺陷较少的低能台阶。这样就可以使少台阶与多台阶辐照获得近似的预处理效果,甚至获得与能量密集拾升近似的预处理效果。激光预处理的最后一个能量台阶是确定的,一般选取稍高于工程要求的能量台阶,一方面可以去除阈值不高于此能量的缺陷,另一方面可以检测样品是否满足工程要求的能量密度指标。基于上述台阶原则确定的激光预处理工艺,不但能够去除节瘤缺陷,减小烧蚀损伤的数目和尺寸,还能够达到检验元件的抗激光损伤性能的目的。

3.3.2 离子后处理

与激光预处理技术类似,离子束后处理的功效也在于有效降低薄膜中的微缺陷密度,提高薄膜的抗激光损伤能力。离子后处理利用粒子的碰撞作用和等离子体与薄膜的化学作用来去除膜层中的微缺陷。与激光预处理相比,离子束后处理具有两大优势:(一)可以在镀膜后利用真空室内的离子源直接对薄膜元件进行离子束后处理,使用更为方便;(二)离子束发射角较宽,利用一个或多个离子源可以覆盖整个大口径薄膜元件,耗时很短。研究结果表明,离子后处理能够降低薄膜表面的显微和亚显微缺陷密度,从而降低膜层吸收,进而显著提高薄膜的激光损伤阈值^[14-15],如图 7 所示。此外,作为能量离子的轰击使薄膜表面产生再构以及氧等离子体的强氧化性共同作用的

结果,离子后处理还能够改良介质激光薄膜的其他性质,例如降低膜层的表面粗糙度和内应力等。

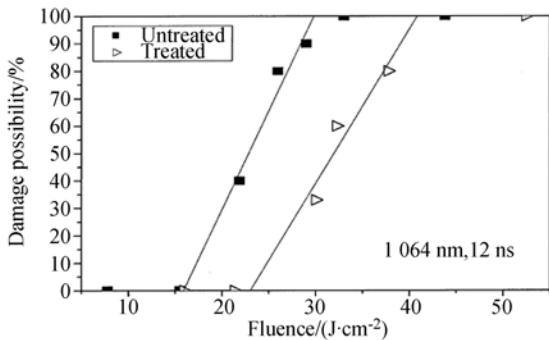


图 7 离子束后处理前后样品损伤阈值的对比

Fig. 7 Damage thresholds of sample before and after ion treatment

结合上述研究研制的偏振膜在 2012 年和 2013 年 SPIE 激光损伤国际会议 (SPIE Laser Damage) 组织的全球性偏振膜激光损伤阈值水平竞赛中连续取得 p 分量损伤阈值和平均损伤阈值最佳的结果。SPIE 激光损伤国际会议至今已有近 50 年的历史,代表着光学材料激光损伤研究领域的国际最高水平。竞赛共有来自中国、美国、德国、瑞士、英国、日本 6 个国家的 17 家单位参赛,包括美国桑迪亚国家实验室、德国汉诺威激光中心、CVI MellesGriot、肖特公司、长春光机所、同济大学、欧唐科技公司和四川科奥达技术有限公司等多家国内外研究机构或公司。

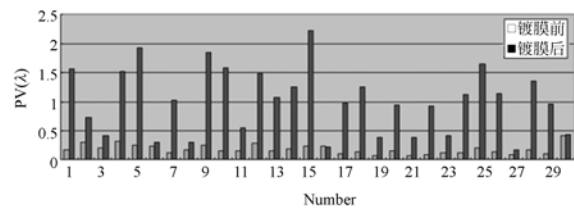
4 面形精度

薄膜元件面形的稳定控制是一项系统工程,取决于基片面形及其稳定性、单层膜的应力控制、多层膜的应力耦合,以及后续测量和存储环境等诸多因素。我们从基片应力稳定性、单层膜应力控制技术以及多层膜应力耦合分析等几个方面进行研究,实现了偏振膜面形的稳定控制。

4.1 基底应力控制技术

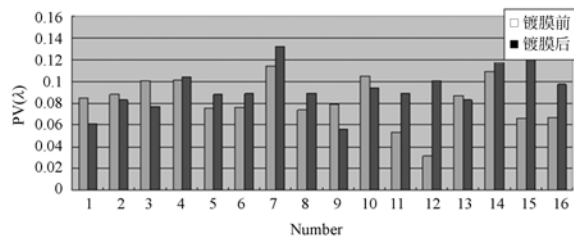
基板应力稳定是薄膜元件应力稳定的前提条件,在基板应力不稳定的情况下,无论如何控制薄膜制备工艺,都无法控制薄膜元件的面形变化。针对这一问题,上海光机所提出了一种基于热循环处理的基底面形稳定性的检验方法,通过热循环处理技术对基片进行筛选。通过模拟实际镀膜过程对基板应力稳定性进行检验,实现了对薄膜

元件面形 PV 和 Power 变化量的稳定控制,结果如图 8 所示。



(a)热循环处理前

(a) Before heat recycling treatment



(b)热循环处理后

(b) After heat recycling treatment

图 8 热循环处理前后 120 mm×88 mm 元件面形 PV 的变化情况

Fig. 8 PV values of 120 mm×88 mm component before and after heat recycling treatment

4.2 单层膜应力控制技术

在薄膜材料和基底材料确定的情况下,沉积参数和处理过程是影响薄膜应力状态的重要因素。对于电子束沉积的薄膜,其应力在很大程度上取决于沉积真空、沉积速率和基底温度等沉积参数。

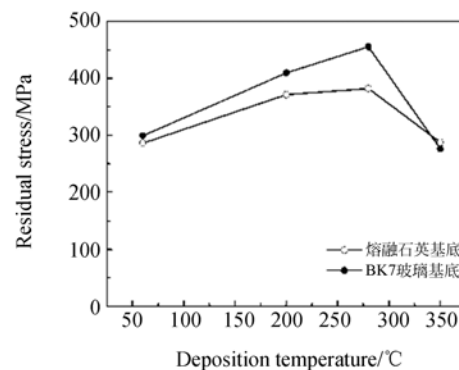
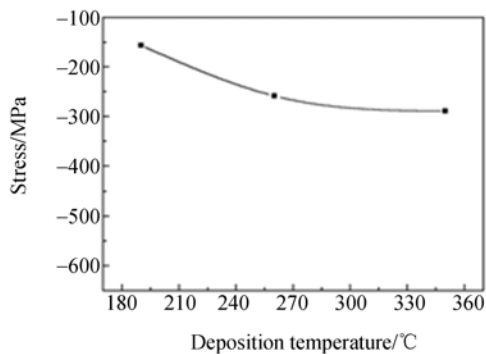


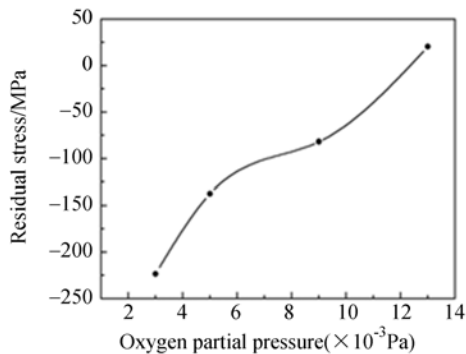
图 9 HfO₂ 单层膜应力随沉积温度的变化

Fig. 9 Variation of HfO₂ film stress with deposition temperature

如图 9 所示,在沉积真空为 1.0×10^{-2} Pa 的条件下,沉积在 BK7 和石英基底上的厚度约为 530 nm 的 HfO_2 单层膜均呈现张应力,且当基底温度低于 280 °C 时,应力随着基底温度的升高而单调增加。当基底温度进一步升高到 350 °C 时,膜层应力下降,其原因在于:在较低的基底温度下, HfO_2 薄膜呈现非晶态,而当温度升高到 350 °C 时, HfO_2 薄膜呈现出单斜晶态,薄膜结晶使得膜层应力有所下降。沉积在石英基底上的薄膜其应力的发展趋势与 BK7 玻璃基底基本一致,但应力值相对较低。



(a) $p = 4.0 \times 10^{-3}$ Pa



(b) $t = 400$ °C

图 10 SiO_2 单层膜应力随基底温度和氧分压的变化关系

Fig. 10 Variations of SiO_2 film stress with substrate temperature and oxygen partial pressure respectively

与 HfO_2 单层膜不同,当 SiO_2 的沉积真空度为 4.0×10^{-3} Pa 时,随着基底温度从 190 °C 升高到 350 °C, SiO_2 单层膜呈现出越来越大的压应力,如图 10(a) 所示。当基底温度为 400 °C 时,随着沉积真空度从 3.0×10^{-3} Pa 变化到 13.0×10^{-3} Pa,膜层应力由压应力变为张应力,如图 10(b) 所示。

上述结果表明, HfO_2 和 SiO_2 单层膜的应力与沉积参数有极大的依赖关系,通过调节这些沉积参数能够改变多层膜的应力。

4.3 多层膜应力耦合分析与控制技术

多层膜的应力除了涉及到多种薄膜材料的热物参数的组合之外,还涉及多个界面的力学匹配问题,其物理过程比单层膜更复杂。根据 HfO_2 和 SiO_2 单层膜的应力特性,结合膜系设计优化膜层厚度,进行多层膜的应力匹配设计,解决了大口径偏振膜膜层龟裂的技术问题,实现了国内大口径偏振膜片从无到有的突破。镀膜后大口径偏振片的波面 PV 值优于 0.7λ ,有力支撑了我国神光 II-UP 装置的稳定运行。

5 总结与展望

光谱性能、损伤阈值与面形精度三个方面的性能提升始终是高功率激光薄膜不断发展的主要方向。经过多年的研究积累,上海光机所在高性能偏振膜研制方面取得了长足的进展。遵循系统工程解决薄膜问题的思路,强化基础研究,取得了一批与工艺紧密结合的基础研究结论,并及时集成转化这些基础研究成果,成功解决了大口径偏振膜在光谱性能、损伤阈值和应力控制方面的技术问题。研制的偏振膜元件在全球性激光损伤竞赛中取得最佳结果,实现了国内大口径偏振片从无到有的突破。研制的大口径偏振片满足 $T_p > 98\%$, $R_s > 99\%$ 的光谱性能要求和 17 J/cm^2 (9 ns) 的通量运行要求,为我国神光 II (SGII-UP) 大型激光装置的稳定运行提供了保障。

参考文献:

[1] STOLZ C J. Brewster's angle thin film plate polarizer design study from an electric field perspective[C]. *Optical Systems Design and Production, International*

Society for Optics and Photonics, 1999: 347-353.

[2] OLIVER J B, RIGATTI A L, HOWE J D, *et al.*. Thin-film polarizers for the OMEGA EP laser system[C]. *Boulder Damage Symposium XXXVII: Annual Symposium on Optical Materials for High*

- Power Lasers, International Society for Optics and Photonics*, 2005; 599119-599119-8.
- [3] DEFORD J F, KOZLOWSKI M R. Modeling of electric-field enhancement at nodular defects in dielectric mirror coatings[C]. *Optical Materials for High Power Lasers, International Society for Optics and Photonics*, 1993; 455-472.
- [4] GENIN F Y, STOLZ C J, REITTER T A, *et al.*. Effect of electric field distribution on the morphologies of laser-induced damage in hafnia-silica multilayer polarizers[C]. *Laser-Induced Damage in Optical Materials*; 1996, *International Society for Optics and Photonics*, 1997; 342-352.
- [5] SHEEHAN L M, KOZLOWSKI M R, RAINER F, *et al.*. Large-area conditioning of optics for high-power laser systems[C]. *Laser-Induced Damage in Optical Materials*; 1993. *International Society for Optics and Photonics*, 1994; 559-568.
- [6] BERCEGOL H. What is laser conditioning? A review focused on dielectric multilayers[J]. *SPIE*, 1999, 3578;421-426.
- [7] WOLFE C R, KOZLOWSKI M R, CAMPBELL J H, *et al.*. Laser conditioning of optical thin films [J]. *SPIE*,1990;1-3.
- [8] CAMPBELL J H, HAWLEY-FEDDER R A, STOLZ C J, *et al.*. NIF optical materials and fabrication technologies: an overview[C]. *Lasers and Applications in Science and Engineering, International Society for Optics and Photonics*, 2004; 84-101.
- [9] LAWSON J K, AIKENS D M, ENGLISH Jr R E, *et al.*. Surface figure and roughness tolerances for NIF optics and the interpretation of the gradient, PV wavefront, and RMS specifications[J]. *SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics*, 1999; 510-517.
- [10] LAWSON J K, AIKENS D M, ENGLISH Jr R E, *et al.*. Power spectral density specifications for high-power laser systems[C]. *Optical Instrumentation & Systems Design, International Society for Optics and Photonics*, 1996; 345-356.
- [11] LAVASTRE E, NÉAUPORT J, DUCHESNE J, *et al.*. Polarizers coatings for the Laser MegaJoule prototype [C]. *Optical Interference Coatings, Optical Society of America*, 2004; TuF3.
- [12] ZHU M, YI K, ZHANG W, *et al.*. Preparation of high performance thin-film polarizers[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(6): 624-626.
- [13] ZHU M, YI K, FAN Z, *et al.*. Theoretical and experimental research on spectral performance and laser induced damage of Brewster's thin film polarizers[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(15): 6884-6888.
- [14] ZHANG D, SHAO J, ZHANG D, *et al.*. Employing oxygen-plasma posttreatment to improve the laser-induced damage threshold of ZrO₂ films prepared by the electron-beam evaporation method [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(24): 2870-2872.
- [15] ZHANG D, WANG C, FAN P, *et al.*. Influence of plasma treatment on laser-induced damage characters of HfO₂ thin films at 355 nm[J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 8246-8252.

作者简介:



朱美萍(1982—),女,博士,硕士生导师,主要从事高功率激光薄膜的研究工作。E-mail:bree@siom.ac.cn