

惯性约束聚变激光驱动装置用大尺寸 偏振薄膜研究综述

邵建达^{**}, 朱美萍^{*}, 李静平, 孙建, 赵元安, 易葵

中国科学院上海光学精密机械研究所薄膜光学实验室, 上海 201800

摘要 从光谱性能、激光损伤阈值和膜层应力等方面综述了激光偏振薄膜的研究进展。简述了中国科学院上海光学精密机械研究所针对我国惯性约束聚变激光驱动装置对大尺寸偏振薄膜的要求,在镀膜材料选择、膜系设计、薄膜制备等方面的研究进展。所研制的大尺寸偏振薄膜已成功应用于我国神光系列高功率激光、超强超短激光等大型激光装置。

关键词 薄膜; 偏振薄膜; 高功率激光; 光谱性能; 激光损伤阈值; 膜层应力

中图分类号 O484.1; O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1000001

Research Progress on Large Size Polarizer Coating for Inertial Confinement Fusion Laser Application

Shao Jianda^{**}, Zhu Meiping^{*}, Li Jingping, Sun Jian, Zhao Yuan'an, Yi Kui

Laboratory of Thin Film Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract This paper reviews the research progress of polarizer coating for laser application, mainly related to the study on spectral performance, laser induced damage threshold, and coating stress. The work done by researchers at Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences to achieve the requirements of large size polarizer coating for Inertial Confinement Fusion (ICF) laser application is introduced. The research progress on coating material design, coating design, and coating preparation are also introduced. Large size polarizer coating has been developed and successfully applied to large-scale laser facilities, including SG series high-power laser and ultra-short laser devices.

Key words thin films; polarizer coating; high power laser; spectral performance; laser induced damage threshold; coating stress

OCIS codes 310.5448; 140.3330

1 引 言

激光偏振薄膜通常用作光开关或隔离元件,在我国神光(SG)装置、美国国家点火装置(NIF)^[1]、法国兆焦耳装置(LMJ)^[2]等惯性约束聚变(ICF)领域的大型高功率激光装置中起着至关重要的作用,其性能甚至影响整个激光装置的构型^[1]。应用于高功率激光系统的偏振薄膜需具备优异的光谱性能、高的激光损伤阈值(LIDT)和低的膜层应力。偏振薄膜需要在足够宽的光谱区域内同时具备高的 p 偏振光透射率和高的消光比^[1-3]。为了满足这一光谱性

能要求,偏振薄膜通常包含 30 层以上的高、低折射率交替的膜层,膜层总厚度不少于 4 μm 。为了满足综合性能要求,有的偏振薄膜厚度甚至达到 8 μm 以上。与一般的反射薄膜相比,偏振薄膜由于膜层较厚,激光损伤阈值总体偏低,尤其是 p 偏振光的激光损伤阈值较低。由于 p 偏振光具有较高的透射率,因此整个膜层及基底的缺陷都会影响 p 偏振光的激光损伤阈值。较厚的膜层还增加了应力的控制难度,膜层应力引起的膜层龟裂问题是偏振薄膜研究中曾面临的主要技术难题之一^[4-5]。正是由于尺寸大(对角线接近 1 m),膜层厚度、均匀性控制要求

收稿日期: 2019-05-13; **修回日期:** 2019-06-04; **录用日期:** 2019-06-10

基金项目: 国家“万人计划”青年拔尖人才计划、上海市青年拔尖人才计划、中国科学院青年创新促进会资助项目

* **E-mail:** bree@siom.ac.cn; ** **E-mail:** jdshao@siom.ac.cn

和激光损伤阈值要求高,偏振薄膜被认为是激光聚变装置中研制难度最高的薄膜元件^[6]。

2 国内外研究历程

激光偏振薄膜的研究始于 20 世纪 70 年代。1971 年, Buchman 等^[7]基于光倾斜入射到多层膜时 p 偏振光和 s 偏振光反射性能之间的差异,利用 CeO_2 与 MgF_2 开展了偏振薄膜的设计、制备及光谱性能研究,在玻璃基底上获得了 p 偏振光透射率为 96%、s 偏振光透射率为 3% 的偏振薄膜(入射角 60° , 波长 1064 nm)。1975 年, Thomas 等^[8]研究了 KMS 聚变钷玻璃激光系统所用的偏振薄膜的光谱均匀性和光谱时效性,发现偏振薄膜对均匀性的要求高于反射薄膜,并且在放置一段时间后会出光谱红移现象。

20 世纪七八十年代,偏振薄膜的激光损伤阈值远低于反射薄膜,甚至低于减反射薄膜。1994 年, Rainer 等^[9]回顾了美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)过去 15 年针对偏振薄膜开展的研究工作:1978—1989 年,受制于研究经费、偏振薄膜的复杂性,以及偏振薄膜位于激光装置的低能量端等综合因素,LLNL 针对偏振薄膜激光损伤开展的实验研究较少;自 1989 年起,LLNL 开始重点关注电子束沉积 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 偏振薄膜的光谱性能和激光损伤阈值,以应对 ICF 激光驱动装置输出通量不断提升的压力;20 世纪 90 年代中期,LLNL 为了建设 NIF 原型装置 Beamlet,联合光谱物理公司(Spectra-Physics)和罗彻斯特大学的 LLE(Laboratory for Laser Energetics)实验室开展大尺寸偏振薄膜的研究工作。1996 年, Genin 等^[10]发现偏振薄膜在波长为 1064 nm、脉宽为 3 ns 激光辐照下有 4 种典型的损伤形貌,包括节瘤缺陷、平底坑、等离子体烧蚀和分层剥落,其中,分层剥落的损伤最为严重。Stolz 等^[11]研究发现,通过增加 SiO_2 外保护层的厚度,能够在一定程度上抑制分层剥落的损伤形貌。1999 年, Stolz 等^[1]研究了偏振薄膜的膜系设计对偏振薄膜性能的影响,通过优化膜层电场强度分布的方法提高偏振薄膜的激光损伤阈值,但代价是带宽和消光比等光谱性能的折衷。这一时期,“节瘤缺陷是诱导偏振薄膜激光损伤的重要源头”的发现直接促成了偏振薄膜激光损伤阈值提升方面的两大成果:使用金属钪代替氧化钪作为初始镀膜材料以及激光预处理技术。2016 年, Baisden 等^[12]对这两项技术进行了总结。利用金属钪作为

初始材料,一方面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概率;另一方面,避免了氧化钪材料在从单斜晶相到四方晶相的相变过程中产生的压力,进而大幅降低了膜层中的节瘤缺陷密度^[13-14]。激光预处理技术的采用实现了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,将抗激光损伤能力提升了 2~3 倍^[15-16]。

膜层应力控制是偏振薄膜面临的又一大技术难题。膜层应力会引起光学元件在镀膜前后波面质量发生变化,严重时甚至会引发膜层龟裂。2004 年, Lavastre 等^[4]报道了 LIL 装置中使用的偏振薄膜元件在整个通光口径内有 10 条左右宽度小于 $3\ \mu\text{m}$ 的裂纹。2012 年, Oliver 等^[5]利用 Al_2O_3 膜层补偿 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 膜层应力,提供了一种解决膜层龟裂问题的技术途径。

国内于 20 世纪 70 年代初期开始开展偏振薄膜应用性研究,其间,研究单位主要有中国科学院上海光学精密机械研究所(上海光机所)、浙江大学、西南技术物理研究所和华北光电技术研究所等。近年来,在我国 SG 系列装置需求的牵引下,上海光机所、成都精密光学工程研究中心、同济大学等机构,围绕高功率激光薄膜的研制开展了深入研究,并取得了重要进展。

上海光机所早在 1975 年就开始采用 ZrO_2 和 SiO_2 两种镀膜材料研制偏振薄膜,并很快将其应用于高功率激光系统,淘汰了玻璃堆,并部分取代了晶体,但当时的偏振薄膜性能稳定性较差。随后,上海光机所采用 TiO_2 和 SiO_2 开展了偏振薄膜的研制,在 1981 年研制出在 (1064 ± 10) nm 波长范围内 p 偏振光透射率大于 95%、s 偏振光透射率小于 1% 的偏振薄膜,并将其应用于 SG 装置。20 世纪 80 年代至今,我国 SG 系列装置的光束口径和输出能量不断提升,这就要求偏振薄膜的尺寸越来越大(对角线接近 1 m),从而对光谱、激光损伤阈值和波面质量等性能的要求也越来越高。针对 SG 系列装置对偏振薄膜的性能要求,上海光机所从镀膜材料、薄膜设计、膜层厚度和均匀性控制、激光损伤阈值及膜层应力等方面开展了大量的研究。以下简述上海光机所在激光偏振薄膜方面的研究进展。

3 研究进展

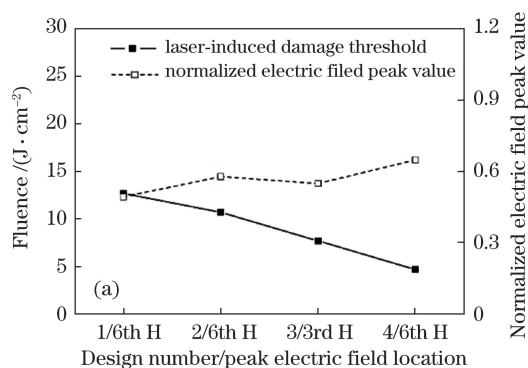
3.1 镀膜材料

偏振薄膜的消光比、带宽和激光损伤阈值与镀膜材料密切相关。高、低折射率两种镀膜材料折射率的差值越大,偏振薄膜的消光比和设计带宽就越

大,但高的激光损伤阈值要求限制了镀膜材料的可选性。在镀膜材料的选择方面,超低损耗的 SiO_2 几乎是不可替代的低折射率材料,而高折射率材料方面则经历了从 TiO_2 、 Ta_2O_5 向 ZrO_2 、 HfO_2 转化的变革。与 TiO_2 、 Ta_2O_5 或 ZrO_2 与 SiO_2 的组合相比,尽管 HfO_2 和 SiO_2 制备的偏振薄膜带宽更窄,但得益于其出色的抗激光损伤能力, HfO_2 和 SiO_2 已成为制备 1064 nm 高功率激光偏振薄膜最常用的镀膜材料。 HfO_2 和 SiO_2 偏振薄膜的激光损伤阈值优势,在 2012 年由 SPIE 激光损伤国际会议 (SPIE Laser Damage) 组织的 1064 nm 偏振薄膜激光损伤阈值国际竞赛中也得到了充分体现^[17]。

3.2 综合膜系设计

偏振薄膜的消光比与激光损伤阈值、膜层应力相互制约。增加膜层厚度可以获得高消光比,但易



产生缺陷密度大、激光损伤阈值低和膜层龟裂的问题。因此,膜系设计除了要满足光谱性能要求之外,还应充分考虑膜系结构对薄膜激光损伤阈值和膜层应力的影响。

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具体的膜系设计中。通过驻波场设计将电场峰值移动到 SiO_2 材料中,降低 HfO_2 层与 SiO_2 层的界面电场,提高多层膜的激光损伤阈值。通过设计和实验验证了不同膜系设计的厚度容差、电场分布等对激光偏振薄膜性能的影响。结果表明,大容差设计可以获得更为理想的光谱性能,且膜层中电场峰值越低、峰值电场所处的位置越远离空气,激光损伤阈值越高(图 1)^[18]。目前,上海光机所已形成了一套完整的激光偏振薄膜综合设计方法。

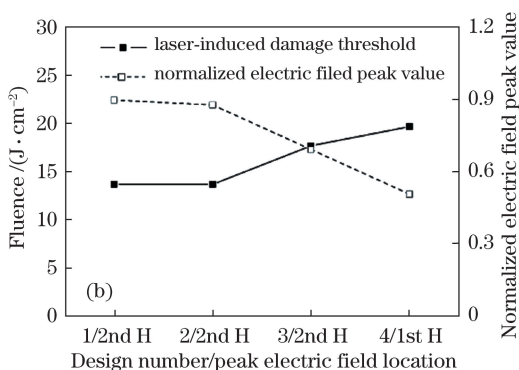


图 1 氧化铪膜层中归一化峰值电场强度和峰值电场所处的膜层数对激光损伤阈值的影响。(a)p 偏振光;(b)s 偏振光

Fig. 1 Influences of normalized electric field peak value and peak electric field location of HfO_2 layer on LIDT.

(a) p polarized light; (b) s polarized light

3.3 膜层厚度及均匀性控制

精确控制膜层厚度是获得优良光谱性能的关键。光学监控法和石英晶体振荡法是最常用的两种膜层厚度监控方法。光学监控法具有厚度误差自动补偿的优点,但传统光电极值法的厚度监控误差大,无法满足偏振薄膜对厚度监控精度的要求。石英晶体振荡法具有较高的监控精度,但易受沉积温度、沉积速率、真空度等工艺参数的影响,存在稳定性差的问题。为了实现高稳定性和高精度的厚度监控,采用多个光学监控片,以膜层厚度误差作为评价函数,通过优化膜层拆分和光学监控片的监控顺序,将膜厚控制精度提升一个量级,满足了光谱性能要求所需的监控精度和稳定性(图 2)^[19]。

针对米级尺寸内厚度的均匀性控制问题,通过对薄膜沉积物理过程简化、平面行星夹具运动特性和材料蒸发特性的研究,建立了平面行星夹具的薄膜厚度分布的无量纲模型。采用停留概率修正法,

实现了高、低折射率材料的均匀性修正,稳定地获得 p 偏振光透射率大于 98%、s 偏振光反射率大于 99%、膜厚均匀性达 99.6% 的米级尺寸偏振薄膜。

3.4 激光损伤阈值

缺陷是诱导薄膜激光损伤的根源。与反射薄膜相比,偏振薄膜的缺陷控制难度更大。一方面,偏振薄膜的 p 偏振光为高透射,基底和膜层中各种类型的缺陷均可能诱导激光损伤;另一方面,偏振薄膜膜层总厚度为一般反射薄膜膜层厚度的两倍,极大地增大了缺陷产生的概率。为了降低缺陷密度,主要从基底清洗和薄膜沉积等方面进行研究。

基底作为薄膜的载体,其(亚)表面的杂质颗粒、划痕等均可能成为薄膜的缺陷源。因此,基底清洗对激光薄膜制备而言至关重要。结合真空室外的超声清洗和真空室内的离子束清洗,有效去除了基底表面的杂质颗粒。针对划痕等结构性缺陷,采用飞秒激光在基底“预植”缺陷,定量研究了基底的结构

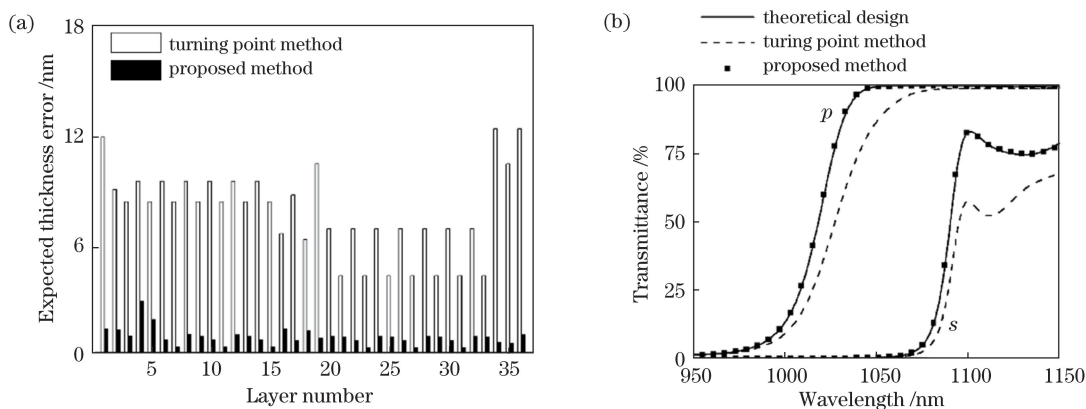


图 2 (a)光电极值法和本文中光学监控法的理论厚度误差;(b)理论设计的光谱和不同监控方法制备的实验光谱曲线(布儒斯特角入射)

Fig. 2 (a) Expected thickness errors of photoelectric extremum method and the proposed method; (b) theoretical spectrum and experimental spectra of different monitoring methods (Brewster angle incidence)

性缺陷尺寸和膜层激光损伤阈值的关系。结果表明,结构性缺陷对薄膜激光损伤阈值的影响存在尺寸效应,当缺陷尺寸达到临界值时,薄膜激光损伤阈值会大幅降低^[20-21]。针对大尺寸基底无法实现零结构性缺陷加工的问题,提出基底缺陷“缝合”修复技术,通过在基底和膜层间引入缝合层,避免了薄膜对基底结构性缺陷的复形,降低了缺陷区域的电场强度,缝合后的激光损伤阈值接近无结构性缺陷膜层的水平(图 3)^[22]。

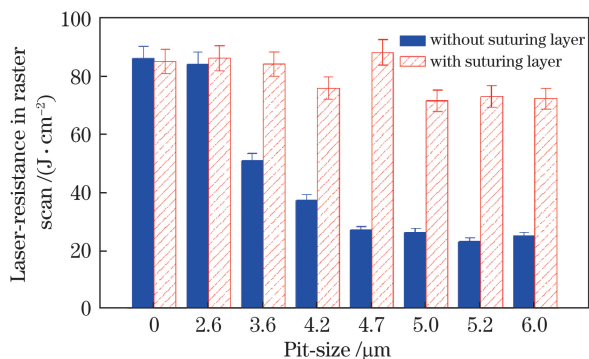


图 3 缺陷缝合前后的激光损伤阈值

Fig. 3 LIDT without and with suturing layer

针对膜层中的节瘤缺陷,一方面,采用金属铪取代氧化铪作为初始镀膜材料,并通过优化蒸发金属铪时的电子束扫描轨迹,显著降低了节瘤缺陷密度;另一方面,通过激光预处理技术和离子后处理技术进一步降低膜层的微缺陷密度,提高了激光损伤阈值^[23]。

针对膜层界面孔隙多、结合力差、易出现分层剥落损伤的问题,创新发展了大尺寸多层膜渐变界面沉积技术,从而有效抑制了分层剥落的激光损伤形貌,提升了激光损伤阈值(图 4)^[24-25]。

通过上述研究工作,上海光机所研制的大尺寸

偏振薄膜元件的激光损伤阈值满足了当前高功率激光驱动装置要求的 14 J/cm^2 (波长 1053 nm , 脉宽 5 ns) 的技术指标要求。研制的激光偏振薄膜在 2012 年^[18] 的激光损伤阈值国际竞赛中取得最佳结果,偏振薄膜参赛样品的激光损伤阈值为 29.8 J/cm^2 (波长 1064 nm , 脉宽 10 ns , p 偏振光)。该国际竞赛由 LLNL 和已有 50 年历史的 SPIE Laser Damage 于 2008 年共同发起,每年组织一次,代表着光学材料激光损伤研究领域的国际最高水平,参赛单位囊括了激光薄膜领域的国内外知名研究机构和公司^[26]。

3.5 膜层应力

膜层应力会导致光学元件镀膜前后的波面质量发生改变,严重时甚至会导致膜层龟裂。因此,测试并优化多层膜的应力演变是解决膜层龟裂问题的关键。对于电子束沉积薄膜,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。通过自主搭建基于双光束偏转的应力在线检测装置,研究分析了薄膜在沉积过程和应力释放过程的应力演化过程。在线应力测试结果表明,偏振薄膜在沉积过程中大多呈张应力状态,随着膜层厚度增加,张应力逐渐增大。在张应力作用下,薄膜沿膜面有收缩趋势。在一定厚度下,当膜层张应力超过薄膜结构破坏的临界值时,膜层便会发生龟裂。图 5 所示为偏振薄膜龟裂的表面形貌图。

针对膜层龟裂问题,通过综合采用离子束辅助和电子束沉积技术,结合膜系设计优化偏振薄膜的应力匹配设计,解决了大尺寸偏振薄膜膜层龟裂的技术难题。镀膜后的大尺寸偏振薄膜元件的反射波面峰谷值(PV)优于 0.7λ ,透射波面 PV 优于 $\lambda/3$,为我国 SG 系列激光装置的稳定运行提供了保障。图 6

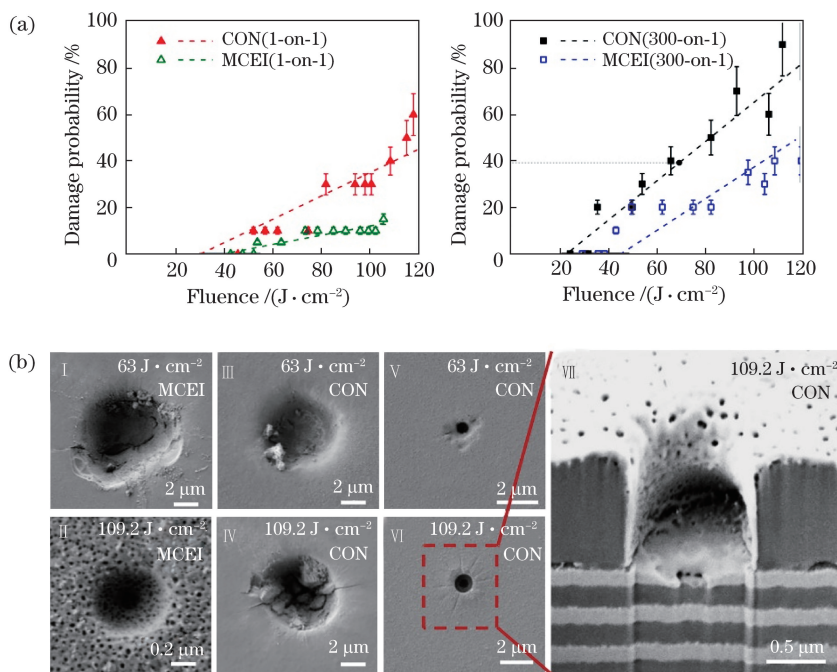


图 4 (a)传统薄膜(CON)和渐变界面薄膜(MCEI)的 1-on-1 和 300-on-1 激光损伤概率曲线；
(b) 1-on-1 模式下的典型激光损伤形貌

Fig. 4 (a) Damage probabilities of traditional coating (CON) and gradient interfacial coating (MCEI) tested under 1-on-1 and 300-on-1 modes; (b) damage morphologies of MCEI and CON tested under 1-on-1 mode

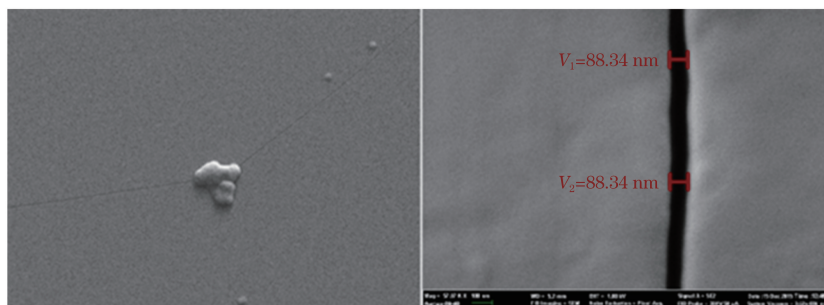


图 5 偏振薄膜龟裂的表面形貌图

Fig. 5 Typical surface morphology of cracked polarizer coating

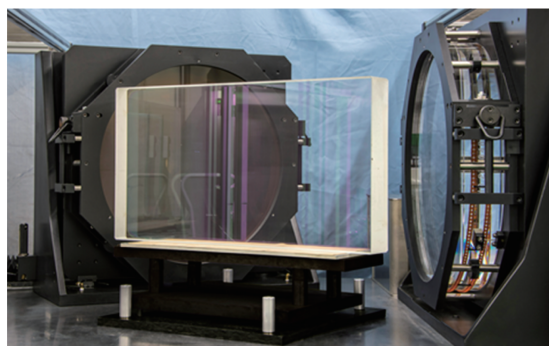


图 6 偏振薄膜元件的实物图

Fig. 6 Photo of the polarizer coating

所示为偏振薄膜元件($810 \text{ mm} \times 430 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$)的实物图。

4 结束语

激光技术的进步是推动偏振薄膜等关键激光薄

膜元件相关技术发展的源动力。上海光机所激光薄膜团队遵循系统工程解决问题的思路,强化基础研究,攻克了系列关键科学技术难题,成功制备出尺寸为 $810 \text{ mm} \times 430 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ 、p 偏振光透射率高于 98%、消光比优于 $100:1$ 、激光损伤阈值高于 14 J/cm^2 (波长 1053 nm , 脉宽 5 ns)、反射波面 PV 优于 0.7λ 、透射波面 PV 优于 $\lambda/3$ 的偏振薄膜元件,实现了我国大尺寸激光偏振薄膜从无到有的突破。研制的薄膜在激光损伤阈值国际竞赛中取得了佳绩,并在我国 SG 系列高功率激光、超强超短激光等大型激光装置中得到应用。

参 考 文 献

[1] Stolz C J. Brewster's angle thin film plate polarizer design study from an electric field perspective[J].

- Proceedings of SPIE, 1999, 3738: 347-353.
- [2] Gaborit G, Lavastre E, Lebeaux I, *et al.* Variations of transmittance with relative humidity in LIL/LMJ polarizer coatings[C]//Optical Interference Coatings, June 3-8, 2007, Tucson, Arizona, USA. Washington, D.C.: OSA, 2007: ThA7.
- [3] Rhodes M A, Fochs S, Biltoft P. Plasma electrode poekels cell for the national ignition facility[J]. Fusion Technology, 1998, 34(3P2): 1113-1116.
- [4] Lavastre E, Néauport J, Duchesne J, *et al.* Polarizers coatings for the laser MegaJoule prototype [C]//Optical Interference Coatings, June 27-July 2, 2004, Tucson, Arizona, USA. 2004. Washington, D.C.: OSA, 2004: TuF3.
- [5] Oliver J B, Kupinski P, Rigatti A L, *et al.* Stress compensation in hafnia/silica optical coatings by inclusion of alumina layers[J]. Optics Express, 2012, 20(15): 16596-16610.
- [6] Campbell H, Atherton J, DeYoreo J. Large-aperture, high-damage-threshold optics for beamlet [R]. USA: ICF Quarterly Report, 1995.
- [7] Buchman W W, Holmes S J, Woodberry F J. Single-wavelength thin-film polarizers [J]. Journal of the Optical Society of America, 1971, 61(12): 1604-1606.
- [8] Thomas C E, Guscott B, Moncur K, *et al.* Investigation of the damage properties of multilayer dielectric coatings for use in high power Nd:Glass Lasers[J]. Proceedings of SPIE, 1975: 296-304.
- [9] Rainer F, de Marco F P, Staggs M C, *et al.* Historical perspective on fifteen years of laser damage thresholds at LLNL[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2114: 9-24.
- [10] Genin F Y, Stolz C J. Morphologies of laser-induced damage in hafnia-silica multilayer mirror and polarizer coatings[J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2870: 439-448.
- [11] Stolz C J, Genin F Y, Reitter T A, *et al.* Effect of SiO₂ overcoat thickness on laser damage morphology of HfO₂/SiO₂ Brewster's angle polarizers at 1064 nm [J]. Proceedings of SPIE, 1997: 265-272.
- [12] Baisden P A, Atherton L J, Hawley R A, *et al.* Large optics for the national ignition facility[J]. Fusion Science and Technology, 2016, 69(1): 295-351.
- [13] Stolz C J, Sheehan L M, von Gunten M K, *et al.* Advantages of evaporation of hafnium in a reactive environment for manufacture of high-damage-threshold multilayer coatings by electron-beam deposition[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3778: 318-324.
- [14] Stolz C J, Weinzapfel C L, Rigatti A L, *et al.* Fabrication of meter-scale laser-resistant mirrors for the National Ignition Facility: a fusion laser[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5193: 50-58.
- [15] Bercegol H. What is laser conditioning: a review focused on dielectric multilayers [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3578: 421-426.
- [16] Stolz C J. Status of NIF mirror technologies for completion of the NIF facility[J]. Proceedings of SPIE, 7101: 710115.
- [17] Stolz C J, Runkel J. Brewster angle polarizing beamsplitter laser damage competition: "P" polarization [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8530: 85300M.
- [18] Zhu M P, Yi K, Fan Z X, *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.
- [19] Zhu M P, Yi K, Du Y, *et al.* Reduction in thickness error of optical coatings by dividing thick layers and monitoring with multiple witness glasses[J]. Vacuum, 2013, 97: 44-48.
- [20] Chai Y J, Zhu M P, Bai Z Y, *et al.* Impact of substrate pits on laser-induced damage performance of 1064-nm high-reflective coatings[J]. Optics Letters, 2015, 40(7): 1330-1333.
- [21] Chai Y J, Zhu M P, Wang H, *et al.* Laser-resistance sensitivity to substrate pit size of multilayer coatings [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 27076.
- [22] Chai Y J, Zhu M P, Xing H B, *et al.* Multilayer deformation planarization by substrate pit suturing [J]. Optics Letters, 2016, 41(15): 3403-3406.
- [23] Zhu M P, Sun J, Zhang W L, *et al.* Development of high performance polarizer coatings [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(12): 2908-2915. 朱美萍, 孙建, 张伟丽, 等. 高性能偏振膜的研制 [J]. 光学 精密工程, 2016, 24(12): 2908-2915.
- [24] Xu N, Zhu M P, Chai Y J, *et al.* Laser resistance dependence of interface for high-reflective coatings studied by capacitance-voltage and absorption measurement[J]. Optics Letters, 2018, 43(18): 4538-4541.
- [25] Xing H B, Zhu M P, Chai Y J, *et al.* Improving laser damage resistance of 355 nm high-reflective coatings by co-evaporated interfaces[J]. Optics Letters, 2016, 41(6): 1253-1256.
- [26] Stolz C J, Negres R A. Ten-year summary of the Boulder Damage Symposium annual thin film laser damage competition [J]. Optical Engineering, 2018, 57(12): 121910.