

高损伤阈值激光薄膜的制备方法

袁世豪 徐均琪 苏俊宏 卢嘉锡 任森

Review of preparation methods of laser films with high damage threshold

YUAN Shihao, XU Junqi, SU Junhong, LU Jiayi, REN Sen

引用本文:

袁世豪, 徐均琪, 苏俊宏, 等. 高损伤阈值激光薄膜的制备方法[J]. 应用光学, 2023, 44(6): 1185–1194. DOI: 10.5768/JAO202344.0610004

YUAN Shihao, XU Junqi, SU Junhong, et al. Review of preparation methods of laser films with high damage threshold[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(6): 1185–1194. DOI: 10.5768/JAO202344.0610004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

减反膜的梯度化与激光损伤阈值之间的关系研究

Relationship between gradient of antireflection film and laser induced damage threshold

应用光学. 2019, 40(1): 143–149 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0107003>

亚波长光栅偏振片的纳秒脉冲激光损伤特性

Nanosecond pulse laser damage characteristics of sub-wavelength gratings polarizers

应用光学. 2019, 40(1): 138–142 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0107002>

基于塑料镜片防水加硬抗老化光学薄膜的研制

Fabrication of anti-water hard and anti-aging optical film based on plastic lens

应用光学. 2017, 38(1): 83–88 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0105002>

基于激光外差干涉术的薄膜厚度测量方法

Method of thin film thickness measurement based on laser heterodyne interferometry

应用光学. 2019, 40(3): 473–477 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0303003>

532 nm激光辐照下ZnSe薄膜光学特性研究

Optical properties of ZnSe film under 532 nm laser irradiation

应用光学. 2018, 39(6): 929–935 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0607003>

二氧化钛薄膜表面粗糙度研究

Study on surface roughness of titanium dioxide thin film

应用光学. 2018, 39(3): 400–404 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0303005>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 06-1185-10

高损伤阈值激光薄膜的制备方法

袁世豪, 徐均琪, 苏俊宏, 卢嘉锡, 任 森

(西安工业大学 陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 陕西 西安 710021)

摘 要: 近年来, 随着大功率、高能量激光系统的不断发展, 光学薄膜的抗激光能力成为制约激光系统高质量发展的瓶颈之一。基于不同的制备方法及其工艺参数会对薄膜的损伤阈值产生重要的影响, 就薄膜镀制前、镀制中以及镀制后三个方面对提高损伤阈值的方法进行综述, 其中包括膜料优选、膜系设计、溶剂清洗、离子束清洗、制备方法、离子束后处理、激光后处理等内容。

关键词: 光学薄膜; 激光损伤阈值; 激光系统; 沉积方式

中图分类号: TN241; O484.4

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0610004

Review of preparation methods of laser films with high damage threshold

YUAN Shihao, XU Junqi, SU Junhong, LU Jiayi, REN Sen

(Shaanxi Province Thin Films Technology and Optical Test Open Key Laboratory, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: In recent years, with the demand and development of high-power and high-energy laser systems, the anti-laser capability of optical films has become one of the bottlenecks restricting the development of high-quality laser systems. Based on the different preparation methods and process parameters, the damage threshold of the film will have an important impact. The methods for improving the damage threshold of the film before, during and after plating were briefly introduced, including the film material selection, membrane system design, solvent cleaning, ion beam cleaning, preparation method, ion beam post-processing, laser pretreatment, and etc.

Key words: optical thin film; laser damage threshold; laser system; deposition method

引言

激光薄膜元器件作为激光系统的关键元件之一, 在激光系统中不仅起到改变光路、简化激光系统结构的作用, 同时也起到传输激光能量的作用, 其品质在很大程度上能够决定激光系统所能传输的最高能量以及运行可靠性。多年来, 人们不断探索提高光学薄膜激光损伤阈值的方法, 目前已经在制备前、制备中、制备后的每个过程取得一定成效, 每种方法在一定程度上都可以提高薄膜的激光损伤阈值。本文就以上三个过程中提高激光损伤阈值的方法进行综述。

1 制备前的措施和方法

1.1 膜料优选

膜料选取作为薄膜制备最为关键的步骤之一, 应根据要求选择最为合适的膜料。

一般在选取薄膜材料时应秉承以下几点^[1]:

1) 要选择应力相匹配的膜料, 使其应力状态相反。理论上拥有张应力和拉应力的膜层在交替沉积过程中会相互补偿, 因此应力状态匹配会大幅度降低残余应力。

2) 膜料的热膨胀系数与基底的热膨胀系数应尽量接近, 目的在于降低薄膜元件中热应力的影响。

收稿日期: 2022-10-10; 修回日期: 2023-07-11

基金项目: 国家自然科学基金 (62205263)

作者简介: 袁世豪 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事薄膜与等离子体研究。E-mail: 1819150014@qq.com

大多数薄膜是在高温下镀制、低温下使用。当膜层与基底的热膨胀系数差别较大时,两者不一致的变形量会导致热应力的产生,最后会影响膜基系统的粘合稳固性,严重时可能对整个光学元件的稳定性造成影响。

3) 在镀制高反膜时,应尽量选择折射率差值大的膜料。全介质高反膜实现高反射取决于膜料折射率的差值以及膜层的层数。在选择折射率差值大的基础上,镀制的膜层就尽可能少。

4) 在满足光谱性能前提下,应尽量选择抗激光损伤能力强的膜料,这样就可以在同样膜系设计前提下得到更高激光损伤阈值的薄膜。

实际制备中薄膜的性质与膜料的性质并非完全相同,因此在选择性能较好且匹配的膜料前提下,为进一步提高损伤阈值,应选择合适的镀膜技术与制备参数,使膜料的性能最大化。此外,对常见膜料的研究已进入瓶颈期,所以研究新材料也是光学薄膜发展的一大方向,目前研究的主要方向为复合材料。

1.2 膜系设计

当激光入射到薄膜时,一部分进入薄膜内部继续传播,另一部分则经过薄膜与基底界面反射回来,正面和反面传输的这两束光会在薄膜内部形成驻波场,这就意味着薄膜内部的不同位置存在不同的电场强度。薄膜内部电场强度越大,损伤就越容易发生,而且空气/膜层间界面、膜层之间的界面、膜层/基底间界面都是整个膜系的薄弱环节,激光破坏最容易发生在这些位置。因此设计的膜系要尽可能降低这些位置电场强度的大小^[2]。

如图1所示,徐均琪等人^[2]通过在原膜系(G|0.44H0.26L3H1.24LHLHLHL0.44H1.83L0.44H|A)基础上增加半波保护层(G|0.44HO.26L2.9H1.4LHLHLH0.5L1.28H1.45L0.44H2L|A)的方法镀制ZnSe/BaF₂薄膜。实验结果表明,损伤阈值从3.2 J·cm⁻²提高到3.8 J·cm⁻²,且半波保护层并不影响中心波长的光谱性能。CARNIGLIA C K^[3]通过给355 nm Sc₂O₃/SiO₂高反膜加MgF₂膜层来修正其驻波场,研究发现薄膜的激光损伤阈值平均提高了40%。ARNON O等人^[4]研究发现通过修正薄膜内的驻波场,可以降低薄膜的损耗并提高激光损伤阈值。RAINER F等人^[5]研究了248 nm Sc₂O₃/MgF₂高反膜加SiO₂和MgF₂保护层后,薄膜激光损伤阈值(laser induced damage threshold, LIDT)得到提高,如图2所示。

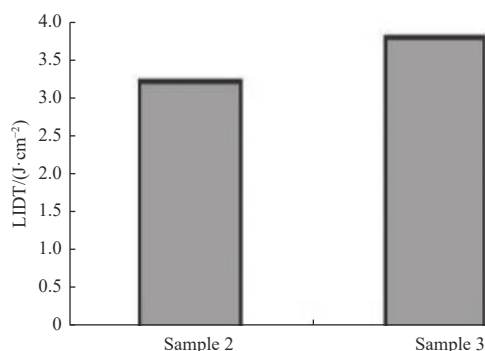


图1 两组膜系损伤阈值比较^[2]

Fig. 1 Comparison of membrane damage thresholds between two groups^[2]

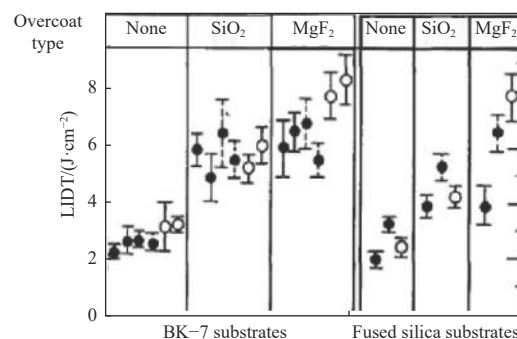


图2 248 nm Sc₂O₃/MgF₂高反膜有无保护层的损伤阈值^[5]

Fig. 2 Damage thresholds with or without protective layer of 248 nm Sc₂O₃/MgF₂ high reflective film

孔明东^[6]提出使用一种可以修正光学薄膜驻波场分布的计算机算法,以减少电场对光学薄膜的损伤。该方法主要通过在薄膜中增加非规整膜层来改善薄膜内部的驻波场分布,利用光学薄膜特征矩阵计算加入非规整膜层前后的电场。该方法可以按照具体要求修正薄膜内部的电场分布,使高折射率膜层和界面处的场强平方相对值减小,最终提高薄膜的激光损伤阈值。

膜系设计可以通过材料之间的应力匹配,提高薄膜的机械强度,从而提高薄膜抵抗激光辐照时产生热效应的能力。激光辐照薄膜时,会在薄膜内部形成驻波场,电场强度越高的位置薄膜吸收的能量越多,越容易形成损伤。通过薄膜设计修正驻波场主要目的在于:一是改变薄膜内部驻波场分布,尽量使驻波场场强最大值远离薄膜吸收系数最大的区域;二是改变膜系结构以降低驻波场峰值^[7]。一般膜层内部相较于膜层之间有着更好的抗激光能力,在已设计好的膜系最外层增加半波保护层,对光谱性能影响不大,并且会使电场强度的峰值落在薄膜材料内部,从而提高薄膜的

激光损伤阈值^[2]。膜系设计基于薄膜基础理论, 目前基本理论相对完善, 如需进一步提高损伤阈值, 则应在此基础上研究新的设计方法。

1.3 溶剂清洗

STOLZ C J 等人^[8]采用波长 193 nm、脉宽 13 ns、重频 100 Hz、330 μm 的平顶准分子紫外激光, 对来自全球 12 个 193 nm 的紫外激光增反膜 ($R>97\%$) 进行激光损伤阈值测试。结果发现, 采用手工清洁或甲醇超声清洗基底的样品 (共 4 个), 其激光损伤阈值明显高于其他作品。

叶晓雯等人^[9]使用 3 组不同的清洗工艺对抛光工艺相同的熔融石英基底进行处理: 1) 未经过任何清洗处理; 2) 使用工艺 A 清洗, 将样品放入 40 $^{\circ}\text{C}$ 的去离子水中, 用超声波辅助清洗, 超声波功率为 40 W, 频率为 40 kHz, 清洗 10 min; 3) 用工艺 B 进行清洗, 用改进的湿式化学清洗法, 严格按照流程清洗。比较 3 组在不同清洗效果的基底上沉积的 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 偏振分光膜 S 光和 P 光的损伤阈值。实验表明, 未经清洗的样品损伤阈值最低, 经工艺 A 清洗的样品损伤阈值有所提高, 经工艺 B 清洗的样品损伤阈值最高。李晓光等人^[10]分别对基底进行不清洗、超声波清洗 3 min 一次、超声波清洗 3 min 两次处理, 测得对应样品的激光损伤阈值分别为 11.3 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、16.6 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、18.7 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

基片上的杂质最终可能形成节瘤, 而节瘤处的吸收特别大, 会大大降低薄膜的抗激光能力。在薄膜镀膜前, 对基底进行清洗去除一部分杂质, 在一定程度上可以提高激光损伤阈值。在薄膜制备过程中, 腔室吸附的杂质以及膜料中的杂质也可能成为节瘤的来源, 因此保证制备环境的洁净程度以及膜料的纯度也可以进一步提高薄膜的激光损伤阈值。

2 制备中的措施和方法

大量实验都已经证明, 薄膜的本征吸收并不是主要原因, 缺陷才是导致吸收的决定性因素^[10]。因此, 在制备薄膜时主要控制减少缺陷, 降低吸收。

2.1 离子束清理

基底附着的杂质会引来各种各样的缺陷, 例如节瘤, 这些缺陷制约着薄膜激光损伤阈值的提高。所以, 在镀膜时, 保持真空室的真空度和控制环境污染非常重要。此外, 使用高能离子束轰击可以减少污染, 并且在基底表面形成微结构,

使膜层的附着力增强, 附着力提高有利于激光损伤阈值的提高^[11]。

STOLZ C J 等人^[12-14]对经离子束处理后的近红外增反膜进行研究, 发现无论是纳秒激光 (1064 nm, 5 ns) 还是飞秒激光 (786 nm, 200 fs), 经测试后薄膜的激光损伤阈值都比没有进行离子束处理的样品高; 尤其对于纳秒激光, 其样品的激光损伤阈值高达 130 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$, 比位于第二位样品的激光损伤阈值高 2 倍以上。李绵^[15]对基底进行离子束清洗, 使用的离子源为西安工业大学研发的宽束冷阴极离子源, 离子束流密度为 30 $\mu\text{A}/\text{cm}^2\sim 120 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 工作真空度为 $5\times 10^{-3}\text{Pa}\sim 3\times 10^{-3}\text{Pa}$ 。镀制的薄膜样品相比于未清洗的薄膜样品, 其激光损伤阈值提高了 3.8 倍。

总而言之, 未使用离子束清洗镀膜时, 基片表面附着的杂质可能会形成节瘤, 样品的损伤阈值也会大大降低。离子束清理使表面附着的杂质得以清理, 基底的表面能增加, 薄膜的附着力及机械强度增加, 从而使得薄膜的损伤阈值得以提高。同时, 离子束清理可能会引入其他杂质, 所以一般选用污染小的离子源也可进一步提高损伤阈值, 但是成本会增加。

2.2 沉积方式对薄膜激光损伤阈值的影响

薄膜制备方式一般分为物理气相沉积 (PVD) 和化学气相沉积 (CVD)。目前, 镀膜激光薄膜一般采用电子束蒸发 (PVD)、离子束溅射 (PVD) 以及溶胶-凝胶法 (CVD)。

2.2.1 热蒸发

电子束蒸发应用广泛、价格低, 但是蒸发粒子动能低, 一般为 0.01 eV $\sim$ 0.1 eV。因此制备的薄膜呈现柱状结构, 膜层松散、折射率较低、光学稳定性差。

JENA S 等人^[16]分别在不同氧分压的条件下, 使用电子束蒸发技术制备了非晶 HfO_2 薄膜。当氧分压从 $1\times 10^4\text{Pa}$ 增加到 $8\times 10^4\text{Pa}$ 时, 薄膜密度从 8.83 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ 降到 6.99 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}$, 折射率从 1.96 降到 1.82, 导致 532 nm 激光损伤阈值从 5.97 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 下降到 4.52 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

刘祺等人^[17]使用双源共蒸 MgF_2 和 ZnS 的方法, 通过控制两种膜料的沉积速率比, 获得了制备梯度折射率薄膜所需要的中间折射率材料。制备了折射率在厚度方向按 1.91、1.77、1.64、1.48、1.38 渐变的梯度折射率薄膜。结果表明, 梯度折射率薄膜的激光损伤阈值高于单组分 MgF_2 和 ZnS 薄

膜的激光损伤阈值。将双层减反射膜等效为折射率梯度渐变的 5 层后,激光损伤阈值从 $2.0 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 提高到 $3.7 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

徐均琪等人^[18]使用热蒸发技术在不同参数下镀制 TiO_2 薄膜,如图 3 所示。实验表明,当沉积速率较低时,损伤阈值在 $7 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 左右;但当沉积速率达到 $0.327 \text{ nm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,样品的激光损伤阈值降到了 $5.3 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。说明较低的沉积速率基本不对薄膜的激光损伤阈值造成影响,但当沉积速率较高时,薄膜的激光损伤阈值会有所下降。

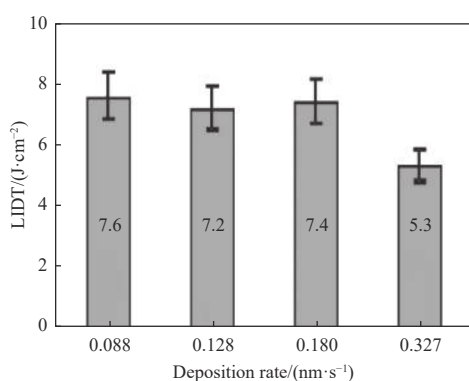


图 3 不同沉积速率制备的 TiO_2 薄膜的激光损伤阈值^[18]

Fig. 3 Laser damage thresholds for TiO_2 films prepared at different deposition rates^[18]

综合来看,热蒸发技术制备薄膜的损伤阈值不是特别高,但是目前热蒸发仍是制备光学薄膜的主流技术,其中影响薄膜激光损伤阈值的参数一般有真空度、基片温度以及沉积速率等^[18],影响最大的是沉积速率。沉积速率过低会影响制备效率和机械性能,致密度太低影响薄膜的导热性,使得薄膜收到激光辐照时热量来不及传递形成热制损伤;速率过高使得膜层吸收变大,光学性能变差,因此使用热蒸发技术制备薄膜时要选择合适的参数。此外,热蒸发技术制备的梯度折射率薄膜不仅可以达到更为优异的光谱性能,并且可以进一步提高薄膜的激光损伤阈值。

2.2.2 离子束辅助热蒸发

离子束辅助沉积技术使用的离子源,发射的是定向离子束,具有较强的方向性,可以破坏热蒸发的柱状结构,增加薄膜的附着力,提高薄膜的堆积密度和在外界环境中的稳定性^[19]。

BELLUM J 等人^[20]利用离子束辅助沉积技术制备的 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 薄膜的激光损伤阈值最高可达 $82 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$,相比使用离子辅助前提高了 50% 左右。YOSHIDA K 等人^[21]使用离子束辅助技术镀制的

薄膜相较于未辅助之前有明显增强,使得薄膜的生长更加致密,提高了薄膜的激光损伤阈值。王聪娟等人^[22]使用离子束辅助沉积技术(离子源为 End-Hall 型)在 K9 玻璃上镀制中心波长为 1053 nm 的增透膜,样品的激光损伤阈值从 $20 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 提高到 $30.88 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

CHENG X B 等人^[23]分别使用热蒸发和离子束辅助沉积技术制备了 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 薄膜。实验表明,离子束辅助沉积技术制备样品的激光损伤阈值低于热蒸发技术制备的样品,这可能是由于制备过程中离子源带来的杂质最终形成节瘤,使得薄膜的吸收变大。

综合来看,在合适参数的前提下,由于离子束的轰击,基片上的杂质得以清除,并且离子源也会使薄膜变得更加致密,因此薄膜的激光损伤阈值得以提高。同时,离子源的引入也会伴随着部分杂质进入真空腔,最终使得部分杂质沉积在薄膜内部形成节瘤,导致薄膜的激光损伤阈值降低。因此,在使用离子束辅助技术镀制薄膜时,除了选择合适的参数,还应该使用杂质少的离子源。但是该类离子源一般价格较贵,最终要结合需要的性能选择是否需要离子源辅助技术。离子束辅助可通过多离子源配合、合理开启及关闭离子源等方式研究如何进一步提高损伤阈值。

2.2.3 离子束溅射

离子束溅射相较于电子束蒸发来说粒子动能较高,约比电子束蒸发高两个数量级,因此制备的薄膜致密度较高,折射率接近材料本身。膜层致密度高则环境稳定性高,有利于提高激光损伤阈值,但是对热应力的缓冲能力会降低,不利于提高激光损伤阈值。此外荷能离子轰击会引起沉积原子的再喷溅,从而导致缺陷的产生^[24]。

许程等人^[24]分别采用电子束蒸发和离子束溅射的方法在不同氧分压条件下制备 Ta_2O_5 薄膜,测试结果如图 4 所示。电子束蒸发和离子束溅射制备样品的激光损伤阈值分别为 $4.2 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $5.3 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $15.2 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $16.8 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。袁宏韬等人^[25]分别使用电子束蒸发、离子束辅助沉积、离子束反应辅助沉积、双离子束溅射技术制备了 HfO_2 薄膜。实验表明,样品的弱吸收分别为 18.5×10^{-6} 、 17.4×10^{-6} 、 63.8×10^{-6} 、 5.9×10^{-6} ,损伤阈值分别为 $8.35 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $8.62 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $12.80 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $8.85 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。其中离子束溅射技术制备样品的弱吸收最小,且激光损伤阈

值高于电子束蒸发技术制备的样品。

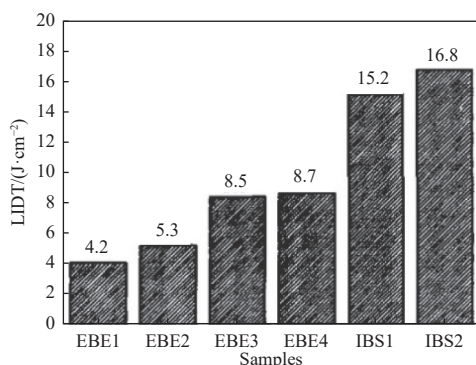


图4 样品的激光损伤阈值^[24]

Fig. 4 Laser damage thresholds of samples^[24]

2020年, 刘浩等人^[26]分别用电子束蒸发和离子束溅射制备 HfO₂ 薄膜。测试结果显示, 电子束蒸发制备的样品激光损伤阈值为 11.2 J·cm⁻², 高于离子束溅射制备样品的 6.9 J·cm⁻², 可能是由于参数选择不当, 使得膜层抵抗热应力能力降低。

离子束溅射由于其粒子动能较高, 因此制备的薄膜较为致密、吸收较小、环境稳定性好。一般情况下, 离子束溅射制备的薄膜激光损伤阈值要高于电子束蒸发镀制的薄膜。但是, 离子束溅射镀制的薄膜对热应力的缓冲能力会降低。因此, 离子束溅射制备薄膜的损伤阈值不一定高于电子束蒸发的薄膜, 要结合薄膜材料、膜系设计等选择较为合适的参数及制备方式。

2.2.4 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法自 20 世纪 80 年代初被美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室应用于大功率激光系统以来, 薄膜研究人员逐渐开始关注这项技术。通过溶胶-凝胶法制备的光学薄膜具有纳米颗粒结构, 对目前使用的强激光吸收比较小。此外, 通过改变工艺条件, 在纳米尺寸上对薄膜的结构进行调控, 以适用于不同的条件。该方法可通过浸泡或自旋的方式在室温下进行镀制, 是一种能够在大面积基底上镀制薄膜的方式, 可以控制很低的成本^[19]。

李海元等人^[27]通过溶胶-凝胶法制备 ZrO₂ 薄膜, 经测试样品的激光损伤阈值为 14 J·cm⁻²。胡文杰等人^[28]使用溶胶-凝胶法制备 MgF₂ 减反射薄膜, 在 351 nm 脉冲(脉宽 8 ns)激光辐照下, 薄膜样品的激光损伤阈值高于 35 J·cm⁻²。杨帆等人^[29]使用溶胶-凝胶法制备 SiO₂ 和 ZrO₂ 薄膜, 都获得了比较高的损伤阈值。此外, 通过溶剂替换、紫外光处

理、添加有机粘接剂等方法可以提高溶胶-凝胶法下光学薄膜的激光损伤阈值。

溶胶-凝胶法在形成凝胶时, 反应物在分子水平被均匀地混合且激光损伤阈值较高, 在较低温度就可以进行制备且不需要高真空环境。但是该方法制备时间较长, 一般需要几天甚至几周, 且原材料价格较贵, 容易发生膜层渗透现象。

通常来说, 物理法的膜厚较容易控制, 制备膜层数较多, 并且没有化学膜的膜层渗透现象严重, 所以一般选择物理法镀制高反膜。而在镀制减反膜时, 由于溶胶-凝胶法可以获得更高的损伤阈值, 所以在镀制减反膜时可以优先使用溶胶-凝胶法。此外, 要根据实际情况选择合适的镀膜技术, 例如在实际环境中提供不了高真空环境或者高温环境, 那么可选择溶胶-凝胶法代替物理法。

3 制备后的措施和方法

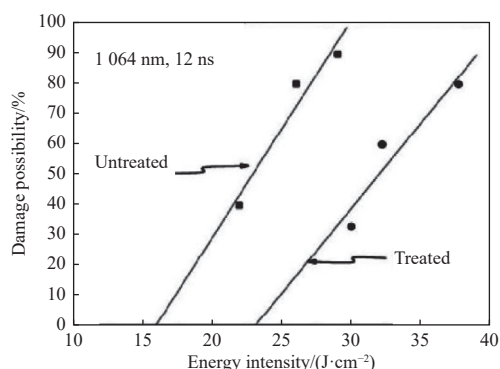
3.1 离子束后处理

目前, 离子束后处理已经广泛应用于多种材料的表面改性, 通过使用特定能量的离子轰击材料表面从而改善表面性质^[27]。由于表面层性质在很大程度上决定材料的多种表面物理和化学性质, 如果使用恰当的离子束轰击材料表面, 就会有效改善表面层的性质, 最终材料表面就会表现出改性的效果, 且在表面层以下仍然保持着原有材料的性质^[7]。

王聪娟等人^[30]使用电子束蒸发技术制备单层 ZrO₂ 薄膜, 在真空室内用氧等离子对其进行轰击, 其中阳极电压为 120 V, 阳极电流为 3 A。经测试, 使用离子束后处理的样品, 其激光损伤阈值从 9.7 J·cm⁻² 提高到了 14.4 J·cm⁻²。

ZHANG D P 等人^[31]报道了经过离子束后处理可以明显减少薄膜的微缺陷, 最终使 ZrO₂ 薄膜的激光损伤阈值提高了 45%(1 064 nm, 12 ns)。研究发现, 未经过离子后处理薄膜的激光损伤阈值为 15.9 J·cm⁻², 而经过离子束后处理薄膜的激光损伤阈值为 23.1 J·cm⁻², 如图 5 所示。

毛思达等人^[32]使用电子束蒸发技术镀制单层 TiO₂ 薄膜, 使用 Ar/O₂ 混合等离子对样品进行 20 min 后处理。研究发现, 样品的激光损伤阈值从 5.6 J·cm⁻² 提高到 9.65 J·cm⁻², 提升幅度高达 72%。但经过 60 min 后处理, 其激光损伤阈值低于未经处理的样品。

图5 离子处理前后薄膜的损伤阈值^[31]Fig. 5 Damage thresholds of film before and after ion treatment^[31]

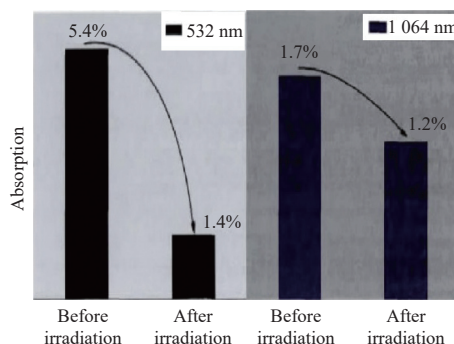
综上所述,离子束后处理可以使膜层的致密度增加、物理厚度减少、折射率提高,改善化学计量比缺陷,减少薄膜中显微缺陷和亚显微缺陷,使吸收率降低。电子束蒸发技术镀制的薄膜经离子后处理,可有效提高其激光损伤阈值。因为离子束蒸发镀制的薄膜比较疏松,经离子后处理之后,其膜层致密度增加,从而减少薄膜的吸收。但离子轰击时间过长会增加表面缺陷密度,在使用离子后处理时选择合适的轰击时间也十分重要。目前采用离子后处理技术来提高激光损伤阈值的研究还不多,后续需要在离子源类型、参数选定、薄膜沉积工艺等方面进行进一步研究^[7]。

3.2 激光后处理

以低于激光损伤阈值的激光辐照光学薄膜,可使其激光损伤阈值提高,称之为“激光后处理”^[33](有的资料也叫激光预处理,是针对元件使用之前的处理而言的)。上世纪80年代,这方面的研究工作就已经开始。研究发现,使用基频激光对薄膜进行预处理,可以明显提高薄膜的激光损伤阈值。

ARENBERG J W 等人^[34]使用1 064 nm波长激光对薄膜进行后处理,薄膜激光损伤阈值提高了40%;但当波长为532 nm时,薄膜激光损伤阈值几乎没有变化。李笑等人^[35]使用电子束蒸发技术制备SiO₂单层薄膜样品并进行激光后处理,结果显示损伤阈值提高了1.6倍左右,其中激光处理前后的缺陷损伤分别为11.5 J·cm⁻²和18.4 J·cm⁻²。卫耀伟等人^[36]使用电子束蒸发技术镀制了HfO₂/SiO₂薄膜,采用低能量、大光斑激光对样品及进行处理,并使用激光量热计对处理前后的弱吸收进行测量,如图6所示,在1 064 nm和532 nm波长下,薄膜的吸收相较于处理前有明显的下降,尤其当

测试波长为532 nm时,吸收从5.4%下降到1.4%。

图6 薄膜在激光辐照前后不同测量波长光下的弱吸收值^[36]Fig. 6 Weak absorption values of thin film of different wavelengths of light before and after laser irradiation^[36]

李笑等人^[37]使用电子束蒸发技术制备了ZrO₂/SiO₂薄膜,并使用光栅扫描方式对样品进行激光后处理,如表1所示,测试发现其损伤阈值最大提高了1.6倍。

表1 预处理前后多光斑损伤阈值测试结果^[37]Table 1 Test results of multi-spot damage threshold before and after pretreatment^[37]

LIDT/(J·cm ⁻²)	Spot diameters/μm		
	300	245	202
Before laser-conditioning	21.2	24.8	40.0
After laser-conditioning with 0.2 I _d	30.8	33.4	59.6
After laser-conditioning with 0.4 I _d	26.0	32.3	54.8
After laser-conditioning with 0.6 I _d	24.9	32.8	67.6

代福等人^[38]在5 mm厚的K9玻璃上镀制HfO₂/SiO₂薄膜,经波长为1 064 nm、重复频率为10 Hz、脉宽为7 ns、模式为TEM₀₀的激光后处理后,其中损伤阈值最高提高了81%。

杨利红等人^[39]使用电子束蒸发技术在K9玻璃上镀制HfO₂薄膜,分别采用10%、30%、50%、70%阈值能量对样品进行1-on-1预处理。经处理,样品的损伤阈值先增长后降低,并在30%处达到最大,损伤阈值高达26.86 J·cm⁻²,增幅为56%。2015年,刘杰等人^[40]使用电子束蒸发技术制备了HfO₂/SiO₂薄膜,分别采用单台阶能量光栅扫描和R-on-1后处理方式对样品进行激光后处理,结果显示损伤阈值分别提高了38%和30%。

对于激光预处理增加薄膜激光损伤阈值的机制有很多观点,但是大多数研究者认为:当使用低于激光损伤阈值的激光辐照薄膜时,可以去除或

消融薄膜表面的杂质、缺陷或水分,对薄膜的缺陷进行预破坏。如果用低能量密度激光辐照薄膜,薄膜缺陷会发生微观的破坏,后续使用更高能量密度激光进行辐照时,薄膜的缺陷就不会向灾难性方向发展^[7]。

综上所述,电子束蒸发技术制备的薄膜在激光后处理后,其损伤阈值一般会有所增长。在较小功率的激光辐照下,薄膜的节瘤处会出现小范围损伤,随后使用大功率激光辐照时,节瘤处也不会出现大面积损伤。在对薄膜进行后处理时,激光参数的选择格外重要,包括激光波长、能量密度、光斑尺寸、脉冲、重复频率、扫描方式等,其中能量密度一般选择零几率损伤阈值的30%~90%。在预处理前研究薄膜的微观表面,并根据观察的表面和节瘤情况选择合适的激光功率,可进一步提高损伤阈值。

3.3 退火处理

热退火工艺可以提高激光损伤阈值主要有两个原因:1) 高温会增强氧原子的扩散能力,并促进氧原子与薄膜中非化学计量的高折射率材料发生反应,从而减少由镀膜过程产生的氧间隙,宏观上表现为薄膜厚度减小;2) 薄膜晶粒尺寸随温度升高而增加,改善了薄膜热导率,薄膜热导率的增加则使缺陷处热量迅速扩散,避免了局部区域温度过高^[41]。

JENA S 等人^[42]运用热退火工艺对 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 高反膜进行处理,其中薄膜结构为 $\text{G} | (\text{HL})^{12} \text{H} | \text{AIR}$ 。经过波长为 532 nm、脉宽为 7 ns 的激光测试后,其激光损伤阈值如表 2 所示。薄膜损伤阈值随着温度升高而增加,当温度为 500 °C 时,过高的退火温度会产生过量拉伸压力,导致表面形成裂纹,从而使损伤阈值降低,但仍高于热退火前的损伤阈值。

表 2 不同退火温度下的晶粒尺寸与损伤阈值^[42]

Table 2 Grain size and damage threshold at different annealing temperatures^[42]

Annealing temperature/°C	Grain size/nm	LIDT/(J·cm ⁻²)
As-deposited	17±2	44.1±3.8
300	18±1	60.7±6.4
400	24±1	76.6±3.2
500	32±3	57.5±3.2

TAN T T 等人^[43]研究了热退火温度(200 °C、300 °C、400 °C)对 MgF_2 薄膜损伤阈值的影响。实

验发现,热退火温度对 MgF_2 薄膜损伤阈值具有提高作用。但随着退火温度进一步提高,损伤阈值会逐渐下降。在 200 °C 时,损伤阈值达到最大值 7.17 J·cm⁻²。

JENA S 等人^[44]研究了退火温度对 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 薄膜的影响。结果显示,反射谱宽度随着温度的升高变宽,同时中心波长发生蓝移;在 532 nm 波长、7 ns 脉宽的激光脉冲辐照下,发现退火之后的损伤阈值有所下降且在表面形成裂纹,如图 7 所示。退火使得高反膜多层结构中产生过量的拉伸应力,从而形成表面裂纹,而裂纹的存在降低了薄膜机械强度,导致薄膜损伤阈值下降。

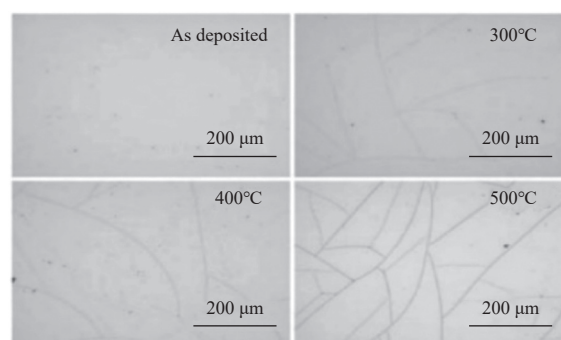


图 7 不同温度下的裂纹密度^[44]

Fig. 7 Crack density at different temperatures^[44]

综上所述,热退火时的高温增加了薄膜粒子的动能,使得薄膜的致密度得以提高,同时改善化学计量比,最终可以在一定程度上提高薄膜的抗激光能力。退火温度决定起消极作用还是积极作用,但温度过高会产生过量拉伸应力,在高反膜表面形成裂纹。裂纹主要有以下三种影响:一是强化了由干涉产生的场强;二是增加了高反膜的吸收;三是降低了高反膜的机械牢固度^[45]。因此,选择合适的退火温度才可以有效提高损伤阈值。同时,对于化学计量比较差的薄膜,可选择在退火时通入氧气气氛来进一步提高损伤阈值。退火作为一种常见的后处理工艺,目前受限于工艺影响,对薄膜激光损伤能力的影响仍存在争议^[26]。

4 激光薄膜的发展趋势

激光薄膜的发展趋势主要有以下 3 个方面:

1) 激光薄膜将向着多功能兼容的方向发展,传统的单一特性薄膜已经不能满足实际需要。随着武器装备系统的性能不断提高,要求薄膜器件不仅要具备良好的光学性能和高激光损伤阈值,

还要具备防紫外、抗风沙、防酸雨侵蚀,以及防电磁干扰等多种功能。

2) 对激光损伤阈值的要求日益提高。目前,虽然薄膜的激光损伤阈值可以做到很高,但薄膜器件的损伤阈值还远远不及基底材料,因此需要追求更好的激光损伤阈值。从材料、设计、制备及后处理等多种方式进行组合与优化,仍然是提高损伤阈值的有效方法之一。

3) 制备微纳结构的超表面,有望成为提高激光损伤阈值的一条新技术路线。微纳结构可以实现特定的光学性能,在一定程度上可以取代光学薄膜的部分功能。由于微纳结构具有很多薄膜所不具有的优良特性,其有望成为提高激光损伤阈值的新方法。

5 结束语

目前已经可以使用多种方式提高损伤阈值,但只限于研究某一单个方式,后续需要系统性、多方法配合研究如何提高损伤阈值。本文分别在薄膜制备前、制备中、制备后三个方面对提高薄膜损伤阈值的方法进行概述。制备前采取膜料优选和膜系设计等方法,制备中采用离子束清理,并且根据具体设计要求选取最为合适的制备技术,制备后可选取离子束后处理、激光后处理等方法进一步提高薄膜的损伤阈值,期望对相关领域的研究提供一些参考。

参考文献:

- [1] 师云云. 多波段全介质高反射薄膜的设计与制备[D]. 西安: 西安工业大学, 2021.
SHI Yunyun. Design and fabrication of multi-band all-dielectric highly reflective thin films[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2021.
- [2] 徐均琪, 郭芳, 苏俊宏, 等. 激光薄膜的设计与制备[J]. 表面技术, 2014, 43(2): 75-78.
XU Junqi, GUO Fang, SU Junhong, et al. Design and preparation of laser films[J]. Surface Technology, 2014, 43(2): 75-78.
- [3] CARNIGLIA C K, APFEL J H, ALLEN T H, et al. Recent damage results on silica/titania reflectors at 1 μ m[J]. National Bureau of Standards (U.S.) Special Publication, 1980, 568: 377-390.
- [4] ARNON O, BAUMEISTER P. Electric field distribution and the reduction of laser damage in multilayers[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(11): 1853-1855.
- [5] RAINER F, LOWDERMILK W H, MILAM D, et al. Scandium oxide coatings for high-power UV laser applications[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(20): 3685-3688.
- [6] 孔明东. 光学多层膜减小电场强度的一种新设计方法[J]. 光电工程, 1999, 26(1): 55-59.
KONG Mingdong. A new design method for reducing electric field intensity in optical multi layer film[J]. Opto-Electronic Engineering, 1999, 26(1): 55-59.
- [7] 占美琼. 提高光学薄膜激光损伤阈值的途径[J]. 上海第二工业大学学报, 2010, 27(4): 304-308.
ZHAN Meiqiong. Enhancement of the LIDT of optical coatings[J]. Journal of Shanghai Second Polytechnic University, 2010, 27(4): 304-308.
- [8] STOLZ C J, BLASCHKE H, JENSEN L, et al. Excimer mirror thin film laser damage competition[C]//SPIE Laser Damage, Proc SPIE 8190, Laser-Induced Damage in Optical Materials, Boulder, Colorado, USA: SPIE, 2011, 8190: 81-89.
- [9] 叶晓雯, 王孝东, 程鑫彬, 等. 清洗对偏振分光膜损伤阈值的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(10): 2338-2342.
YE Xiaowen, WANG Xiaodong, CHENG Xinbin, et al. Influence of substrate cleaning on laser-induced damage threshold of polarizers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(10): 2338-2342.
- [10] 李晓光, 沈军. 光学薄膜的激光损伤研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(10): 2237-2243.
LI Xiaoguang, SHEN Jun. Research progress in laser induced damage on optical films[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(10): 2237-2243.
- [11] 程勇, 陆益敏, 唐璜, 等. 光学薄膜抗激光损伤研究发展[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(7): 7-15.
CHENG Yong, LU Yimin, TANG Huang, et al. Research and development of optical thin film resistance to laser damage[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(7): 7-15.
- [12] STOLZ C J, THOMAS M D, GRIFFIN A J. BDS thin film damage competition[J]. SPIE, 2008, 71320: 71320C-1-7.
- [13] MANGOTE B, GALLAIS L, COMMANDRÉ M, et al. Subpicosecond pulse laser damage behavior of dielectric thin films prepared by different techniques[J]. SPIE, 2009, 7504: 255-263.

- [14] STOLZ C J, RISTAU D, TUROWSKI M, et al. Thin film femtosecond laser damage competition[J]. SPIE, 2009, 7504: 273-278.
- [15] 李绵. 激光薄膜的离子束辅助沉积及后处理技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2021.
- LI Mian. Research on ion beam-assisted deposition and post-treatment technology of laser thin films[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2021.
- [16] JENA S, TOKAS R B, TRIPATHI S, et al. Influence of oxygen partial pressure on microstructure, optical properties, residual stress and laser induced damage threshold of amorphous HfO_2 thin films[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 771: 373-381.
- [17] 刘祺, 徐均琪, 苏俊宏, 等. 热蒸发技术制备梯度折射率薄膜的研究[J]. 真空, 2022, 59(6): 22-28.
- LIU Qi, XU Junqi, SU Junhong, et al. Study on gradient index films prepared by thermal evaporation technology[J]. *Vacuum*, 2022, 59(6): 22-28.
- [18] 徐均琪, 李候俊, 李绵, 等. 热蒸发沉积 TiO_2 薄膜的光学及激光损伤特性[J]. 真空, 2019, 56(1): 39-44.
- XU Junqi, LI Houjun, LI Mian, et al. Optical and laser damage characteristics of TiO_2 films prepared by thermal evaporation deposition technique[J]. *Vacuum*, 2019, 56(1): 39-44.
- [19] 张大伟, 贺洪波, 邵建达, 等. 离子束辅助沉积制备高功率激光薄膜的研究[J]. 激光技术, 2008, 32(1): 57-60.
- ZHANG Dawei, HE Hongbo, SHAO Jianda, et al. Preparation of high power laser films based on ion beam assisted deposition[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(1): 57-60.
- [20] BELLUM J, KLETECKA D, RAMBO P, et al. Meeting thin film design and production challenges for laser damage resistant optical coatings at the Sandia large optics coating operation[J]. SPIE, 2009, 7504: 103-115.
- [21] YOSHIDE K, UMEMURA N. Influence of beam spatial distribution on the laser damage of optical material[J]. *Applphys*, 2006, 49(8): 3815-3819.
- [22] 王聪娟, 晋云霞, 王英剑, 等. 离子束辅助技术获得高激光损伤阈值的增透膜[J]. 中国激光, 2006, 33(5): 683-686.
- WANG Congjuan, JIN Yunxia, WANG Yingjian, et al. Ion beam assist technology obtains anti-reflection coatings with high laser damage thresholds[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(5): 683-686.
- [23] CHENG X B, DING T, HE W Y, et al. Using engineered defects to study laser-induced damage in optical thin films with nanosecond pulses[J]. SPIE, 2011, 8190: 31-39.
- [24] 许程, 董洪成, 肖祁陵, 等. 不同方法制备的 Ta_2O_5 薄膜光学性能和激光损伤阈值的对比分析[J]. 中国激光, 2008, 35(10): 1595-1599.
- XU Cheng, DONG Hongcheng, XIAO Qiling, et al. Optical properties and laser-induced damage threshold of Ta_2O_5 films deposited by different methods[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(10): 1595-1599.
- [25] 袁宏韬, 张贵彦, 阚珊珊. 沉积方式对 HfO_2 薄膜激光损伤阈值的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(增刊1): 108-111.
- YUAN Hongtao, ZHANG Guiyan, KAN Shanshan. Influence of the deposition method on the laser induced damage threshold of HfO_2 thin films[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 35(S1): 108-111.
- [26] 刘浩, 马平, 蒲云体, 等. 退火对EBE, IBS和ALD沉积 HfO_2 薄膜的抗激光损伤性能影响[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(7): 200006.
- LIU Hao, MA Ping, PU Yunti, et al. Impact of annealing on laser resistance of HfO_2 films fabricated by ALD, IBS and EBE techniques[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(7): 200006.
- [27] 李海元, 唐永兴, 胡丽丽. 高激光损伤阈值溶胶-凝胶 ZrO_2 薄膜[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(增刊2): 185-187.
- LI Haiyuan, TANG Yongxing, HU Lili. High laser damage threshold sol-gel ZrO_2 film[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, 37(S2): 185-187.
- [28] 胡文杰, 贾红宝, 孙菁华, 等. 溶胶-凝胶法制备用于氟磷酸盐玻璃的氟化镁减反射膜[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 320-325.
- HU Wenjie, JIA Hongbao, SUN Jinghua, et al. Magnesium fluoride anti-reflective films for fluorophosphate glass prepared by Sol-Gel method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 320-325.
- [29] 杨帆, 沈军, 吴广明, 等. 溶胶-凝胶光学薄膜的激光损伤研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(5): 439-443.
- YANG Fan, SHEN Jun, WU Guangming, et al. Laser damage of Sol-Gel thin film[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(5): 439-443.
- [30] 王聪娟, 晋云霞, 邵建达, 等. 三种不同后处理方式对 ZrO_2 薄膜性能的影响[J]. 中国激光, 2008, 35(10): 1600-1604.

- WANG Congjuan, JIN Yunxia, SHAO Jianda, et al. Influence of three post-treatment methods on properties of ZrO_2 thin films[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(10): 1600-1604.
- [31] ZHANG D P, SHAO J D, ZHANG D W, et al. Employing oxygen-plasma posttreatment to improve the laser-induced damage threshold of ZrO_2 films prepared by the electron-beam evaporation method[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(24): 2870-2872.
- [32] 毛思达, 邹永刚, 范杰, 等. 离子后处理对 TiO_2 光学薄膜及损伤特性的影响[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(7): 1451-1457.
- MAO Sida, ZOU Yonggang, FAN Jie, et al. Influence of plasma treatment on optical and damage properties of TiO_2 thin films[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(7): 1451-1457.
- [33] WOLFE C R. Laser conditioning of optical thin films[J]. SPIE, 1990, 1438: 382-397.
- [34] ARENBERG J W, FRINK M E. On the role of water in the laser conditioning effect[J]. SPIE, 1988, 756: 430-439.
- [35] 李笑, 刘晓凤, 赵元安, 等. 激光预处理对 SiO_2 单层膜中缺陷的影响[J]. *中国激光*, 2010, 37(6): 1626-1630.
- LI Xiao, LIU Xiaofeng, ZHAO Yuan'an, et al. Influence of laser-conditioning on defects of SiO_2 mono-layer films[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(6): 1626-1630.
- [36] 卫耀伟, 张哲, 刘浩, 等. $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 薄膜的激光预处理作用研究[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(12): 3338-3342.
- WEI Yaowei, ZHANG Zhe, LIU Hao, et al. Laser conditioning effect on $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ film[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(12): 3338-3342.
- [37] 刘笑, 刘晓凤, 单永光, 等. 激光预处理 $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ 106 4 nm高反射膜的机理[J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2284-2289.
- LIU Xiao, LIU Xiaofeng, SHAN Yongguang, et al. Mechanism of laser pretreatment of $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ 106 4 nm high reflective film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2284-2289.
- [38] 代福, 杨李茗. $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 多层高反膜激光预处理技术[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(4): 929-934.
- DAI Fu, YANG Liming. $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ multilayer high reflection laser pretreatment technology[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(4): 929-934.
- [39] 杨利红, 王涛, 苏俊宏, 等. 激光预处理对 HfO_2 薄膜损伤特性的影响[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 336-342.
- YANG Lihong, WANG Tao, SU Junhong, et al. Influence of laser conditioning on the damage properties of HfO_2 thin film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 336-342.
- [40] 刘杰, 张伟丽, 朱美萍. 532 nm $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 高反膜的激光预处理效应[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(3): 254-259.
- LIU Jie, ZHANG Weili, ZHU Meiping. Laser conditioning effect of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ high reflectors at 532 nm[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(3): 254-259.
- [41] 董家宁, 范杰, 王海珠, 等. 高反射光学薄膜激光损伤研究进展[J]. *中国光学*, 2018, 11(6): 931-948.
- DONG Jianing, FAN Jie, WANG Haizhu, et al. Research progress in laser damage of high-reflective optical thin films[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2018, 11(6): 931-948.
- [42] JENA S, TOKAS R B, RAO K D, et al. Annealing effects on microstructure and laser-induced damage threshold of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ multilayer mirrors[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(22): 6108-6114.
- [43] TAN T T, LIU B J, WU Z H, et al. Annealing effects on structural, optical properties and laser-induced damage threshold of MgF_2 thin films[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2017, 30(1): 73-78.
- [44] JENA S, TOKAS R B, THAKUR S, et al. Influence of annealing on optical, microstructural and laser induced damage properties of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ multilayer high reflection mirror[C]//American Institute of Physics Conference Series. Bhubaneswar, Odisha, India: AIP Publishing LLC, 2017: 060005.
- [45] FEIT M D, RUBENCHIK A M. Influence of subsurface cracks on laser-induced surface damage[J]. SPIE, 2004, 5273: 264-272.