

高反射光学薄膜激光损伤研究进展

董家宁, 范杰*, 王海珠, 邹永刚, 张家斌, 侯春鸽

(长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 激光诱导损伤阈值是大功率光学系统中重要参数, 其数值大小对激光系统的输出功率与稳定性具有重要影响。为了突破损伤阈值对激光光学系统输出功率的限制, 科研人员主要从制备薄膜工艺、激光特性、薄膜特性以及薄膜后工艺等方面开展研究。本文介绍了高反膜理论、制备工艺; 综述了近十年来国内外对高反膜损伤研究的成果; 阐述了激光特性、薄膜特性以及薄膜后工艺对薄膜损伤阈值的影响。在此基础上, 对提高高反膜损伤阈值的研究和发展趋势进行了分析与展望。

关键词: 激光损伤; 光学薄膜; 高反膜; 损伤阈值

中图分类号: TB43 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20181106.0931

Research progress in laser damage of high reflective optical thin films

DONG Jia-ning, FAN Jie*, WANG Hai-zhu, ZOU Yong-gang, ZHANG Jia-bin, HOU Chun-ge

(State Key Laboratory of High-power Semiconductor Laser, Changchun

University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: fanjie@cust.edu.cn

Abstract: The laser-induced damage threshold is an important parameter in high-power optical systems, and it has an important influence on the output power and stability of laser system. In order to break through the limitation of the damage threshold on the output power of the laser optical system, researchers have carried out research mainly on film preparation, laser characteristics, film properties and thin film post-treatment. In this paper, the theory and preparation of high reflective film are introduced; the research results of high anti-membrane damage at home and abroad in the past decade are reviewed; the effects of laser characteristics, thin film properties and thin film post-treatment on the film damage threshold are also discussed. On this basis, the research and development trend of improving high reflective film damage threshold are analyzed and prospected.

Key words: laser damage; optical film; high reflective film; damage threshold

收稿日期: 2017-12-30; 修订日期: 2018-02-21

基金项目: 国家青年基金项目 (No. 21707010); 长春理工大学科技创新基金 (No. XJJLG-2016-07); 长春理工大学青年基金 (No. XQNJJ-2015-10)

Supported by the National Science Foundation for Young Scientists of China (No. 21707010); the Innovation Science Foundation of Changchun University of Science and Technology (No. XJJLG-2016-07); the Youth Science Foundation of Changchun University of Science and Technology (No. XQNJJ-2015-10)

1 引言

近年来,大功率激光系统的长足发展使其在许多科学和工业领域得到了广泛应用,如太空碎片去除、激光喷丸、激光驱动电子和离子的癌症治疗、新材料生产和激光核聚变等^[1-4]。光学薄膜是大功率激光系统最重要且易损伤元件,随着激光系统输出功率的不断提升,光学薄膜尤其是高反膜的激光诱导损伤阈值(LIDT)逐渐成为限制激光系统输出功率提升的关键因素,并对其稳定运行产生重大影响。提高高反膜抗激光诱导损伤能力成为大功率光学系统设计的核心关键之一。激光诱导薄膜损伤是一个复杂的破坏过程,其涉及众多因素,包括波长、温度、脉冲次数、光斑尺寸以及薄膜结构、材料等。目前理论研究普遍认为薄膜损伤机理可以分为外在损伤机制和本质损伤机制。其中,外在损伤机制与吸收杂质有关,如薄膜缺陷吸收激光能量导致的热效应等;本质损伤机制与薄膜材料导带中自由电子产生过程有关,如雪崩电离、多光子电离等。而这些理论各有适用条件和不足。只有不断完善损伤机理和构建合理物理模型才能突破薄膜损伤阈值的瓶颈,为研制高损伤阈值薄膜打下坚实基础。

光学薄膜包括增透膜^[5]、高反膜^[6]、偏振膜、滤光膜、相位膜等。其中,高反膜是光学薄膜重要组成部分。由于单层反射膜往往达不到理想反射效果,高反膜通常由两种或两种以上材料在基底上按折射率高低交替堆积而成,对特定波段形成高反射,每层膜料光学厚度为 $\lambda/4$ 的倍数,这里 λ 为特定波段的中心波长^[7]。通常高反膜结构表示为 $G|aHbLcHdL\cdots nHkL|AIR$,其中H代表高折射率材料,L代表低折射率材料,G代表对应基底, a, b, c, n, k 为任意正实数,代表光学厚度系数。例如每层膜料光学厚度仅为 $\lambda/4$ 时,高反膜结构一般表示为 $G|HLHLHL\cdots HL|AIR$,或缩写为 $G|(HL)^m|AIR$, m 代表周期数。从理论上分析,不断增加高反膜层数能够实现100%反射,即全反膜。然而薄膜材料存在吸收损耗和散射损耗,实际制备薄膜中无法实现100%反射,此外薄膜过厚会产生龟裂甚至脱落现象。目前,常见的高

折射率材料主要有 HfO_2 、 TiO_2 、 Ta_2O_5 、 ZrO_2 、 $ZnSe$ 、 ZnS 以及金、银、铝等,低折射率材料主要有 SiO_2 、 Al_2O_3 以及氟化物等。按照薄膜组合材料的不同,高反膜分为介质-介质膜、介质-金属膜以及金属薄膜。对于金属薄膜,通常在其最外层镀制一层介质膜作为保护层,如 SiO_2 、 Al_2O_3 等。高反膜镀制方式有电子束沉积、离子束辅助沉积、离子束溅射沉积、溶胶-凝胶法、金属有机化学气相沉积方法(MOCVD)和近些年发展起来的等离子体增强化学气相沉积法(PECVD),其中PECVD较多的用于制备硅化物高反膜。对于高反膜,探究损伤机理是目前研究的热点和难点。阐明损伤机理、构建合理的物理模型、解释损伤现象、预测损伤趋势从而提高高反膜抗激光损伤能力,有助于实现大功率激光系统(如拍瓦(PW)级激光器系统^[8])输出功率最大化,改善光学系统在不同工作环境中的稳定性。

本文对近十年来国内外高反膜损伤机理研究成果进行了总结和分析,并就其发展趋势做出展望。

2 激光诱导光学薄膜损伤测试标准

依据激光与光学薄膜相互作用时产生的不同效果,薄膜损伤可以分为两类,一类为功能性损伤,此类损伤具有可逆性;另一类为器质性损伤,通常此类损伤不可逆,为永久性损坏。对于光学薄膜损伤,不同国家、不同实验室、不同科研者采用的判断标准不尽相同,造成实验数据无法科学比较。因此有必要统一损伤判断标准,以便定量测出损伤阈值。目前,薄膜损伤判断标准主要有国际标准化组织协定^[9-10]和美国国家点火装置协定^[11]。两者对损伤判断标准和损伤阈值确定具有一定差异,国际标准化组织协定中光学元件损伤被定义为表面发生永久性变化,以损伤几率为零的最高激光通量为损伤阈值,所谓零几率损伤的最高激光通量是指在光学薄膜测试区域选取一系列不连续测试点,规定每 n 个测试点为一组,以额定的功率密度单次或多次脉冲辐照这些点,假设其中有 m 个点发生损伤,那么此功率密度下的损伤几率为 m/n 。完成辐照之后,提高功率密度,

引导脉冲至新的 n 个测试点继续进行辐照并记录功率密度与损伤几率。当某一功率密度下损伤几率达到 100% 时,停止损伤测试。以功率密度为横坐标,损伤几率为纵坐标,通过数据点绘制线性趋势线,线性趋势线与横坐标相交的功率密度被认为损伤几率为零的最高激光通量即损伤阈值。而美国国家点火装置协定规定在光学元件表面选择约 2 400 个连续测试点,采用单脉冲形式辐照测试点,通常以 1 J/cm^2 功率密度进行第一轮测试。完成测试之后,此后以额定能量提高功率密度进行下一论测试,直到非传播损伤点的数量累积超过测试点的 1%,则停止测试并将此时对应的功率密度定义为损伤阈值。所谓传播损伤点指当辐照焦点在同一轮或之后测试中前进到相邻位置时,前一个测试点发生损伤并增大。美国国家点火装置协定规定的损伤阈值评价方法较为复杂,因此在损伤阈值的研究中,通常将出现一个传播损伤点对应的功率密度定义为损伤阈值。

目前,常用的薄膜损伤阈值测试方法主要有 S-on-1、1-on-1、R-on-1 和 N-on-1。S-on-1 指使用能量密度相同的激光多次辐照随机选中的测试点,如果未完成 S 次辐照,光学薄膜已发生损伤,则停止辐照,转移至下一个未测试点再次进行损伤测试,该测试方式主要针对多脉冲形式的辐照;1-on-1 则指在薄膜上随机选择一些测试点,每一测试点只辐照一次,无论是否发生损坏,都移到下一个未辐照点继续进行损伤测试,该测试方式适用于单脉冲辐照;R-on-1 指在同一测试点上,以一定梯度增加激光能量,每增加一次能量便辐照光学薄膜一次,直到薄膜被损伤为止。N-on-1 与 R-on-1 测试相同,两者唯一区别是 N-on-1 能量之间间隔大于 R-on-1,能量间隔的增大,提高了损伤阈值测试效率。除了 1-on-1 和 S-on-1 测试,其余两种测试方式对薄膜均具有一定的激光预处理效果。通常来说,R-on-1 获得的损伤阈值最大,N-on-1 损伤阈值最小,但都大于 1-on-1 的损伤阈值。

3 国内外研究进展

激光诱导高反膜损伤主要由光源特性和薄膜

特性决定,光源特性和薄膜特性中的每一个因素又会对高反膜抗激光能力产生一定影响。就光源特性而言,脉冲宽度、波长、光斑尺寸、重复频率均会影响损伤阈值;对薄膜特性而言,高反膜材料、镀膜时沉积技术、薄膜中裂痕、节瘤、颗粒物嵌入等局部缺陷也会对损伤阈值产生极大影响。此外,高反膜所处的工作环境对损伤阈值也有一定影响,如温度、湿度等。因此,研究分析每一项因素对高反膜具体影响、阐明损伤机理对提高高反膜抗激光损伤能力有显著的意义。

激光脉冲宽度的不同,往往在一定程度上能够决定高反膜损伤机理。当激光脉冲宽度为 ns 级时,高反膜损伤形态一般表现为脱层、断裂以及平底坑等,这些损伤形态直径较大,能达到几百个微米,且损伤形态外围与未损伤区域界限不明显,如图 1 所示。这些损伤形态主要由外在损伤机制引起,薄膜中缺陷吸收激光能量产生的热效应是主要原因。基于材料性质对温度依赖以及高温杂质产生的热辐射导致周围膜料发生光致电离的热爆炸模型(TE)^[12]完善了热效应损伤机理,尤其是对损伤阈值依赖脉冲宽度的情形^[13],模型计算数值与实验结果具有良好匹配性。

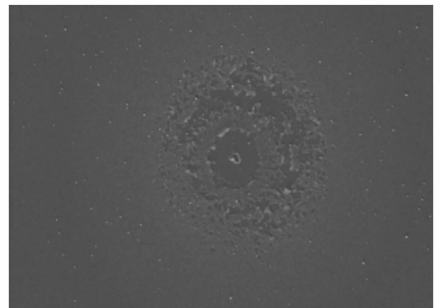


图 1 1 064 nm 波长、12 ns 脉宽激光损伤的薄膜形貌^[14]

Fig. 1 Morphology of damage film induced by laser with wavelength of 1 064 nm and pulse width of 12 ns^[14]

薄膜中电子能量的增益与损失之间的微妙平衡决定了光学薄膜损伤阈值。当激光脉冲宽度为 fs 级时,由于辐照时间短,薄膜材料价带中少量电子由于吸收的大量能量来不及传递给周围原子或分子,被激发至导带形成自由电子。当这些自由

电子吸收足够多的能量,其加速运动便会撞击薄膜材料原子产生电子-空穴对,撞击产生的电子吸收高能量重复之前步骤,如此循环,最终导致雪崩电离。除了雪崩电离能够产生大量自由电子之外,薄膜材料价带中的电子吸收多个光子同样能够跃迁至导带中形成自由电子(多光子电离),如图 2 所示。对于同一波长而言,随着禁带宽度增加,价带中电子吸收光子跃迁几率减低,薄膜损伤越不容易发生。不论是雪崩电离还是多光子电离都是通过增加导带中自由电子进而产生等离子体,等离子体继续吸收能量急剧提高自身温度($\sim 10^4$ K),最终导致薄膜材料损坏。在 fs 级激光脉冲中,雪崩电离和多光子电离是同时存在的,不存在先后顺序。

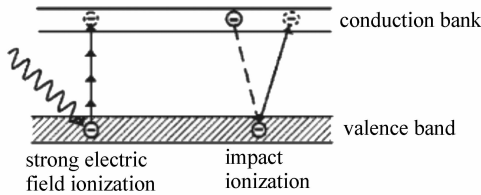


图 2 自由电子产生的过程^[15]

Fig. 2 Generation process of free electron^[15]

虽然雪崩电离和多光子电离都是产生本质损伤的主要机制,但二者在这一损伤过程所产生的影响不同。因此,为探究多光子电离和雪崩电离对本质损伤相对影响大小,Kaiser 等人^[15]依据电子和声子占有数的玻耳兹曼方程,通过波尔兹曼微积分方程的数值解发现,当脉冲宽度小于 100 fs 时,雪崩电离对损伤几乎没有影响,而多光子电离在整个 fs 范围内对损伤均有影响;200 fs 时雪崩电离对损伤影响与多光子电离相当。Chimier 等人^[16]依据简单速率方程,并考虑了多光子电离和雪崩电离影响,结合实验和理论分析发现,当激光脉冲宽度小于 350 fs 时,光致电离不仅仅取决于多光子电离;当激光脉冲宽度大于 50 fs 时,雪崩电离成为薄膜损伤的主要机制。到目前为止,尽管已经从多方面就雪崩电离与多光子电离对薄膜损伤的影响进行了综合研究,但当激光脉冲宽度小于 300 fs 时,理论分析与实验仍然存在明显误差,依赖于激光脉冲宽度的雪崩电离和多光子电离对薄膜本质损伤的影响机制仍有待进一步探

索。目前高功率、大能量激光系统的脉冲宽度覆盖 fs 至 ns 级,随着脉冲宽度的减少,薄膜损伤对缺陷的依赖性逐渐降低,损伤机制由外在机制转变为本质机制。因此,对光学薄膜损伤机制的研究主要集中在 fs 和 subps(亚皮秒)级激光辐照条件下,也有少部分研究 ns 级激光对薄膜的损伤机理。接下来将详细阐述近十年来国内外对高反膜损伤阈值研究的成果,包括损伤机制、物理模型和实验结果。

3.1 辐照激光特性对损伤阈值影响

3.1.1 光斑效应

相同的测试条件下,不同光斑尺寸对损伤阈值测试具有一定影响,光斑越大,损伤阈值越低,这就是光斑效应。损伤测试中采用的激光器光束大多数为高斯光束,高斯光束具有中心光场强度高,边缘强度相对较弱的特点。当激光辐照高反膜时,不同的光斑尺寸以及功率密度对薄膜的温度具有不同影响。2007 年,代福等人^[17]利用 ANSYS 模拟与实验相结合的方式研究了 Ta₂O₅/SiO₂ 高反膜在波长为 1 064 nm(82 ns)的激光辐照下,相同功率不同光斑尺寸和相同功率密度不同光斑尺寸的激光对薄膜温度的影响情况。研究结果表明,相同功率激光时,光斑大小对激光辐照点的温度影响较大,而对基底温度几乎没有影响;相同功率密度激光辐照时,基底温度随辐照光斑尺寸的增大而升高。这增加了与基底接触的膜层对激光能量的吸收,在两者接触面产生大量热,如果这些多余热量不能够及时扩散出去,会使得薄膜发生热膨胀甚至从基底脱落^[18]。在探究激光辐照光斑尺寸对薄膜温度的研究以及光学薄膜设计中,考虑光斑尺寸与光学元件大小匹配性可以有效抑制激光辐照时薄膜温度的升高,改善薄膜损伤阈值特性,延长薄膜使用寿命。此外,不同光斑尺寸还会使损伤机理发生改变。2016 年,Zhanshan Wang 等人^[19]分别采用光斑直径为 20 μm 和 1 000 μm 的光束来研究损伤阈值随入射角变化情况,测试结果如表 1 所示。辐照光斑直径为 20 μm 时,损伤阈值随入射角增加而升高;而辐照光斑直径为 1 000 μm 时,损伤阈值随入射角增加而减小。作者认为 1 000 μm 直径光斑辐照时,纳米级吸收杂质不再是影响损伤阈值主要因素,可

能存在其它损伤机制,如等离子体材料耦合机制。

表1 20 μm 、1 000 μm 光斑直径时,辐照入射角对损伤阈值的影响^[19]

Tab.1 Influence of incidence irradiation angle on damage threshold at 20 μm and 1 000 μm spot diameter^[19]

	Max EFI at interface	Normalized LIDT(1-on-1)	
		Small beam size(20 μm)	Large beam size(1 000 μm)
0° HR coating	91%	1	1
65° S-pol HR coating	20%	3.5	0.45

光斑尺寸不仅可以影响薄膜温度变化,加快薄膜老化,缩短薄膜使用寿命,而且能够改变损伤机理使得薄膜更易受到损坏。光斑尺寸对薄膜损伤阈值的影响机理有待进一步研究,目前通常只考虑薄膜的吸收以及高温产生的辐照与等离子体。而随着光斑直径的增加,其覆盖的薄膜杂质也随之增多,杂质对能量的吸收以及杂质间相互作用对薄膜损伤阈值的影响尚有待进一步研究。

3.1.2 激光波长

不同波段激光辐照下,薄膜损伤机理会有所差别,导致损伤阈值发生改变,这就是所谓的波长效应。一般情况下,光学薄膜的损伤阈值随波长减小而降低,主要因为当波长减小时,薄膜的吸收能力会显著增大。另外,波长的减小增加了激光频率,使得单个光子能量变大,进而导致价带中的电子吸收光子更容易跃迁至导带中形成自由电子,降低损伤阈值。为了阐明波长对薄膜损伤的影响,2008年,李大伟等人^[20]采用电子束蒸发技术制备了1 064 nm和532 nm双波长 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 高反膜,该高反膜结构为 $G | \text{HL}(\text{H}2\text{L})^{15} | \text{Air}$,其中H表示光学厚度为四分之一波长的 HfO_2 ,L表示光学厚度为四分之一波长的 SiO_2 ,G为K9玻璃基底。随着辐照激光波长从1 064 nm(12 ns)降低至532 nm(10 ns),薄膜损伤阈值从17.9 J/cm^2 降低至9.1 J/cm^2 。1 064 nm波长辐照导致的损伤主要为热力耦合,而532 nm波长辐照导致的损伤则更多表现为电子吸收光子对微观结构影响,辐照波长的变化导致损伤机制及损伤阈值发生变化。2009年,M. Jupé等人^[21]以 TiO_2 为例研究了130 fs脉冲宽度激光辐照下,薄膜损伤阈值对波长的依赖性。研究发现电子吸收光子数量未发生变化时,损伤阈值随波长红移而减小,

当波长达到对应材料禁带宽度时,电子吸收光子数量会发生变化,导致损伤阈值激增,如图3所示。2018年,徐均琪等人^[22]研究了1 064 nm和532 nm波长对钛酸钡薄膜(H4)的损伤阈值影响。研究发现1 064 nm(10 ns)辐照预处理能够有效提高薄膜损伤阈值,而532 nm(10 ns)辐照预处理对薄膜损伤阈值提高不明显。对同一样品,1 064 nm损伤阈值远大于532 nm损伤阈值,且两者对薄膜的损伤演变过程存在差异,1 064 nm波长对薄膜损伤具有轻微损伤、轻度损伤、重度损伤和极度损伤四个缓慢演变的阶段,而532 nm波长对薄膜损伤只有重度损伤和极度损伤两个演变阶段。

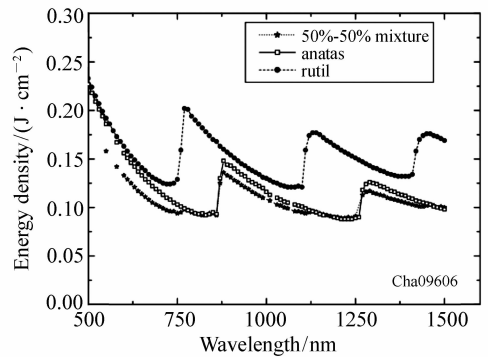


图3 损伤阈值随波长变化^[21]

Fig.3 Damage threshold varies with wavelength^[21]

当波长由红外转变为紫外时,损伤决定因素由节瘤逐渐转变为纳米尺寸的吸收杂质,由于损伤决定因素发生改变,薄膜抗激光能力发生突变,损伤形貌也存在差异。采用禁带宽度不同的材料组成混合膜料能够减小损伤阈值对波长的依赖性。在未来的薄膜材料开发中,应针对特定波段研制独立于波长效应的薄膜材料,以此降低辐照

激光波长对损伤阈值的影响。

3.1.3 多脉冲效应

多脉冲辐照光学薄膜类似于 S-on-1 损伤阈值测试方式,使用相同功率密度、相同时间间隔多次辐照薄膜同一区域。实践证明,高反膜在一定激光功率密度下,经多次辐照后其抗损伤能力会发生明显退化,极易发生不可逆膜层损伤,大幅降低薄膜抗激光损伤能力^[23]。这主要是由累积效应^[24]造成的,所谓累积效应指在低于薄膜损伤阈值的功率密度下多次辐照薄膜时,即便是低功率密度也会对薄膜造成微小的不可逆破坏,但不会影响薄膜性能,在后续的辐照中,此破坏会逐渐增加,当达到临界值时薄膜会发生灾难性损伤,严重威胁整体系统的稳定运行。2012年,刘志超等人^[25]研究了 1 064 nm 波长、5 ns 脉冲宽度激光多脉冲下 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 高反膜的损伤规律。该高反膜结构为 $G | (\text{HL})^{17} \text{L} | \text{Air}$,其中 H 为 HfO_2 ,L 为 SiO_2 ,G 为 K9 玻璃。研究结果表明,多脉冲辐照下薄膜损伤形态主要有色斑和层裂。其中,色斑为轻微损伤,其形成原因为两种材料热膨胀程度不同引起膜层厚度变化;而层裂为严重损伤,多脉冲累积后的热力耦合作用是产生层裂的主要原因。此外,色斑损伤达到一定程度之后会转变为层裂损伤。最终的层裂损伤尺寸与辐照能量密度近似呈线性关系。2017年,李玉瑶等人^[26]研究了多脉冲对 HfO_2 薄膜的影响,由于累积效应的存在,多脉冲损伤阈值比单脉冲损伤阈值降低了 24%。2018年,VIKT6RIA CSAJB6K 等人^[27]研究 fs 脉冲下,脉冲次数对高反膜损伤阈值的影响,激光特性为 795 nm (42 fs),重复频率为 1 kHz。实验结果表明随着辐照次数的增加,高反膜损伤阈值逐渐减小,且这一变化趋势与所选择的高折射材料没有关系。Mark Mero 等人^[28]认为光学材料结构缺陷会在禁带中引入中间态,中间态分为浅缺陷态和深缺陷态。浅缺陷态接近导带底,并且通过强激光脉冲辐照容易电离;深缺陷态远离导带,需要吸收多个光子产生电离,如图 4 所示。由于中间态的存在,导致多脉冲损伤阈值小于单脉冲损伤阈值。为了消除中间态对损伤阈值的影响,2009年,D. N. Nguyen 等人^[29]采用双离子束辅助沉积技术制备具有氮掺杂(原子密度 5%)的

HfO_2 薄膜。氮掺杂能够改变与氧空位相关的浅缺陷态的性质,消除浅缺陷态或改变它们的弛豫动力学,从而改善氮掺杂薄膜在 800 nm 波长、800 fs 脉冲宽度的多脉冲辐照下薄膜损伤特性,且损伤阈值不随辐照次数增加而降低。氮的掺杂仅限于补偿存在的氧空位,过量的氮原子在薄膜中则会形成缺陷,在 800 nm 波长、50 fs 脉冲宽度的多脉冲辐照下,薄膜损伤阈值随辐照次数增加而急剧降低。

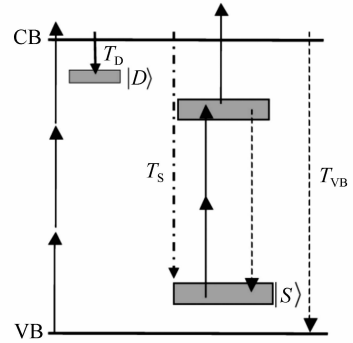


图 4 具有中间态的 Ta_2O_5 能级图^[28]

Fig. 4 Energy level of Ta_2O_5 with intermediate states^[28]

多脉冲辐照对薄膜的损伤虽然可以用包括热积累和电子积累的累积效应加以解释,但是至今对多脉冲效应的机制和模型尚未见完善的解释及报道,对于多脉冲效应仍然有待发现和探索。

3.1.4 激光重复频率

激光重复频率的差异同样会导致薄膜损伤阈值发生改变。对于单脉冲或者低重复频率脉冲激光而言,由于热扩散和热损耗的影响,薄膜吸收激光能量引起的温升会在极短时间(1 μs)内恢复到室温,薄膜在激光辐照时可能产生的轻微形变能够随着薄膜温度的下降而得到恢复。但是在高重复频率脉冲激光下,由于前一个脉冲产生的热量尚未得到完全扩散,后一个脉冲便再次作用到薄膜上,在薄膜上产生热积累效应,最终导致薄膜发生损伤。通常薄膜在单脉冲或低重复频率脉冲激光辐照下损伤阈值大于高重复频率脉冲激光。2007年,代福等人^[30]利用介质薄膜中包裹物的热理论模型从理论上分析了重复频率分别为 10、100、1 kHz 和 10 kHz 的脉冲激光(1 064 nm、200 ns)对 HfO_2 薄膜损伤阈值的影响,结果如图 5

所示。从图中可以看出重复频率越高,热积累越严重,薄膜损伤阈值也相应的呈线性下降。2014年,代福等人^[31]研究了高重复频率(10 kHz)DPL(激光二极管泵浦固体激光器)辐照 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 高反膜的损伤特性。结果表明高重复频率下激光辐照产生的薄膜损伤是由场效应和热效应共同作用的结果。薄膜吸收率较小时,场效应占主导地位,而吸收率较大时,热效应起决定作用。2015年,Benedek J. Nagy 等人^[32]研究了重复频率为 1 kHz,脉宽 91 fs,波长 795 nm 和重复频率为 4.3 MHz,脉宽为 87~128 fs,波长 805 nm 两种激光器对金膜、银膜以及 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 高反膜损伤阈值的影响。结果发现所有样品在 1 kHz 激光辐照下损伤阈值均大于 4.3 MHz 激光。此外, $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 高反膜在这两种不同重复频率激光辐照下损伤阈值变化幅度远小于金膜和银膜,作者认为热导率差异是导致损伤阈值变化幅度不同的主要因素。

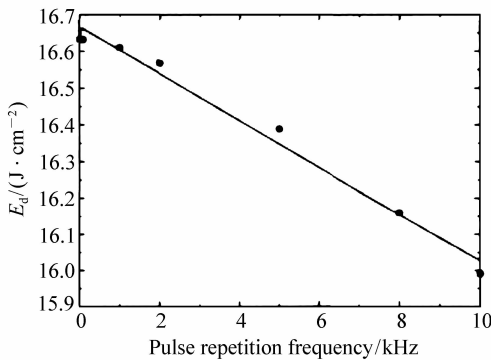


图5 脉冲重复频率与激光损伤阈值之间的关系^[30]

Fig. 5 Damage threshold vs pulse repetition frequency^[30]

热积累是高重复频率脉冲激光降低薄膜损伤阈值的主要原因,而提高薄膜的热导率,能够有效降低热积累效应。热退火是提高薄膜热导率的一种有效方法。因此未来用于高重复频率脉冲激光系统中的薄膜可以先进行热退火工艺,提高薄膜堆积密度与热扩散能力,从而提升薄膜损伤阈值。

3.2 薄膜特性对损伤阈值的影响

3.2.1 场强分布

激光具有单色性和相干性。激光在高反膜中每传播一层就有一部分光束被反射回来,被反射回来的光束与入射光束发生干涉叠加形成驻波,波峰处能量最大材料对激光的吸收最强,而波谷

处吸收最弱。根据光学薄膜电场分布理论可以求出高反膜中场强分布。不同高反膜结构内场强分布和峰值强度不同,研究高反膜结构对驻波场强的影响,优化场强分布,减低峰值强度,对提高高反膜抗激光损伤能力具有一定的意义。

2006年,B. Wu 等人^[33]以 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 高反膜为研究对象,使用 800 nm 波长、130 fs 脉宽的激光辐照 $(\text{HL})^8\text{HLH}$ 和 $(\text{HL})^8\text{H2LH}$ 高反膜,其场强分布如图 6 所示。由于 $(\text{HL})^8\text{H2LH}$ 场强峰值强度显著增强,其损伤阈值如预期一样大幅下降。2017年,SIMAS MELNIKAS^[34]等人研究了电场分布对 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 啁啾镜薄膜损伤阈值的影响,测试的激光波长为 1 030 nm (100 fs),重复频率为 50 kHz。研究表明,损伤起始层通常位于电场分布峰值处,并且通过电场分布优化,将电场峰值转移至低折射率材料层中 (SiO_2),可具有更高的 LIDT。而张金胜等人^[35]借助光学传输矩阵开展分析研究,通过优化设计薄膜结构,成功地将高反膜中场强最大区域移出界面,降低了光场对薄膜的损伤。优化前后薄膜内电场分布如图 7(a)、7(b)所示。激光器 P-I 特性表明失效电流提高 60%,输出功率提高了 52.6%。

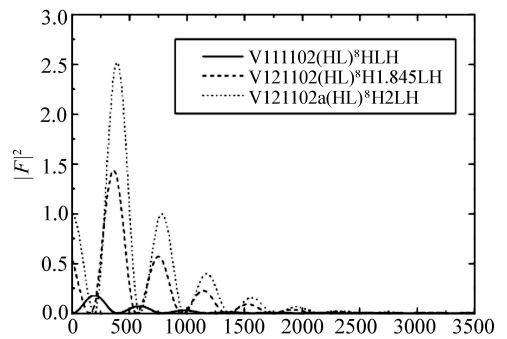
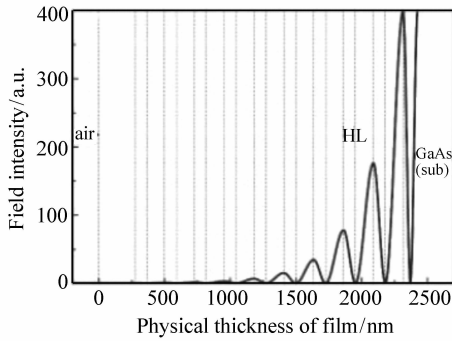


图6 $(\text{HL})^8\text{HLH}$, $(\text{HL})^8\text{H2LH}$ 以及 $(\text{HL})^8\text{H1.845LH}$ 场强分布^[33]

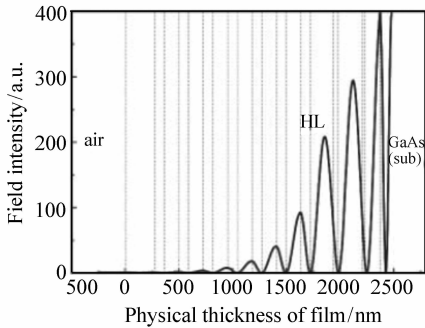
Fig. 6 Field intensity distributions of $(\text{HL})^8\text{HLH}$, $(\text{HL})^8\text{H2LH}$ and $(\text{HL})^8\text{H1.845LH}$ ^[33]

目前调整高反膜内驻波场强分布和峰值强度是提高高反膜抗激光损伤的一种有效方法,高反膜由高、低折射率材料交替堆积而成,但材料之间的突变界面是堆积中最敏感的部分,每层材料沉积过程的中断被认为是增加薄膜缺陷密度的主要



(a) 常规薄膜电场分布

(a) Electric field distribution of conventional thin film



(b) 优化的薄膜电场分布

(b) Optimized film electric field distribution

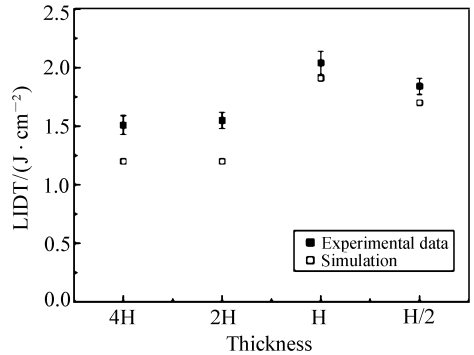
图 7 薄膜电场分布^[35]Fig. 7 Film electric field distribution^[35]

原因^[36]。通过改变薄膜材料、各层厚度等参数,优化驻波场强分布和峰值强度,令峰值区域分布于低吸收材料中,避开膜层界面,可以有效降低薄膜吸收的辐照能量,最终达到提高损伤阈值的目的。

3.2.2 薄膜厚度

过厚的薄膜存在龟裂和脱落等现象,严重削弱薄膜牢固度,减低薄膜抗高功率激光损伤能力。此外,薄膜材料对激光辐照存在线性吸收和非线性吸收,非线性吸收指材料导带中产生自由电子所吸收的能量,而线性吸收则是由自由态和结合态之间的缺陷状态引起的。对于吸收系数大的薄膜来说,随着厚度的增加薄膜光学损耗大幅提升,薄膜材料将吸收更多的能量,从而易于产生损伤。M. Turowski 等人^[37]针对 fs 脉冲下熔石英的非线性吸收以及损伤阈值开展了研究。研究表明,不同种熔石英,非线性吸收越强损伤阈值越小。对于同一种熔石英,损伤阈值随着熔石英厚度增加而减小,当厚度超过 3 mm 时,损伤阈值基本不

变。因此,在光学元件的制作中,光学元件的设计应在满足光学特性、牢固度、可靠性等要求的基础上尽可能减薄其厚度。而 2010 年, B. Mangote 等人^[38]以 Ta₂O₅ 单层膜为例,研究了波长 1 030 nm、脉宽 524 fs 激光脉冲对膜层厚度的影响。实验发现膜层越厚,损伤阈值越低。在 fs 级和 subps 级脉宽激光脉冲期间,薄膜材料介电函数变化会引起瞬态干涉效应,令多层薄膜中电子密度分布产生反馈效应导致电场重新分布。同一年, Laurent Gallais^[39]在自由电子产生速率方程中添加了电场的空间和时间变化模型,从理论上较好地解释了损伤阈值随膜层厚度增加而降低的现象,如图 8 所示。当薄膜增加到一定厚度时,激光损伤阈值趋于恒定。

图 8 实验测量与理论预测结果比较。H 表示四分之一波长($\lambda = 1\ 030\ \text{nm}$)厚度^[38]Fig. 8 Comparison between experimental measurement and theoretical prediction. H represents a quarter wavelength($\lambda = 1\ 030\ \text{nm}$) thickness^[38]

膜层厚度导致损伤阈值改变的主要原因在于薄膜内部场强得到了重新分布,改变了场强峰值强度。当峰值强度提高时薄膜易于发生损伤,当峰值强度降低时薄膜则不易产生损伤,在损伤阈值上对应表现为降低和增加。

3.2.3 光学薄膜材料

常规高反膜由具有高、低折射率的两种材料相互交替堆积构成。由于薄膜材料存在老化和吸水作用,长期处于恶劣环境中会导致高反膜光谱发生严重偏移,影响光学器件稳定性和可靠性。为了克服光谱偏移对光学器件的影响,通常选用折射率较大的材料如 TiO₂、Nb₂O₅、Ta₂O₅^[40]等拓宽高反膜反射谱宽度。但是,高折射率材料抗激

光损伤能力相对较低,为了获得宽反射谱、高损伤阈值的高反膜,往往采用复合薄膜结构。复合薄膜是由3种或3种以上材料相互堆积构成,为了同时满足反射谱宽度和损伤阈值的要求,通常使用高损伤阈值材料部分代替常规薄膜中高折射率材料,形成复合薄膜。复合薄膜结构虽然会损失部分反射谱宽度,但能够有效地提高薄膜抗激光损伤能力。

2014年,John Bellum等人^[41]使用HfO₂代替TiO₂/SiO₂薄膜中部分TiO₂,发现反射带宽随HfO₂代替TiO₂层数的增加而线性减小。采用ns级激光脉冲测试薄膜损伤阈值,结果表明随着HfO₂层数的增加,损伤阈值也呈线性增加。这是因为随着越来越多的外层TiO₂层被HfO₂层代替,内部TiO₂层受到损伤所需的辐照能量增加,并且在内部TiO₂层损伤之前外部HfO₂层尚未发生损伤。由于ns级脉宽辐照时决定损伤阈值的主要因素

是薄膜缺陷和杂质等,John Bellum等人^[42]在2017年又设计了三套薄膜分别为TiO₂/SiO₂、HfO₂/SiO₂以及含有5对HfO₂/SiO₂外层的TiO₂/SiO₂。经800 nm波长、100 fs脉宽激光脉冲测试表明,含有5对HfO₂/SiO₂外层的TiO₂/SiO₂薄膜抗激光损伤能力最强,达到了0.95 J/cm²,相比于全部为TiO₂/SiO₂薄膜提高了80%,且反射谱宽度损失很小。2017年,JINLONG ZHANG^[43]等人运用类似方法研究了44层Ta₂O₅/SiO₂高反膜,使用4层HfO₂/SiO₂代替最外侧4层Ta₂O₅/SiO₂,同时设计了56层非四分之一波长光学厚度HfO₂/SiO₂高反膜,两者场强分布与相对强度如图9所示。780 nm波长、0.2 ns脉宽激光脉冲测试表明,Ta₂O₅/HfO₂/SiO₂复合高反膜损伤阈值明显高于非四分之一波长光学厚度HfO₂/SiO₂。

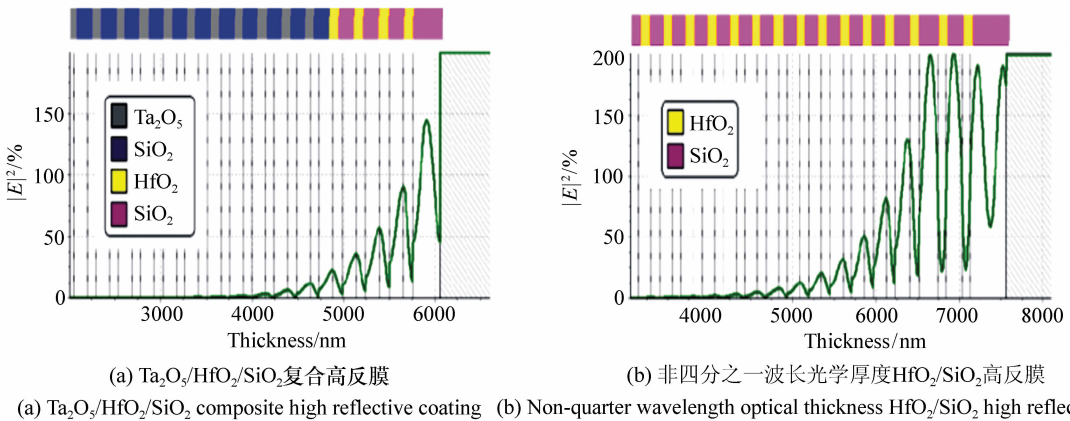


图9 两套薄膜电场分布^[43]

Fig. 9 Electric field distributions of two sets of films^[43]

激光与薄膜的相互作用体现为两点,一是驻波场分布,二是热效应。复合高反膜的设计主要通过改变驻波场分布和峰值区材料来提高薄膜抗激光损伤能力。高反膜由多层薄膜堆积而成,且强驻波场主要分布在最外侧几层,因此使用高损伤阈值材料代替部分易损伤材料,在增强薄膜抗激光损伤能力的同时,并不会对薄膜反射谱带宽产生较大影响。

3.3 后工艺处理对损伤阈值的影响

后工艺处理是提升高反膜抗激光损伤能力最后的保障,主要通过物理机制减少甚至消除镀膜

工艺中引入的杂质和缺陷。其中激光预处理、热退火、等离子体后处理以及镀制保护膜是提高光学薄膜抗激光损伤能力的重要后工艺处理技术。

3.3.1 激光预处理

激光预处理指使用低于1-on-1损伤阈值的功率密度辐照光学薄膜,从而提高其损伤阈值。2009年,刘晓凤等人^[44]采用1 064 nm波长、9 ns脉宽的激光脉冲辐照HfO₂/SiO₂高反膜,由于包含有激光预处理过程,R-on-1测试的损伤阈值是1-on-1测试的3倍。其认为激光预处理提高损伤阈值的主要机制是低功率密度激光辐照增加了缺

陷与周围膜料的结合力,只有更强的激光功率密度才能破坏此结合力。而刘杰等人^[45]利用单台阶能量光栅扫描以及 R-on-1 方式对 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 高反膜进行激光预处理。单台阶能量光栅扫描预处理指首先采用 1-on-1 测试方式拟合出零几率损伤的能量,之后采用零几率损伤能量的 $n\%$ 对同一样品未辐照区间进行光栅扫描,随后采用 1-on-1 测试对光栅扫描区域进行阈值损伤测试拟合出预处理之后的损伤阈值。实验表明经单台阶能量光栅扫描预处理和 R-on-1 方式预处理后,薄膜损伤阈值分别提高了 38% 和 30%。2016 年,吴倩^[46]等人运用 3 倍频激光对氧化铪薄膜进行激光预处理,激光预处理过程分别采用一步法(50% 初始损伤阈值)和两步法(依次采用 50%、80% 初始损伤阈值),实验结果表明激光预处理能够有效去除吸收缺陷,且两步法比一步法获得的损伤阈值更高,损伤阈值分别提高了 15% 和 34%。2017 年,刘志超^[47]等人研究了 1 064 nm 激光预处理对 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 反射膜损伤形态转化影响。研究发现激光预处理的目的在于抑制等离子体烧蚀类损伤(轻微损伤)向分层剥落类损伤(严重损伤)转变,通过优化激光预处理参数,薄膜零几率损伤形态转化阈值最高可以提升 140%。预处理的激光功率大小对损伤阈值改善具有显著影响,因此选择恰当的预处理激光功率密度对高反膜损伤阈值改善具有重要意义。

目前,对激光预处理提高薄膜损伤阈值的机制还具有争议,尚缺少可以有效解释激光预处理的理论和模型。但研究者普遍认为,低功率密度辐照薄膜时,薄膜内部分杂质和缺陷消熔,增加了缺陷与膜料的结合力,提高了薄膜机械力,因此在大功率密度辐照时不易发生灾难性损伤^[48]。王永忠等人认为激光预处理机制是低能量激光辐照时激发掉易引发损伤的核。与薄膜层数、密度无关,只与缺陷有关^[49]。

3.3.2 热退火

热退火工艺可以提高薄膜损伤阈值主要有两个原因。一是高温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,减少由镀膜过程产生的氧空隙,宏观上表现为薄膜厚度减小;二是薄膜晶粒尺寸随温度增加

而增加,而晶粒尺寸的增大改善了薄膜热导率。薄膜热导率增加使得缺陷处热量迅速扩散,避免局部区域温度过高。2016 年,SHUVENDU JENA 等人^[50]运用热退火工艺(300 °C、400 °C、500 °C)处理了 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 高反膜,薄膜结构为 G|(HL)¹²H|AIR,其中 G 为 BK7 玻璃,H 和 L 分别为 HfO_2 和 SiO_2 。经 532 nm 波长、7 ns 脉宽激光脉冲损伤阈值测试获得的结果列于表 2。薄膜损伤阈值随退火温度升高而增加,而当 500 °C 时,过高的退火温度会产生过量拉伸应力,导致表面形成裂纹,从而使得损伤阈值下降,但仍然高于未退火时损伤阈值。2017 年,Tan Ting-Ting^[51]等人研究了热退火工艺(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升高,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/cm²。

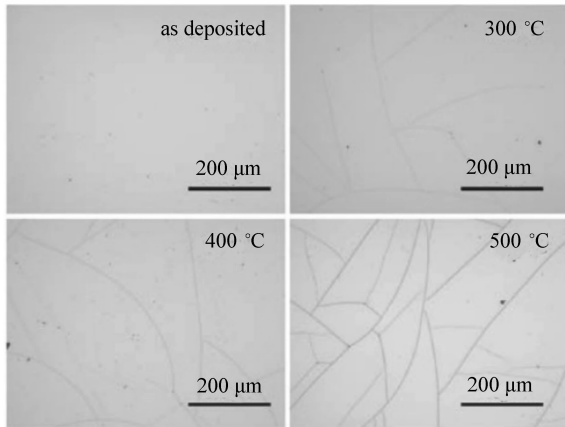
表 2 不同退火温度下的晶粒尺寸与损伤阈值^[50]

Tab.2 Grain sizes and damage thresholds at different annealing temperatures^[50]

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

退火时伴随着薄膜应力的转变,温度过高会产生过量拉伸力,对薄膜质量起消极影响。2017 年,S Jena^[52]等人在 300、400 和 500 °C 条件下研究了退火温度对 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 高反膜的影响。实验结果发现,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,发现退火之后薄膜损伤阈值有所降低且在表面形成裂纹,如图 10 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。

热退火对高反膜损伤阈值起积极作用还是消极作用主要取决于退火温度,温度过高则会产生过量拉伸应力,在高反膜表面形成裂纹。裂纹的

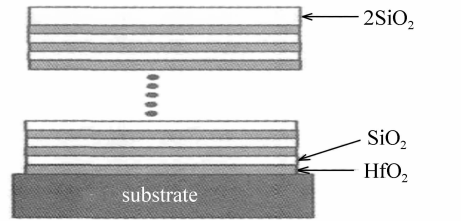
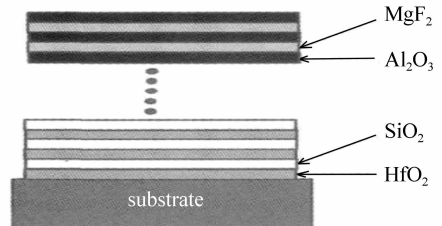
图10 不同温度下裂纹密度^[52]Fig. 10 Crack densities at different temperatures^[52]

影响主要有3个方面,一是强化了由干涉产生的场强,二是增强了高反膜缺陷的吸收,三是降低高反膜机械牢固性^[53]。因此,只有选择合适的退火温度才能够有效提高高反膜的损伤阈值。虽然过高的退火温度会对TiO₂/SiO₂薄膜损伤阈值产生消极影响,但可以增加高反膜反射谱宽度。此外,激光预处理一定程度上会提高损伤阈值,在未来的薄膜研究中可以考虑这两种处理方式结合使用以获得高损伤阈值、宽反射谱的高反膜。

3.3.3 保护膜

不改变薄膜反射率和驻波场分布的前提下,在薄膜最外层镀制一层薄膜形成保护膜,可以增强薄膜致密性,降低薄膜表面形貌缺陷密度,提高抗环境因素能力和抗激光损伤能力。目前通常使用的保护膜材料为SiO₂、MgF₂、Al₂O₃等,保护膜的光学厚度为二分之一波长的整数倍。刘晓凤等人^[54]设计了两套对比薄膜。常规高反膜结构为G|(2H2L)¹²2H|Air;具有保护膜的高反膜结构为G|(2H2L)¹²2H4L|Air,其中H为HfO₂,L为SiO₂。1 064 nm波长、9 ns脉宽的激光脉冲损伤测试表明,保护膜的存在可以令高反膜的损伤阈值从6.0 J/cm²提高到9.6 J/cm²,损伤形态也由膜层脱落转变为等离子体烧蚀损伤。刘凤娟等人^[55]研究了248 nm高反膜抗激光损伤性能,他们镀制了具有SiO₂保护膜和Al₂O₃/MgF₂保护膜两套薄膜,如图11(a)、11(b)所示。经248 nm波长、913 ns脉宽的激光脉冲损伤测试,表明保护膜

的存在可以提高薄膜的损伤阈值,但由于Al₂O₃和MgF₂热膨胀系数不同,该薄膜相对于具有SiO₂保护膜的薄膜易受到损伤。

(a) SiO₂保护膜薄膜结构(a) Structure of SiO₂ protective film(b) Al₂O₃/MgF₂保护膜薄膜结构(b) Structure of Al₂O₃/MgF₂ protective film图11 不同材料保护膜结构^[58]Fig. 11 Structures of protective film with different materials^[58]

普遍认为,保护膜能够改善薄膜表面形态,降低表面缺陷引起的损伤,从而提高激光损伤阈值。SiO₂保护层的存在能够有效克服膜层脱落问题,改善薄膜表面形态,增加薄膜机械力,使得薄膜需要吸收更多能量才能冲破表层形成损伤。另外,对于保护膜的选材,不仅需要考虑材料本征吸收和工艺制备复杂度,更需要充分考虑材料的热膨胀系数以及热导率。改善薄膜镀膜环境,减少薄膜中缺陷和杂质,获得高纯度光学薄膜同样能够提高薄膜的损伤阈值。

3.4 其它因素对损伤阈值影响

3.4.1 工作温度

当激光辐照高反膜时,由于吸收杂质的存在,高反膜局部温度会急剧升高(~10³ K),高温不仅使得薄膜材料发生消融、气化、产生强等离子等,还会改变薄膜材料晶相,促进薄膜结晶,产生微晶体。非晶相和晶相之间的光学、机械性能存在较大差异,加剧了薄膜损伤的形成。2012年,Ryo Tateno等人^[56]对HfO₂/SiO₂高反膜损伤机理进行

了详细研究,研究中采用的激光脉冲宽度为 8 ns, 波长为 1 064 nm。研究发现,薄膜损伤形成之前,由于 HfO_2 吸收大量能量产生高温,使得非晶态 HfO_2 发生结晶,如图 12 所示。这降低了高反膜抗激光损伤能力,并导致损伤阈值随晶体数量的增加进一步降低。

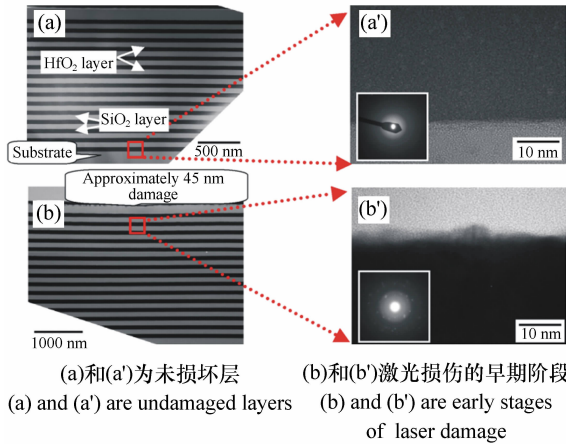


图 12 高反膜的 TEM 图和高折射率层 (HfO_2) 材料的电子衍射图^[56]

Fig. 12 TEM image of the high reflective coating and the electron diffraction pattern of the high refractive index layer (HfO_2) material^[56]

K. Mikami 等人^[57] 使用脉宽为 4 ns 的 Nd:YAG 1 064 nm 激光和脉宽分别为 100 fs、2 ps、200 ps 的钛:蓝宝石 800 nm 激光研究了光学薄膜激光诱导损伤阈值对温度的依赖性。在实验中,他们分别对 SiO_2 、 Al_2O_3 、 HfO_2 、 ZrO_2 、 Ta_2O_5 和 MgF_2 进行了研究。实验结果表明,光学薄膜损伤阈值对温度的依赖性随脉冲宽度发生变化。fs 以上的脉冲,单层薄膜的激光诱导损伤阈值随温度的降低而增加;而对于 fs 脉冲,单层薄膜损伤阈值随温度降低而降低。其中材料电阻率是影响损伤阈值对温度依赖的关键参数。2014 年,Cheng Xu 等人^[58] 利用双离子束溅射法制备了单层 Ta_2O_5 薄膜,采用波长为 1 064 nm、脉宽为 12 ns 的激光辐照此薄膜,研究了该薄膜在不同温度氛围中损伤阈值变化情况。测试光路图如图 13 所示。研究表明薄膜损伤阈值的降低与温度变化不成比例,低温时(298 K 升温至 383 K),损伤阈值降低幅度较为明显,而高温时(473 K 升温至

633 K),损伤阈值的降低趋缓。

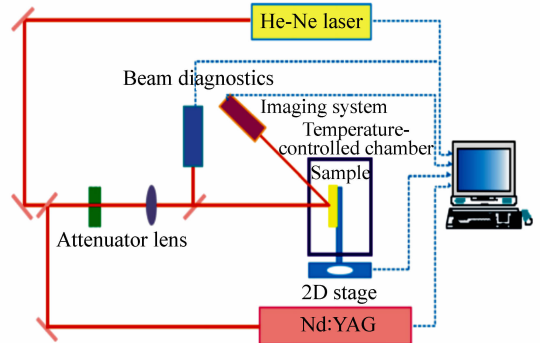


图 13 损伤阈值测试光路^[61]

Fig. 13 Test light path of damage threshold^[61]

因此,对于构建损伤物理模型时,除了通常认为的空隙、杂质等会促进光学薄膜损伤之外,温度也是一个重要参数。温度不同会导致薄膜损伤机理发生改变,还可能改变薄膜材料的晶相,导致不同膜层物理性质发生巨变。由于薄膜会在不同环境温度下工作,所以开展温度对薄膜损伤影响的研究具有更为重要的实用价值。

3.4.2 镀膜真空度

除了薄膜材料的选择及后工艺处理外,在较高真空度($\sim 10^{-6}$ Torr)进行镀膜和保持镀膜腔室内洁净度也是获得高损伤阈值高反膜的必备条件。无论是电子束镀膜还是磁控溅射镀膜,都离不开一定的真空度。腔室内真空度过低,必然存在其余气体分子,增加了蒸发产生的膜料分子与气体碰撞几率,减弱了薄膜材料的附着力和机械力;而真空度过高,虽然能保持腔室内的洁净度,但会导致一些膜料分子在未到达基底时便被分子泵和机械泵抽出腔室,增加了薄膜表面粗糙度^[59]。2015 年,Ella S. Field 等人^[60] 利用电子束真空镀膜机制备了 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 增透膜和高反射膜。对于高反膜,真空度越低,薄膜反射谱宽度越宽,损伤阈值越低;而对于增透膜,真空度降低对其光学特性和损伤阈值基本没有影响。

4 提高光学薄膜损伤阈值方法

随着激光系统功率的不断提升,研制高质量光学薄膜已经成为亟需解决的问题。提高薄膜损

伤阈值是激光系统输出功率进一步提升的基本保障。目前提升薄膜抗激光损伤能力有如下几个方法:一,优化薄膜驻波场分布,减小驻波场峰值强度,转移驻波场峰值位置至低吸收材料中。由于驻波场强度随着薄膜位置的深入急剧降低,激光辐照对薄膜内部损伤几率大幅减小。对于优化后的薄膜,无论损伤发生于外部材料还是内部材料,损伤阈值相比于原始薄膜均会有所提高。二,选用高损伤阈值材料。目前,常用的高折射率材料中 HfO_2 带隙最宽,对应的损伤阈值也最高,低折射率材料中 SiO_2 损伤阈值最高。 HfO_2 虽然具有高损伤阈值,但其折射率远低于其它高折射率材料。而对于宽反射谱薄膜而言, TiO_2 、 Nb_2O_5 等高折射率材料是最佳选择,但会面临薄膜损伤阈值低的严峻问题。因此可以考虑设计复合薄膜,虽然会损失一定反射谱带宽,但能够有效提高薄膜损伤阈值。此外薄膜材料热导率是影响损伤阈值的重要因素,高热导率材料能够将激光辐照产生的热量及时扩散出去,避免薄膜局部区域温度急剧升高导致损伤,从而提高损伤阈值。未来在薄膜材料探索研究过程中,具有高折射率、高损伤阈值、高热导率、低膨胀系数等特性的材料是重点开发对象。三,薄膜后工艺处理。热退火、激光预处理、等离子体后处理都是常见的后工艺处理方式。热退火能够降低薄膜空隙,提高薄膜致密性,减小薄膜光学厚度,扩展薄膜反射谱宽度。但是,高温易对薄膜产生过量张应力,反而降低薄膜的损伤阈值。因此,优化温度是热退火工艺的关键,也直接决定着薄膜损伤阈值大小。激光预处理通过消融嵌入颗粒和杂质,减少缺陷密度,增加杂质与周围膜料结合力,从机械力角度改善薄膜牢固度。等离子体后处理主要是通过 Ar 、 O_2 等气体离子去

除薄膜表面不牢固原子,在级联碰撞作用下分解薄膜内部缺陷,增加薄膜致密性。但是,等离子体能量过大会增加薄膜表面粗糙度,降低薄膜抗激光损伤能力,因此恰当选择等离子体能量是等离子体后处理的关键。优化并综合运用常规预处理方式、探索新型预处理技术是改善薄膜质量的关键。四,保护膜的选择。在不改变薄膜光谱特性情况下合理选择保护膜,不仅能够延长薄膜使用寿命,提高抗环境因素能力,还能阻挡由热效应产生的冲击力,提升冲出膜层表面形成损伤所需的功率密度。

表3列举了国内外近几年具有代表性的研究成果。国外早在20世纪六七十年代就已经开始针对薄膜的损伤展开研究,主要包美国劳伦斯·利佛摩尔国家实验室(LLNL)、德国汉诺威激光中心等国际著名研究机构,通过对薄膜损伤理论的深入研究、镀膜工艺的优化、膜系结构的改善以及薄膜后工艺的运用,薄膜损伤阈值已经获得大幅提高。汉诺威激光中心通过膜料的混合,制备的反射膜损伤阈值达到 170 J/cm^2 ($1\ 064 \text{ nm}$, 12 ns),而科罗拉多州立大学通过对薄膜结构的优化获得了 174 J/cm^2 的损伤阈值($1\ 030 \text{ nm}$, 4 ns)。我国对薄膜损伤研究相对较晚,但经过这些年的长足发展,我国制备的薄膜抗激光能力有了显著提高,同济大学制备的高反膜损伤阈值大于 167 J/cm^2 ($1\ 064 \text{ nm}$, 10 ns),薄膜抗激光能力在目前研究报道中处于领先水平^[61]。另外,2012年和2013年,上海光学精密机械研究所在国际光学工程学会(SPIE)举办的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^[62]。虽然我国镀膜水平已达到国际水平,但国产的镀膜设备远落后于国外,主

表3 国内外高反膜损伤研究成果

Tab.3 Research results of high reflective film damage at home and abroad

年份	单位	激光特性	薄膜材料	损伤阈值/($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$)
2010 ^[63]	同济大学	1 064 nm、3 ns	HfO_2 、 SiO_2	105.2
2011 ^[64]	汉诺威激光中心	1 064 nm、12 ns	HfO_2 与 Al_2O_3 按一定比例混合、 SiO_2	175
2014 ^[65]	同济大学	1 064 nm、10 ns	HfO_2 、 SiO_2	234
2015 ^[66]	布赫斯特技术学院	1 064 nm、5.5 ns	Ta_2O_5 、 SiO_2	90
2016 ^[67]	科罗拉多州立大学	1 030 nm、4 ns	Ta_2O_5 、 HfO_2 、 SiO_2	174
2016 ^[61]	同济大学	1 064 nm、10 ns	未知	>167

要表现在自动化程度低、可靠性差以及膜层厚度控制精度低等方面。

我国虽然早在 20 世纪 70 年代就已经开始针对薄膜的损伤阈值机理开展了研究,但是到目前为止,对薄膜损伤机理的研究仍然停留在分类研究阶段,尚未发展出能概括已获得结论的综合性模型。已有的物理模型仅能够较为准确地预测特定脉冲宽度、脉冲波段的损伤阈值变化趋势,一旦物理条件发生改变,计算结果将明显偏离实验结果。为此,探索构建综合性物理模型,建立完善的损伤机理理论仍然是未来薄膜发展的重点和难点。

5 结束语

光学薄膜作为光学系统中最重要且易损伤的光学元件,其使用寿命、抗损伤能力直接决定着光学系统的稳定性。薄膜损伤是一个综合且复杂的过程,涉及众多物理特性。随着光学系统不断完

善、输出功率稳健提升、远红外/紫外波段的发展,对薄膜抗损伤特性提出了更高要求。深入探索光学薄膜损伤,完善薄膜损伤理论,除研究本质损伤机理之外,还需积极探索外部损伤机理。在薄膜损伤过程中,通常是外部原因起主导作用。

目前,薄膜抗损伤性能的研究重点集中在 fs 级脉宽激光损伤方面,并取得了较好的理论成果。虽然理论数据与实验结果存在一定差异,但随着研究不断的深入,在常规物理模型中考虑相关损伤机制,已经能够预测薄膜的损伤阈值。而对于 ns 以上脉冲辐照导致薄膜损伤的研究相对较少,此时损伤主要由外在因素导致,其理论和模型尚有待完善。由于实际镀膜工艺和光学薄膜的应用中,无法完全避免薄膜裂纹、形变、嵌入颗粒、高价态杂质等缺陷的形成,因此在探索薄膜损伤的过程中,完善 ns 以上脉宽激光辐照导致薄膜损伤的机理,探索研究薄膜缺陷等外在薄膜损伤因素具有重要的参考价值和深远意义。

参考文献:

- [1] SOULARD R, QUINN M N, TAJIMA T, *et al.*. ICAN: a novel laser architecture for space debris removal[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 105(1): 192-200.
- [2] GAO Y K. Improvement of fatigue property in 7050-T7451 aluminum alloy by laser peening and shot peening[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2011, 528(10-11): 3823-3828.
- [3] TOSHIKI T, DIETRICH H, YAN X Q. Laser acceleration of ions for radiation therapy[J]. *Reviews of Accelerator Science & Technology*, 2009, 2(1): 201-228.
- [4] ALVAREZ J, MIMA K, TANAKA K A, *et al.*. Ultraintense lasers as a promising research tool for fusion material testing: production of ions, X-rays and neutrons[J]. *Plasma & Fusion Research*, 2013, 3404055: 1-8.
- [5] 杨道奇, 付秀华, 耿似玉, 等. 0.6 ~ 1.55 μm 可见/近红外超宽带增透膜的研制[J]. *中国光学*, 2012, 5(3): 270-276.
YANG D Q, FU X H, GENG S Y, *et al.*. Design and fabrication of 0.6 - 1.55 μm visible/near infrared ultra-broad band antireflection coatings[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 270-276. (in Chinese)
- [6] 孙梦至, 王彤彤, 王延超, 等. 大口径反射镜高反射膜研究进展[J]. *中国光学*, 2016, 9(2): 203-212.
SUN M ZH, WANG T T, WANG Y CH, *et al.*. Research development of high reflecting coating for large-diameter mirror [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(2): 203-212. (in Chinese)
- [7] 董小燕, 龚斌, 李雅丽. 光学薄膜及其应用方面的研究[J]. *物理与工程*, 2012, 22(5): 14-18.
DONG X Y, GONG B, LI Y L. Study on optical film and relevant applications[J]. *Physics and Engineering*, 2012, 22(5): 14-18. (in Chinese)
- [8] DANSON C, HILLIER D, HOPPS N, *et al.*. Petawatt class lasers worldwide[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2015, 3(1): 5-18.
- [9] International Organization for Standardization. Lasers and laser-related equipment-determination of laser-induced damage threshold of optical surfaces-Part 1: 1-On-1 Test[R]. ISO 11254-1, 2000.
- [10] International Organization for Standardization. Lasers and laser-related equipment-determination of laser-induced damage

threshold of optical surfaces-part 2;S-On-1 Test[R]. ISO 11254-2,2001.

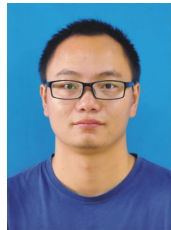
- [11] WOLFE,JUSTIN. Small optics laser damage test procedure[R]. United States. Lawrence Livermore National Lab. (LLNL),Livermore,CA(United States),2017.
- [12] DANILE Y K. The mechanism of laser-induced damage in transparent materials, caused by thermal explosion of absorbing inhomogeneities[J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*,1978,8(8):116-118.
- [13] GARNOV S V,EPIFANOV A S,KLIMENTOV S M,*et al.*. Pulse-width dependence of laser damage in optical materials; critical analysis of available data and recent results for nanopicosecond region[C]. 24th annual Boulder Damage Symp on optical Materials for High Power Lasers,1993,1848(9):403-414.
- [14] YAO J,MA J,XIU C,*et al.*. Laser-induced damage of TiO₂/SiO₂ high reflector at 1 064 nm[J]. *Journal of Applied Physics*,2008,103(8):1-5.
- [15] KAISER A,RETHFELD B,VICANEK M,*et al.*. Microscopic processes in dielectrics under irradiation by subpicosecond laser pulses[J]. *Physical Review B*,2000,61(17):11437-11450.
- [16] SANNER N. Damage and ablation thresholds of fused-silica in femtosecond regime[J]. *Physical Review B Condensed Matter & Materials Physics*,2011,84(9):2669-2674.
- [17] 代福,熊胜明.光斑尺寸对光学薄膜元件温升的影响[J]. *强激光与粒子束*,2007,19(12):1983-1986.
DAI F,XIONG SH M. Laser beam diameter effect on temperature rise of films[J]. *High Power Laser and Particle Beams*,2007,19(12):1983-1986. (in Chinese)
- [18] 陈为兰,顾培夫,王颖,等.红外薄膜中热应力的研究[J]. *物理学报*,2008,57(7):4316-4321.
CHEN W L,GU P F,WANG Y,*et al.*. Analysis of the thermal stress in infrared films[J]. *Acta Physica Sinica*,2008,57(7):4316-4321. (in Chinese)
- [19] WANG ZH SH,MA H P,CHENG X B,*et al.*. Nanosecond laser-induced damage of high-reflection coatings:NUV through NIR[C]. 48th SPIE Annual Laser Damage Symposium on Optical Materials for High-Power Lasers,2016,10014:1001409-1-10.
- [20] 李大伟,陶春先,李笑,等.1 064 nm 与 532 nm 激光对电子束蒸发制备的 HfO₂/SiO₂ 高反膜损伤比较[J]. *强激光与粒子束*,2008,20(9):1457-1460.
LI D W,TAO CH X,LI X,*et al.*. Comparison of laser induced damage at 1 064 nm and 532 nm to high-reflective film HfO₂/SiO₂ fabricated by electron beam evaporation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*,2008,20(9):1457-1460. (in Chinese)
- [21] JUPÉ M,JENSEN L,STARKE K,*et al.*. Analysis in wavelength dependence of electronic damage[J]. *Proc Spie*,2009,7504:75040N-1-12.
- [22] 徐均琪,王建,李绵,等.钛酸钡薄膜在 1 064 nm/532 nm 波长激光辐照下的光学特性[J]. *光子学报*,2018,47(2):1-7.
XU J Q,WANG J,LI M,*et al.*. Optical properties of lanthanum titanate films irradiated by lasers with the wavelengths of 1 064 nm and 532 nm[J]. *Acta Photonica Sinica*,2018,47(2):1-7. (in Chinese)
- [23] 王涛,赵元安,黄建兵,等.多脉冲激光作用下光学薄膜损伤的累积效应[J]. *光子学报*,2006,35(6):859-862.
WANG T,ZHAO Y A,HUANG J B,*et al.*. Accumulation effect of multi-shot laser induced damage to optical coatings [J]. *Acta Photonica Sinica*,2006,35(6):859-862. (in Chinese)
- [24] 袁磊,赵元安,贺洪波,等.单脉冲和多脉冲飞秒激光对单层光学薄膜的损伤[J]. *强激光与粒子束*,2006,18(4):595-598.
YUAN L,ZHAO Y A,HE H B,*et al.*. Single-pulse and multi-pulse femtosecond laser damage of optical single films[J]. *High Power Laser and Particle Beams*,2006,18(4):595-598. (in Chinese)
- [25] 刘志超,陈松林,罗晋,等.1 064 nm 激光多脉冲下 HfO₂/SiO₂ 高反膜损伤规律[J]. *红外与激光工程*,2012,41(5):1191-1194.
LIU ZH CH,CHEN S L,LUO J,*et al.*. Studies of multipulse laser induced damage of HfO₂/SiO₂ multilayer at 1 064 nm [J]. *Infrared and Laser Engineering*,2012,41(5):1191-1194. (in Chinese)

- [26] 李玉瑶,张婉怡,刘喆,等. S-on-1 测量方式下薄膜激光损伤的累积效应[J]. 激光技术,2018,42(1):39-42.
LI Y Y,ZHANG W Y,LIU ZH,*et al.*. Cumulative effect of thin film laser damage under S-on-1 measurement mode[J]. *Laser Technology*,2018,42(1):39-42. (in Chinese)
- [27] CSAJB K V,BED H Z Z,NAGY B J,*et al.*. Ultrafast multipulse damage threshold of femtosecond high reflectors[J]. *Appl. Opt.*,2018,57(2):340-343.
- [28] MERO M,CLAPP B,JASAPARA J C,*et al.*. On the damage behavior of dielectric films when illuminated with multiple femtosecond laser pulses[J]. *Optical Engineering*,2005,44(5):051107-1-6.
- [29] NGUYEN D N,EMMERT L A,RUDOLPH W,*et al.*. The effect of nitrogen doping on the multiple-pulse subpicosecond dielectric breakdown of hafnia films[J]. *International Society for Optics and Photonics*,2009,7504:750402-1-6
- [30] 代福,熊胜明,王文梁,等. 重复频率脉冲激光作用下膜内包裹物对损伤阈值的影响[J]. 强激光与粒子束,2007,19(7):1149-1152.
DAI F,XIONG SH M,WANG W L,*et al.*. Damage induced by inclusions in coatings under repetition frequency pulse laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*,2007,19(7):1149-1152(in Chinese)
- [31] 代福,熊胜明. 高重复频率 DPL 激光对光学薄膜元件损伤实验研究[J]. 红外与激光工程,2014,43(7):2074-2080.
DAI F,XIONG SH M. Experimental study on damage of optical coating irradiated by high repetition rate DPL laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2014,43(7):2074-2080. (in Chinese)
- [32] VAMOS L,OSZETZKY D,DOMBI P. Femtosecond damage threshold at kHz and MHz pulse repetition rates[C]. SPIE Laser Damage,2015,9237:11-16.
- [33] WU B,BARTCH U,JUP M,*et al.*. Morphology investigations of laser induced damage[J]. *Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering*,2006,6403:640319-1-10.
- [34] MELNIKAS S,TOLENIS T,SMALAKYS L,*et al.*. Enhancement of laser-induced damage threshold in chirped mirrors by electric field reallocation[J]. *Optics Express*,2017,25(22):26537-26545.
- [35] 张金胜,宁永强,张金龙,等. 大功率半导体激光器腔面膜的场强分布优化[J]. 中国激光,2014,41(1):145-149.
ZHANG J SH,NING Y Q,ZHANG J L,*et al.*. Optimization of electric field intensity distribution on high power semiconductor laser facet film[J]. *Chinese Journal of Lasers*,2014,41(1):145-149. (in Chinese)
- [36] MECHOLD L. Characterization of HfO₂-SiO₂ rugate multilayers deposited by ion beam sputtering[J]. *Proc. SPIE International Society for Optics and Photonics*,2014,9237:923700-1-6.
- [37] JUP M,JENSEN L,RISTAU D. Laser-induced damage and nonlinear absorption of ultrashort laser pulses in the bulk of fused silica[J]. *Proc SPIE*,2009,7504:75040H-1-8.
- [38] MANGOTE B,GALLAIS L,MELNINKAITIS A,*et al.*. Investigation of laser damage in single layer coatings with pulse durations from 45fs to 24 ps[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*,2010,7842:78420K-1-7.
- [39] GALLAIS L,MANGOTE B,COMMANDRE M,*et al.*. Transient interference implications on the subpicosecond laser damage of multielectrics[J]. *Applied Physics Letters*,2010,97(5):051112-1-3.
- [40] FIELD E S,BELLUM J C,KLETECKA D E. Laser damage comparisons of broad-bandwidth, high-reflection optical coatings containing TiO₂, Nb₂O₅, or Ta₂O₅ high index layers[J]. *Optical Engineering*,2013,8885:88851X-1-8.
- [41] BELLUM J,FIELD E,KLETECKA D,*et al.*. Reactive ion-assisted deposition of e-beam evaporated titanium for high refractive index TiO₂ layers and laser damage resistant, broad bandwidth, high-reflection coatings[J]. *Applied Optics*,2014,53(4):A205-A211.
- [42] BELLUM J C,WINSTONE T B,FIELD E S,*et al.*. Broad bandwidth high reflection coatings for petawatt class lasers: femtosecond pulse laser damage tests, and measurement of group delay dispersion [J]. *SPIE LASE*,2017,10084:100840J-1-10.
- [43] ZHANG J,BU X,JIAO H,*et al.*. Laser damage properties of broadband low-dispersion mirrors in sub-nanosecond laser pulse[J]. *Optics Express*,2017,25(1):305-312.

- [44] 刘晓凤,李大伟,李笑,等. 电子束蒸发制备 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 高反膜的 1 064 nm 激光预处理效应[J]. 中国激光,2009,36(6):1545-1549.
LIU X F, LI D W, LI X, *et al.*. 1 064 nm Laser conditioning effect of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ high reflector deposited by E-beam[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(6):1545-1549. (in Chinese)
- [45] 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 J, ZHANG W L, ZHU M P. Laser conditioning effect of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ high reflectors on 532 nm[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(3):254-259. (in Chinese)
- [46] 吴倩,罗晋,潘峰. 后处理对 HfO_2 薄膜光学特性及抗激光损伤阈值的影响[J]. 光学精密工程,2016,24(12):3000-3004.
WU Q, LUO J, PAN F. Effects of posttreatments on optical properties and laser induced damage threshold of HfO_2 thin films[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(12):3000-3004. (in Chinese)
- [47] 刘志超,郑轶,潘峰,等. 1 064 nm 激光预处理对 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 反射膜损伤形态转化影响研究[J]. 红外与激光工程,2017,46(6):56-62.
LIU ZH CH, ZHENG Y, PAN F, *et al.*. Effect of 1 064 nm laser conditioning on damage morphology change process on $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ reflective film[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6):56-62. (in Chinese)
- [48] 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 M Q. Enhancement of the LIDT of optical coatings[J]. *Journal of Shanghai Second Polytechnic University*, 2010, 27(4):304-308. (in Chinese)
- [49] 王永忠,张云洞,熊胜明. 提高强激光反射镜镀膜损伤阈值的激光后处理技术及机理探讨[J]. 强激光与粒子束,1994,6(2):297-302.
WANG Y ZH, ZHANG Y D, XIONG SH M. A new approach to enhance damage threshold of laser mirror for high power applications and its mechanism studies[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1994, 6(2):297-302. (in Chinese)
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] 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]. 61st Dae Solid State Physics Symposium, 2017, 1832(1):4356-4364.
- [53] FEIT A M D, RUBENCHIK A M. Influence of subsurface cracks on laser-induced surface damage[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2003, 5273:264-272.
- [54] 刘晓凤,李笑,赵元安,等. SiO_2 保护膜对高反膜激光损伤特性的改善[J]. 强激光与粒子束,2010,22(12):2860-2864.
LIU X F, LI X, ZHAO Y A, *et al.*. Damage characteristic improvement of high reflectors by SiO_2 overlayer[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(12):2860-2864. (in Chinese)
- [55] 刘凤娟,周曙,秦娟娟,等. 248 nm 高反膜抗激光损伤性能[J]. 强激光与粒子束,2014,26(8):77-80.
LIU F J, ZHOU SH, QIN J J, *et al.*. Laser damage resistance of 248 nm HR films[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(8):77-80. (in Chinese)
- [56] TATENO R, OKADA H, OTOBE T, *et al.*. Negative effect of crystallization on the mechanism of laser damage in $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ multilayer[C]. *Microoptics Conference. IEEE*, 2011, 112(12):123103-1-3.
- [57] MIKAMI K, MOTOKOSHI S, JITSUNO T, *et al.*. A theoretical analysis for temperature dependences of laser-induced damage threshold[J]. *SPIE Laser Damage*, 2013, 8885:88851T-1-9.
- [58] XU C, JIA J, YANG D, *et al.*. Nanosecond laser-induced damage at different initial temperatures of Ta_2O_5 films prepared by dual ion beam sputtering[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(5):854-863.
- [59] 李石周. $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ 双层减反射薄膜的研究[D]. 云南:云南师范大学,2014.

- LI SH ZH. Study on $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ double-layer antireflection film[D]. Yunnan; Yunnan Normal University, 2014. (in Chinese)
- [60] FIELD E S, BELLUM J C, KLETECKA D E. How reduced vacuum pumping capability in a coating chamber affects the laser damage resistance of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ antireflection and high-reflection coatings[J]. *Optical Engineering*, 2015, 456(1): 963219-1-10.
- [61] 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): 1-9.
CHENG Y, LU Y M, TANG H, *et al.*. Researches on laser damage resistance of optical films[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(7): 1-9. (in Chinese)
- [62] 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.
ZHU M P, SUN J, ZHANG W L, *et al.*. Development of high performance polarizer coatings[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(12): 2908-2915. (in Chinese)
- [63] JIAO H, CHENG X, SHEN Z, *et al.*. Study of laser induced damage of high reflector at 1 064 nm[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2010, 7842: 784205-1-10.
- [64] MENDE M, JENSEN L O, EHLERS H, *et al.*. Laser-induced damage of pure and mixture material high reflectors for 355nm and 1064nm wavelength[C]. Conference on Advances in Optical Thin Films IV, 2011, 8168: 816821-1-11
- [65] 詹光达, 马彬, 张艳云, 等. 预处理效应对 1 064 nm 反射膜本征损伤性能的影响[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(6): 1715-1721.
ZHAN G D, MA B, ZHANG Y Y, *et al.*. Influence of laser conditioning effects on intrinsic damage property of high reflection film at 1 064 nm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1715-1721. (in Chinese)
- [66] BOTHA R, THONY S S, GROSS L M, *et al.*. Comparative study of the laser damage threshold and optical characteristics of $\text{Ta}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ multilayers deposited using various methods[C]. *Laser-Induced Damage in Optical Materials*, 2015, 9632: 963203-1-10.
- [67] SCHILTZ D, PATEL D, BAUMGARTEN C, *et al.*. Strategies to increase laser damage performance of $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ mirrors by modifications of the top layer design[J]. *Appl. Opt.*, 2016, 56(4): C136-C139.

作者简介:



董家宁(1993—),男,江苏淮安人,硕士研究生,2016年于江苏科技大学获得学士学位,主要从事光电子技术与应用方面的研究。E-mail:779070319@qq.com



范杰(1982—),男,吉林延边人,博士,助理研究员,2007年于吉林大学获得硕士学位,2013年于电子科技大学获得博士学位,主要从事光电子技术与应用方面的研究。E-mail:fanjie@cust.edu.cn