# 节瘤缺陷平坦化提高高反射膜的激光损伤阈值

谢凌云1,2, 何 涛1,2, 张锦龙1,2, 焦宏飞1,2, 马 彬1,2, 王占山1,2, 程鑫彬1,2

(1. 同济大学 先进微结构材料教育部重点实验室,上海 200092;2. 同济大学 物理科学与工程学院 精密光学工程技术研究所,上海 200092)

摘 要: 探究了节瘤缺陷平坦化技术中平坦化层(刻蚀层)厚度和种子源尺寸之间的刻蚀规律,同时解释 了平坦化技术提高节瘤缺陷的损伤阈值的机制。在双离子束溅射系统中,使用 SiO<sub>2</sub> 微球模拟真实的种子源置 于基板上,镀制 1064 nm HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 高反膜,制备人工节瘤缺陷。对类似于实际种子源的 SiO<sub>2</sub> 微球一系列不 同刻蚀程度的实验得出了节瘤缺陷平坦化技术的刻蚀规律:只要平坦化层(刻蚀层)的厚度稍大于节瘤缺陷的 种子源粒径,就可以将种子源完全平坦化。使用时域有限差分法(FDTD)模拟不同平坦化程度的节瘤缺陷内 电场增强的结果与节瘤缺陷的损伤形貌进行对比实验,将损伤形貌和损伤阈值与电场强度分布之间建立联系, 表明平坦化技术可以改变节瘤缺陷原有的几何结构,有效抑制节瘤缺陷的电场增强效应。最后,通过对未经平 坦化和经过平坦化处理后的节瘤缺陷进行损伤阈值测试,对比结果直接验证了节瘤缺陷平坦化技术可以实现 对节瘤缺陷的调控,大幅度提高了节瘤缺陷的损伤阈值。

关键词: 节瘤缺陷; 平坦化; 电场增强; 损伤阈值 中图分类号: O484 **文献标志码**: A **doi**:10.11884/HPLPB201830.180067

在近红外反射类激光薄膜中,节瘤缺陷容易引发薄膜损伤,是限制整个激光薄膜损伤阈值的主要因素<sup>[1-3]</sup>。 节瘤缺陷是薄膜制备过程中,杂质颗粒(种子源)在蒸发材料包裹下形成的具有抛物线轮廓的缺陷。其种子源 一般分为两类:一类是基板上残留的污染物,一类是镀膜过程中蒸发材料的喷溅产生的颗粒物。在高反膜中, 节瘤缺陷作为损伤源,部分入射光穿透节瘤缺陷,在节瘤缺陷内部聚焦产生电场增强,节瘤缺陷本身的吸收特 性使得激光能量被吸收。由于节瘤缺陷与薄膜主体材料之间边界不连续,节瘤缺陷内产生温度梯度,形成热应 力场,节瘤缺陷本身机械不稳定性使得节瘤缺陷位置优先发生损伤,从而降低了激光薄膜的损伤阈值<sup>[4-6]</sup>。电 场强度模拟计算的分布图与节瘤缺陷的损伤形貌的一致性证实了电场增强是激光薄膜中节瘤缺陷发生热力损 伤的主要原因<sup>[7]</sup>。节瘤缺陷的几何结构使得其存在较大的入射角范围,一旦入射角范围超过激光薄膜的反射 角带宽,入射光就会穿透激光薄膜,节瘤缺陷的聚焦效应使得穿透光发生聚焦,节瘤缺陷内产生强烈的电场增 强效应<sup>[8]</sup>。

科研工作者提出了优化基板表面的清洗技术以及发展特殊的蒸发技术抑制镀膜过程中蒸发材料喷溅产生的种子源等方法来抑制节瘤缺陷的产生<sup>[9-11]</sup>。激光预处理技术和飞秒激光加工技术等工艺将节瘤缺陷转化为更为稳定的凹坑,从而提高激光薄膜的损伤阈值<sup>[12-13]</sup>。然而在镀膜过程中的节瘤缺陷种子源仍然无法避免,激光预处理技术和飞秒激光加工也存在许多不完善的地方,且经过处理后凹坑的损伤阈值仍限制于40 J/cm<sup>2</sup>。

同济大学从调控节瘤缺陷的电场增强效应入手,提出了制备宽角度高反膜来控制节瘤缺陷损伤的方法。 相比较常规四分之一波长的 HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 高反膜,宽角度 HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 高反膜中的节瘤缺陷中的电场增强效应 大幅度减弱。尤其对于吸收性种子源的节瘤缺陷,宽带高反膜的激光损伤阈值提高了 20 倍左右。宽角度高反 膜可以有效地减少穿透光的比例,实现了对节瘤缺陷内电场增强的调控,提高了反射类激光薄膜的损伤阈 值<sup>[8]</sup>。

同一时期,美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室的 Stolz 等人提出了节瘤缺陷平坦化技术来减小节瘤缺陷 对激光薄膜的影响。对 1,2,5 μm 三种不同宽度的 1 μm 高的圆柱形种子生成的缺陷进行平坦化后,对其进行 10 ns 脉冲 1064 nm 激光单次辐照损伤测试,三种尺寸的缺陷损伤阈值都超过了 100 J/cm<sup>2</sup>, 尤其是 5 μm 宽、

作者简介:谢凌云(1992一),女,博士研究生,主要从事强激光薄膜方面的研究; 0107xielingyun@tongji.edu.cn。

<sup>\*</sup> 收稿日期:2018-03-14; 修订日期:2018-06-13

基金项目:国家自然科学基金项目(61522506,51475335,61621001,61235011,91536111);国家重点研发计划项目(2016YFA0200900); 上海市科委科技基金项目(17JC1400800);上海市"曙光"计划项目(17SG22);国家重大科学仪器设备开发专项 (2014YQ090709)

通信作者:程鑫彬(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事薄膜光学、微纳光学和纳米计量研究; chengxb@tongji. edu. cn。

1 μm 高的圆柱形种子形成的人工缺陷经过平坦化后,其损伤阈值提高了近 20 倍<sup>[14]</sup>。然而,此实验中的人工 节瘤缺陷种子源是使用光刻技术得到的圆柱形 SiO<sub>2</sub> 种子源,与实际种子源形状相差较大,形成的缺陷与实际 节瘤缺陷的几何结构差异也较大。因此,导致其损伤特性与真实节瘤缺陷有一定的偏差,另一方面也有可能导 致平坦化过程中刻蚀的具体工艺参数与实际节瘤的工艺参数有差异。此外,虽然在此实验中,损伤阈值的提高 表明了平坦化技术的有效性,但是其损伤阈值与损伤形貌没能和电场分布或电场增强建立起联系,对平坦化提 高损伤阈值的机制还没有阐述得非常清楚。

本文以单层膜平坦化方式进行节瘤缺陷平坦化,探究平坦化层(刻蚀层)厚度和种子源粒径的关系;同时将 节瘤缺陷内部电场增强的模拟结果与节瘤缺陷的损伤形貌进行比对,探究平坦化技术提高节瘤缺陷损伤阈值 的机制;最后,通过激光损伤阈值测试,验证了节瘤缺陷平坦化技术的有效性。

#### 1 实 验

#### 1.1 人工节瘤缺陷的制备

人工节瘤缺陷种子源是使用 Stöber 法制备的粒径为 0.5,1.0,1.5,2.0 及 3.0  $\mu$ m 的单分散性的 SiO<sub>2</sub> 微 球,这一尺寸范围的种子源与真实种子源的尺寸类似。通过旋涂法,将 SiO<sub>2</sub> 微球均匀地涂在清洗干净的直径 为 25 mm 的 JGS<sub>1</sub> 基板表面,使得基板表面上的 SiO<sub>2</sub> 种子的面密度为 40~60 mm<sup>-2</sup>。在旋涂过程中,采取适 当的措施来避免微球的团聚现象,保证了团聚效应小于 1%。

#### 1.2 节瘤缺陷平坦化过程

在双离子束溅射系统中,主离子源用于镀制激光薄膜,垂直于基板的辅助离子源可以通过改变其束压和束流对激光薄膜进行刻蚀,如图1所示。辅助离子源的刻蚀速率与入射角度有关,大角度(45°~50°)下刻蚀速率 是垂直入射下刻蚀速率的2倍。节瘤缺陷的几何结构使得入射角存在一定的范围,节瘤缺陷两侧的刻蚀速率 大于顶部的刻蚀速率,节瘤缺陷两侧变窄,尺寸变小,当刻蚀层达到一定厚度时,薄膜表面近乎平坦。



Fig. 1 Diagram of dual ion beam sputtering deposition system 图 1 双离子束溅射系统示意图

实验中采用的是 1/4 波长的 HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 高反膜,其 膜系为[air:L(LH)<sup>13</sup>:sub],工作波长为 1064 nm。薄膜 材料的折射率为  $n_{\rm H}$ =1.884 和  $n_{\rm L}$ =1.468。每层 HfO<sub>2</sub> 薄膜的厚度为 141.19 nm,每层 SiO<sub>2</sub> 薄膜的厚度为 181.21 nm,高反膜的总厚度为 4.37  $\mu$ m。已有的研究 表明在相同的束压和束流条件下,SiO<sub>2</sub> 材料相较于 HfO<sub>2</sub> 材料具有更快的沉积速率和刻蚀速率,且 SiO<sub>2</sub> 材 料的平坦化效率更高<sup>[14-15]</sup>。因此,在本实验中依然采用 SiO<sub>2</sub> 材料作为平坦化层的材料,实验所需的离子束的束 压和束流条件,以及该条件下 SiO<sub>2</sub> 的沉积和刻蚀速率以 及 HfO<sub>2</sub> 的沉积速率如图 2 所示。



Fig. 2 Deposition rate and etch rate of the coating materials 图 2 薄膜材料的沉积速率和刻蚀速率





为了探究平坦化层(刻蚀层)的厚度和种子源粒径的 图 3 三组不同平坦化程度1064 nm 高皮膜的透射无暗图 关系,本实验采用单层膜平坦化的方式制备不同平坦化程度的实验样品,使用扫描电子显微镜(SEM)和聚焦

离子束刻蚀(FIB)观察节瘤缺陷的表面形貌和剖面图。平坦化层的沉积-刻蚀过程:在 JGS<sub>1</sub> 基板和 SiO<sub>2</sub> 平坦 化层之间镀制 20 nm 的 HfO<sub>2</sub> 标记层加以区分,先沉积 50 nm SiO<sub>2</sub> 层,再刻蚀 25 nm SiO<sub>2</sub> 层,重复 10 次后镀 制 5 nm 的 HfO<sub>2</sub> 标记层,此过程为一个循环,直到 SiO<sub>2</sub> 层厚度达到总的平坦化层的厚度。本实验准备了三组 人工种子源经过不同程度平坦化后的薄膜样品:第一组样品是未经平坦化的 1064 nm 的 HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 高反膜, 第二组样品是平坦化层厚度为 1.25  $\mu$ m 的 1064 nm 高反膜,第三组样品是平坦化层厚度为 2.5  $\mu$ m 的 1064 nm 高反膜,三组样品的透射光谱如图 3 所示。

#### 1.3 激光损伤阈值测试

本实验激光损伤阈值测试系统采用的是 Nd:YAG 激光器,输出波长为 1064 nm,输出模式为 TEM<sub>00</sub>,调 Q 后脉宽约为 10 ns,最大输出能量 2 J,输出光斑直径约为 1 mm。输出激光是线偏振光,通过旋转 1/2 波片可以调 节能量。采用 Normaski 显微镜对测试样品进行 200 倍 放大的在线的实时观测。在样品上选取 1 mm×1 mm 的方形区域,使用一定的激光能量在样品表面以光栅扫 描方式对样品表面进行激光辐照,统计出扫描区域里总 的节瘤个数和喷溅出来的节瘤个数,从而计算出该能量 下的损伤概率。改变激光能量扫描多个区域,获得 0% ~100%不同程度损伤概率所对应的激光能量,绘制出损



伤概率曲线,本实验用损伤的人工节瘤缺陷的数量占总的人工节瘤缺陷数量的 50%的激光能量密度来表征薄膜的抗激光损伤能力。如图 4 所示,光栅扫描的路径:A-B-C-D-E,以此往复。测试点的间距为 90%峰值能量的光斑直径,此时 1/e<sup>2</sup>峰值能量的光斑能将整个扫描区域完全覆盖。在制备 SiO<sub>2</sub> 微球种子源时,尽量消除外来的杂质颗粒和避免微球的团簇现象,但仍然存在异常的杂质缺陷,在激光损伤阈值测试过程中,需要区分杂质缺陷的影响。

### 2 结果与讨论

#### 2.1 平坦化层与种子源直径之间的刻蚀规律

为了探究平坦化层(刻蚀层)厚度和种子源直径的关 系,使用 FIB 和 SEM 可以获取三组不同平坦化程度和 不同粒径大小的 SiO<sub>2</sub> 种子源形成的人工节瘤缺陷的剖 面图。图 5 是第一组样品中未经平坦化的 2  $\mu$ m 种子源 经过双离子束溅射系统镀制 HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 高反膜后形成 的节瘤缺陷的剖面图,其几何结构为  $D=\sqrt{2.5dt}$ 。相比 较电子束蒸发,离子束辅助等工艺形成的顶部接近于半 球体形貌的节瘤缺陷,双离子束溅射系统制备的人工节 瘤缺陷的顶部更趋向于锥体。

第二组样品是对粒径分别为 0.5,1,1.5,2 和 3 μm 五种尺寸的种子源进行平坦化,平坦化层是 1.25 μm。 首先镀制厚度为 20 nm 的 HfO<sub>2</sub> 标记层,每镀 50 nm 的



Fig. 5 Cross-sectional SEM image of artificial nodular defects with 2 μm SiO<sub>2</sub> microspheres 图 5 2 μm SiO<sub>2</sub> 微球形成的人工节瘤缺陷的剖面图

SiO<sub>2</sub> 层,刻蚀 25 nm 的 SiO<sub>2</sub> 层,循环 10 次后,镀制厚度为 5 nm 的 HfO<sub>2</sub> 标记层,此过程重复 5 次后,得到总 的 SiO<sub>2</sub> 平坦化层厚度为 1.25  $\mu$ m,后续再沉积 HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 高反膜。图 6 分别是粒径为 1, 1.5, 2  $\mu$ m 的 SiO<sub>2</sub> 微球,经过 1.25  $\mu$ m SiO<sub>2</sub> 刻蚀层平坦化后的节瘤缺陷剖面图:可以看出 1  $\mu$ m 的种子源已经完全位于 SiO<sub>2</sub> 平坦化层内,薄膜表面已经完全平坦化;1.5  $\mu$ m 和 2  $\mu$ m 的种子源虽然只有部分位于平坦化内,但节瘤缺陷的尺 寸明显变小。

第三组样品是对粒径为 0.5,1,1.5,2 和 3 μm 五种尺寸种子源进行平坦化,总的 SiO<sub>2</sub> 平坦化层是 2.5 μm,后续再沉积 HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 高反膜。通过 SEM 扫描观察薄膜表面发现,基板表面涂有 0.5,1,1.5,2 μm 四种



Fig. 6 Cross-sectional SEM images of nodular defects with 1.25 μm-thick SiO<sub>2</sub> Planarization layer 图 6 经过 1.25 μm SiO<sub>2</sub> 层平坦化后节瘤缺陷的剖面图

尺寸种子源的薄膜表面已经完全平坦化。图 7 分别为 2  $\mu$ m 和 3  $\mu$ m 的种子源经过 2.5  $\mu$ m SiO<sub>2</sub> 刻蚀层平坦 化后的节瘤缺陷剖面图:可以看出 2  $\mu$ m 的种子源已经完全位于 SiO<sub>2</sub> 平坦化层内,薄膜表面已经完全平坦化, 只有 3  $\mu$ m 的种子源没有被完全平坦化。





通过上述两组样品剖面图的比较分析,对于球形种子源,只要平坦化层(刻蚀层)厚度稍大于种子源的粒径,节瘤缺陷就能被完全平坦化,薄膜表面趋于平滑;平坦化层厚度小于种子源直径,则不能被平坦化,但部分 平坦化后的种子源形成的节瘤缺陷的尺寸也明显变小。通过节瘤缺陷平坦化,可以改变节瘤缺陷原有的几何 结构,从而使激光薄膜表面趋向于平滑。

### 2.2 节瘤缺陷平坦化技术有效性的机制

对节瘤缺陷损伤机制的已有研究已经证实电场增强效应是诱导激光损伤的最主要因素,且节瘤缺陷与薄膜的边界之间的机械不稳定性也是节瘤缺陷容易发生损伤的主要因素之一。在上述的实验中,对于粒径为 2 μm 的 SiO<sub>2</sub> 微球制备的三组样品,如图 8 所示,分别呈现未经平坦化、部分平坦化和完全平坦化三种不同平坦 化程度。三组样品的剖面图直观地显示出节瘤缺陷随着平坦化层厚度的增加,薄膜表面逐渐平滑,平坦化技术 提高了节瘤缺陷与薄膜之间边界处的机械稳定性。

为了探究节瘤缺陷平坦化技术中不同平坦化程度的节瘤缺陷中电场增强的变化,将节瘤缺陷损伤阈值和 损伤形貌与电场增强建立联系,对粒径为 2 μm 的种子源形成的不同刻蚀程度节瘤缺陷的损伤形貌和 FDTD 电场模拟的结果进行对比。图 9 分别为 2 μm 种子源未经平坦化和部分平坦化后形成的节瘤缺陷的剖面图、 节瘤缺陷内的电场强度分布模拟图以及激光辐照后的损伤形貌图。在未经平坦化的节瘤缺陷中,通过图 9(b) 节瘤缺陷内的电场模拟图可以看出,节瘤缺陷内部对称轴位置上其电场增强效应非常显著,电场强度非常大。 因此,在激光辐照下,节瘤缺陷电场增强引起的温度梯度和应力场达到临界值,且由于节瘤缺陷与薄膜边界处 的机械稳定性差,使得节瘤缺陷的内部开始发生损伤,并沿着节瘤缺陷的边界整体发生损坏,损伤形貌如图 9 (c)所示。图 9(d)是种子源经过部分平坦化后的节瘤缺陷的剖面图,从图 9(e)的电场模拟可以看出经过部分 平坦化的节瘤缺陷内的电场增强明显减小,其电场强度峰值为未经平坦化的节瘤缺陷内电场强度峰值的 1/4, 且图 9(f)的损伤形貌图直观表明节瘤缺陷发生初始损伤的位置与电场增强的聚焦位置一致,也再次证实电场



Fig. 8 Cross-sectional SEM images of nodular defects that grow from 2 μm-diameter seeds with different planarization layer thickness 图 8 2 μm 种子源形成的不同平坦化程度的节瘤缺陷的剖面图

增强效应是诱导节瘤缺陷发生激光损伤的主要原因。经过平坦化后,节瘤缺陷趋于平坦,机械稳定性得以改善,同时节瘤缺陷内的电场增强大幅减弱。





(d) nodular defects with partial planarization



(e) EFI in nodular defects with partial planarization



(f) damage morphologies of nodular defects with partial planarization

Fig. 9 Cross-sectional SEM images, simulated electric field intensity(EFI) distributions and damage morphologies of nodular defects that grow from 2 μm-diameter seeds

图 9 2 µm 种子源未经平坦化和部分平坦化后形成的节瘤缺陷的剖面图、节瘤缺陷内的电场强度分布模拟图以及激光辐照后的损伤形貌图

通过未经平坦化和经过平坦化的种子源形成的节瘤缺陷的剖面图以及电场增强模拟图和损伤形貌图之间 的对比实验,表明了节瘤缺陷平坦化技术改变了节瘤缺陷原有的几何结构,增强了节瘤缺陷的机械稳定性,同 时抑制了节瘤缺陷内的电场增强效应,从而实现了对节瘤缺陷的调控,提高了激光薄膜的抗激光损伤能力。

## 2.3 激光损伤阈值测试结果

最后,通过对不同平坦化程度的三组样品进行激光损伤阈值测试,测试结果直接证实了节瘤缺陷平坦化技术的有效性。图 10 分别是对人工种子源不进行平坦化、平坦化层为 1.25  $\mu$ m、平坦化层为 2.5  $\mu$ m 的三组不同刻蚀程度的 1064 nm 高反膜的激光损伤阈值测试结果。从未经平坦化的高反膜的损伤阈值结果可以看出,随着种子源直径的增加,节瘤缺陷的损伤阈值降低,激光薄膜更加容易发生损伤。对于同种粒径的 SiO<sub>2</sub> 微球,随着平坦化层厚度的增加,节瘤缺陷的损伤阈值逐渐增加。对于未经平坦化的 1064 nm 高反膜,种子源直径大于 1  $\mu$ m 的人工节瘤缺陷非常容易引发激光薄膜损伤,此结论与已有的研究所获得的结论相符合。当种子源经过 1.25  $\mu$ m 刻蚀层的平坦化后,1  $\mu$ m 的 SiO<sub>2</sub> 微球完全被平坦化,激光损伤阈值有大幅度提高;对于 1.25  $\mu$ m 利 2  $\mu$ m 的 SiO<sub>2</sub> 微球,经过 1.25  $\mu$ m 刻蚀层平坦化后,虽然种子源没有被完全平坦化,但节瘤缺陷尺寸明

显减小,损伤阈值也有所提高。对于 0.5,1,1.5 和 2 μm 四种不同粒径的种子源,经过 2.5 μm 刻蚀层的平坦 化后,所有粒径的种子源已经完全被平坦化,相比较未经 平坦化的激光薄膜,损伤阈值发生大幅度提高,达到比较 理想的损伤阈值。

#### 3 结 论

节瘤缺陷平坦化技术可以改变节瘤缺陷原有的几何 结构,调控节瘤缺陷的机械稳定性和其电场增强效应,从 而减小激光薄膜中的节瘤缺陷的影响。对于接近于实际 种子源形状的球形节瘤缺陷种子源,只要平坦化层的厚 度稍大于种子源的直径,就可以将种子源完全平坦化,使 得薄膜表面平滑,此刻蚀规律为平坦化技术的实际应用



 Fig. 10 Statistical ejection fluences of 1064 nm high reflection with different thickness planarization layers
图 10 三组不同平坦化程度 1064 nm 高反膜的损伤阈值

提供了指导意见。同时进一步探究了平坦化技术的有效性的物理机制:经过平坦化技术处理后的节瘤缺陷的 机械稳定性提高,节瘤缺陷内的电场增强效应会明显减弱,从而使得激光薄膜的损伤阈值相比较于未经平坦化 的激光薄膜的损伤阈值具有大幅度的提升。

### 参考文献:

- [1] Bloembergen N. Role of cracks, pores, and absorbing inclusions on laser induced damage threshold at surfaces of transparent dielectrics[J]. Applied Optics, 1973, 12(4):661-664.
- [2] Kozlowski M R, Chow R. Role of defects in laser damage of multilayer coatings[C]//Proc of SPIE. 1994, 2114:640-649.
- [3] Cheng Xinbin, Ding Tao, He Wenyan, et al. Using engineered nodules to study laser-induced damage in optical thin films with nanosecond pulses[C]//Proc of SPIE. 2011;819002.
- [4] 谢凌云,程鑫彬,张锦龙,等.节瘤缺陷激光损伤的研究进展[J].强激光与粒子束,2016,28:090201.(Xie Lingyun, Cheng Xinbin, Zhang Jinlong, et al. Research progress of laser-induced damage of nodular defects. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28:090201)
- [5] Dijon J, Poulingue M, Hue J. Thermomechanical model of mirror laser damage at 1.06 μm; I. Nodule ejection[C]//Proc of SPIE. 1999, 3578:387-397.
- [6] Stolz C J, Feit M D, Pistor T V. Laser intensification by spherical inclusions embedded within multilayer coatings[J]. Applied Optics, 2006, 45(7):1594-1601.
- [7] Cheng Xinbin, Zhang Jinlong, Ding Tao, et al. The effect of an electric field on the thermomechanical damage of nodular defects in dielectric multilayer coatings irradiated by nanosecond laser pulses[J]. Light: Science & Applications, 2013, 2(6):e80.
- [8] Cheng Xinbin, Tuniyazi A, Wei Zeyong, et al. Physical insight toward electric field enhancement at nodular defects in optical coatings[J]. Optics Express, 2015, 23(7):8609-8619.
- [9] Bennett J M. How to clean surfaces[C]//Proc of SPIE. 2004, 5273:195-206.
- [10] Rigatti A L. Cleaning process versus laser-damage threshold of coated optical components[C]//Proc of SPIE. 2005, 5647:136-140.
- [11] Stolz C J, Sheehan L M, Von Gunten M K, et al. Advantages of evaporation of hafnium in a reactive environment for manufacture of highdamage-threshold multilayer coatings by electron-beam deposition[C]//Proc of SPIE. 1999, 3738:318-324.
- [12] Papandrew A B, Stolz C J, Wu Z, et al. Laser conditioning characterization and damage threshold prediction of hafnia/silica multilayer mirrors by photothermal microscopy[C]//Proc of SPIE. 2001, 4347,53-61.
- [13] Wolfe J E, Qiu S R, Stolz C J. Fabrication of mitigation pits for improving laser damage resistance in dielectric mirrors by femtosecond laser machining[J]. Applied Optics, 2011, 50;C457-C462.
- [14] Stolz C J, Wolfe J E, Adams J J, et al. High laser-resistant multilayer mirrors by nodular defect planarization[J]. Applied Optics, 2014, 53(4):A291-A296.
- [15] Stolz C J, Wolfe J E, Mirkarimi P B, et al. Defect insensitive 100 J/cm<sup>2</sup> multilayer mirror coating process[C]//Proc of SPIE. 2013: 888502.

## Improve the LIDT of high-reflection coatings by planarizing nodular defects

Xie Lingyun<sup>1,2</sup>, He Tao<sup>1,2</sup>, Zhang Jinlong<sup>1,2</sup>, Jiao Hongfei<sup>1,2</sup>, Ma Bin<sup>1,2</sup>, Wang Zhanshan<sup>1,2</sup>, Cheng Xinbin<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Advanced Micro-structure Materials, Ministry of Education,

Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Institute of Precision Optical Engineering, School of Physics Science and Engineering,

Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Nodular defects planarization was investigated to improve the laser-induced damage threshold (LIDT) of high-reflection coatings. The monodisperse SiO<sub>2</sub> microspheres were deposited on the substrate surface by spin coating process. In the dual ion beam sputtering system, the artificial nodules were grown from these engineered seeds in 1064 nm  $HfO_2/SiO_2$  multilayer coatings. After a series of coating and etching steps, the SiO<sub>2</sub> microspheres were smoothed by a single SiO<sub>2</sub> planarization layer. The relation between the thickness of the planarization layer and the size of the microspheres has been investigated. When the planarization layer (etching layer) thickness was slightly larger than the diameter of the seeds, the seeds could be completely planarized to obtain smooth thin films. Furthermore, the three-dimensional finite-difference time-domain code (FDTD) was used to simulate the electric-field intensity distributions in the artificial nodular defects. The comparison between the electric-field intensity distributions and the nodular morphologies of the non-planarized nodular defects and effectively suppressed the electric field enhancement in nodular defects. Finally, nodular defects with different thickness planarization layers were tested by raster scan damage tests. For the nodular defects with an adequate planarization layer, the laser damage threshold test results show that the ejection fluences has been greatly raised, which has verified that nodular defect planarization could improve the damage resistance of thin films,

Key words: nodular defects; planarization; electric field enhancement; laser-induced damage threshold PACS: 78.20.-e; 77.55.-g; 65.40. De