

doi:10.3788/gzxb20184702.0231002

# 钛酸镧薄膜在 1 064 nm/532 nm 波长激光辐照下的光学特性

徐均琪, 王建, 李绵, 李候俊, 苏俊宏

(西安工业大学 陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 西安 710021)

**摘 要:**采用热蒸发沉积技术制备了钛酸镧(H4)薄膜,研究了 1 064 nm 和 532 nm 波长激光诱导辐照处理后的薄膜折射率、消光系数、激光损伤阈值和损伤过程变迁.结果表明:采用不同波长的激光辐照 H4 薄膜后,会使其折射率升高,但升高的幅度不大.用 1 064 nm 的激光辐照处理,可将 H4 膜的激光损伤阈值从 10.2 J/cm<sup>2</sup> 提高到 15.7 J/cm<sup>2</sup> (5 脉冲辐照),而 532 nm 激光辐照对样品损伤阈值的提高效果不明显.同一样片,1 064 nm 激光的损伤阈值远远高于 532 nm 的激光损伤阈值.1064 nm 激光辐照下, H4 薄膜经历了轻微损伤、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 激光辐照下, H4 薄膜从未损伤到损伤是一个突变的过程,经历了重度损伤和极度损伤的演变阶段.

**关键词:**薄膜;光学特性;激光辐照;钛酸镧;透射率;折射率;损伤

中图分类号:O484.4

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)02-0231002-7

## Optical Properties of Lanthanum Titanate Films Irradiated by Lasers with the Wavelengths of 1 064 nm and 532 nm

XU Jun-qi, WANG Jian, LI Mian, LI Hou-jun, SU Jun-hong

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

**Abstract:** Lanthanum titanate (H4) films were deposited by the thermal vapor deposition technique. After irradiating with a 1 064 nm and 532 nm lasers, the refractive index, extinction coefficient, Laser-Induced Damage Threshold (LIDT) of the films and damaging process of the films were investigated. The results showed that the refractive index of H4 films slightly increased after laser irradiating. The LIDT increased from 10.2 J/cm<sup>2</sup> to 15.7 J/cm<sup>2</sup> (5-pulse irradiation) after irradiating by using a 1 064 nm laser, however, the change of LIDT of the films was unobvious after irradiating by using a 532 nm laser. For the same sample, the LIDT which measured with a 1 064 nm laser was higher than that with a 532 nm laser. H4 film's damage process underwent a slow 4-stage, slight, mild, moderate and extreme damage by using a 1 064 nm laser, whereas the damage process was a sudden change by using a 532 nm laser, underwent a 2-stage, moderate and extreme damage..

**Key words:** Film; Optical properties; Laser irradiation; Lanthanum titanate; Transmittance; Refractive index; Damage

**OCIS Codes:** 310.6860; 310.6870; 140.3390; 140.3440

## 0 引言

在薄膜技术领域,损耗吸收低、机械性能优良、易于制备,性能稳定的镀膜材料一直是工艺和设计人员的

基金项目:国家自然科学基金(No.61378050),陕西省教育厅项目(No.16JS037)和陕西省科技厅项目(No.2016KW-036)资助

第一作者:徐均琪(1973-),男,教授,博士,主要研究方向为光学薄膜及光学检测.Email: jqux2210@163.com

收稿日期:2017-08-23;录用日期:2017-11-17

<http://www.photon.ac.cn>

首选材料,钛酸镧(H4)薄膜在此方面显示出无比优越的性能,研究表明,该薄膜具有良好的工艺稳定性,无论是室温还是加热沉积,或者无论蒸镀过程中充氧多少(甚至不充氧),蒸发束流高低,其折射率变化均不大,消光系数极小,激光损伤阈值稳定<sup>[1]</sup>.该材料是由氧化钛和氧化镧合成得到的,其化学成分为  $\text{LaTiO}_3$ ,光谱透明区为 360~7 000 nm,是一种极具发展前途的光学镀膜材料.1954年,Kestigian和Ward采用  $\text{La}_2\text{O}_3$ 和  $\text{Ti}_2\text{O}_3$ 反应法,成功合成了  $\text{LaTiO}_3$ .随后,有关此材料特性的研究一直吸引着国内外学者的关注<sup>[2-4]</sup>.

关于薄膜材料制备的方法有很多,余亮等<sup>[5]</sup>利用射频磁控溅射法在玻璃衬底上制备 SnS 薄膜,并对所制备的薄膜晶体结构、组分、表面形貌、厚度、反射率和透过率进行表征分析.研究表明:薄膜厚度的增加有利于改善薄膜的结晶质量和组分配比,晶粒尺寸和颗粒尺寸随着厚度的增加而变大.郭华伟等<sup>[6]</sup>采用溶胶凝胶法制备 ZnO:Al,Sm 阻挡层薄膜并对阻挡层薄膜进行了表征,探讨了 Al、Sm 掺杂量对阻挡层薄膜性能的影响.然而,随着大功率、高能量激光系统的发展,应用于这些系统的薄膜元件面临着越来越大的挑战,仅从制备方法上改善薄膜的性能已经难以满足需要.众多研究已经发现,激光辐照薄膜样品,会使其性能发生变化<sup>[7-9]</sup>.如果能够知道强激光辐照后薄膜器件的性能变化趋势(如折射率、消光系数,激光损伤阈值等),就可对光学系统的像差、调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)等质量退化做出早期预测.这种预测,对应用于高能激光器谐振腔、激光核聚变系统,对可能遭受高能激光辐照的空间光学系统显得尤为重要.这就需要薄膜在强激光下的性能进行评估,并进而采取适当的对策.如果能够采用合适强度和剂量的激光辐照处理薄膜样品,则可能使其性能得到改善.因此,明确强激光辐照后的性能变化,就有可能以此指导薄膜后处理工艺来提高膜层的光学性能、机械强度和激光损伤阈值.Li等<sup>[10]</sup>采用 532 nm 的激光,对 FTO 薄膜表面进行了激光辐照处理,发现低通量,高扫描速率激光辐照对薄膜的表面形貌影响不大,但会使透射率增强,电阻率下降.而高通量、低扫描速率激光辐照,会导致透射率和导电性能下降.Alvi<sup>[9]</sup>则发现,增加辐照的时间,会导致薄膜的吸收系数增加,光学带隙减小.Jorge<sup>[12]</sup>采用 10.6  $\mu\text{m}$  的激光对  $\text{TiO}_2$  薄膜进行辐照处理,发现激光辐照能够促进锐钛矿结构转变为锐钛矿/金红石结构.同样,激光辐照还可以形成不同空间频率的表面微观结构<sup>[13]</sup>.任乃飞等<sup>[14]</sup>认为,采用适当能量密度的激光对薄膜进行辐照处理,可起到退火作用,促进薄膜晶粒生长、消除缺陷,最终使薄膜的综合光电性能得到提升.胡建平等<sup>[15]</sup>用 1 064 nm 激光处理  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  薄膜,使薄膜的激光损伤阈值平均提高到 3 倍左右,并且薄膜的损伤尺度也明显减小.对有缺陷的薄膜,其缺陷经低能量激光处理后消除,抗激光损伤能力得到增强,但并不显著,而薄膜本身的激光预处理,可以使其激光损伤阈值大大提高.利用 Nd:YAG 纳秒激光(355 nm、532 nm 和 1 064 nm)辐照 DLC 薄膜的结果表明:采用不同波长的单脉冲激光辐照时,DLC 膜的损伤阈值不同,采用同一波长的多脉冲激光辐照时,损伤阈值低于单脉冲辐照阈值.脉冲激光辐照对 DLC 膜具有改性作用,其特性变化与激光能量密度大小和脉冲个数有关<sup>[16]</sup>.由此可见,激光辐照处理会对薄膜的性能产生重要的影响,且不同波长的激光表现出不同的诱导特性.

鉴于钛酸镧薄膜具有损耗吸收小、易于制备,性能稳定的优良特性,可作为激光薄膜制备的一种优良镀膜材料,因而具有极大的发展潜力.同时,不同波长的激光辐照处理,会对薄膜的不同性能改善起到意想不到的效果,因此,有必要对钛酸镧薄膜在强激光辐照下的行为变迁特性进行研究.然而,遗憾的是,目前对钛酸镧薄膜在强激光下的行为特性研究非常有限,未见到系统地研究钛酸镧薄膜在强激光诱导辐照处理后的光学性能变迁,如薄膜折射率、消光系数、激光损伤阈值和损伤破坏过程的变迁规律,更未见到该薄膜在 1 064 nm 和 532 nm 激光辐照下特性的综合比对.基于以上考虑,本文对热蒸发技术制备的钛酸镧薄膜进行了激光辐照,并对辐照前后的光学特性进行了研究,对于薄膜制备后处理工艺优化和器件性能评估具有重要的意义.

## 1 实验

H4 薄膜的制备是采用电子束热蒸发技术在南光 ZZS500-2/G 型镀膜机上进行的,基片为  $\phi 30$  mm 的石英玻璃和 15 mm $\times$ 15 mm 双面抛光的硅片.镀膜时采用旋转夹具,为了保证基片上薄膜结构及性能的一致,基片放置在镀膜球型夹具的同一个旋转半径内,所有样品一次镀膜完成.沉积前,首先用 3:1 的醇醚混合液清洗基片,待晾干后放上镀膜夹具,随后开始抽真空.当本底真空度达到  $3\times 10^{-3}$  Pa 时,打开电子枪进行膜料预熔,预熔后继续抽真空至其恢复至本底真空度,且基片达到所需温度,然后向真空室充入氧气,开始制备

H4 薄膜.用光电膜厚仪控制薄膜厚度,监控波长为 532 nm,设定控制薄膜光学厚度为  $\lambda_0/2$ .镀膜基片温度为 180 °C,氧气流量 5 sccm,工作真空度为  $1.5 \times 10^{-2}$  Pa,电子枪束流 90 mA(8 KV).采用 J. A. Woollam 公司的 M-2000UI 椭偏仪测量薄膜的光学常数,测试范围 350 nm~1 650 nm,实测薄膜的厚度为 135 nm.文中折射率和消光系数均指 1 064 nm 波长的数值.

采用激光损伤测试系统对 H4 薄膜进行激光辐照处理,其系统原理见图 1,该系统可以工作在测试和预处理模式下,本研究采用预处理模式.两台激光器输出光束模式为 TEM00,光斑能量为准平顶分布,脉宽 10 ns.输出波长 1 064 nm 和 532 nm,由工控机控制,可根据需要选择其一.能量衰减系统由多组中性密度衰减片组合来实现,可使激光能量密度输出范围为  $1 \sim 50 \text{ J/cm}^2$ .薄膜样品夹持在二维工作台上,工作台由步进电机驱动,可以进行 X、Y 两个方向位移.调节聚焦透镜 2 的位置,可以改变光斑在样品表面的大小.实验测得,1 064 nm 激光光斑为  $\phi 0.58 \text{ mm}$ ,532 nm 激光光斑为  $\phi 0.85 \text{ mm}$ .采用工控机控制样品台移动,使激光束完成行列逐点扫描,扫描步长间距为所对应激光光斑大小的一半,分别用不同波长激光对样品进行辐照处理,研究了 H4 膜性能的变化.

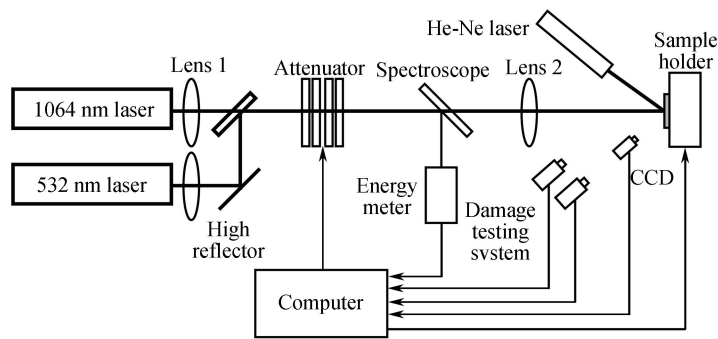


图 1 激光损伤测试系统原理

Fig.1 Schematic diagram of the laser-induced damage testing system

## 2 结果及分析

### 2.1 不同波长激光束输出参数

激光能量的稳定性是测试结果准确与否的重要保证.由于激光辐照采用逐点扫描的方式,样品表面不同位置接收到不同的激光脉冲,各脉冲具有不同的能量,为了选择合适的能量极差范围,实验测试了 100 个激光脉冲,得到的激光能量重复性分布如图 2 所示.

激光器的起始输出脉冲能量调整在 200 mJ 左右,实际测试结果对 1 064 nm 激光来说,其脉冲能量在 199.6~208.7 mJ,均值 203.8 mJ,随机误差为 2.3%.对于 532 nm 的激光,其能量在 204.6~223.5 mJ,均值为 214.0 mJ,随机误差为 4.5%.表明两种激光器输出的激光能量误差不大,基本稳定.图 2 中的插图所示为在样品表面测试的激光光斑能量分布,从图中可知,无论是 1 064 nm 还是 532 nm 激光,其输出的脉冲能量均为准平顶输出,可保证辐照处理区内光斑上的能量分布均匀.

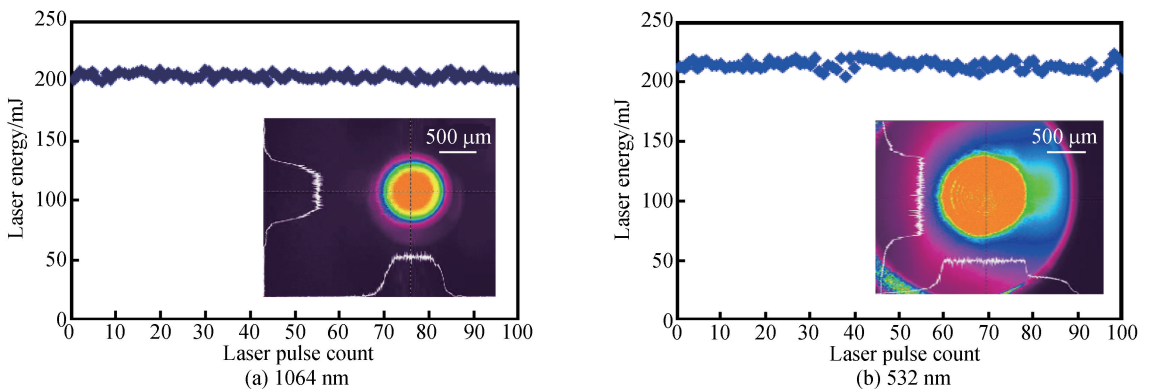


图 2 激光器输出的能量稳定性

Fig.2 The stability of the laser energy

## 2.2 不同激光波长下的光学常数

为了研究 H4 薄膜折射率和消光系数在不同波长激光下的辐照效应,将同一批镀膜样品分成两组,每组 3 片,分别用不同激光波长,不同的脉冲数进行处理.图 3 为激光辐照处理后 H4 薄膜折射率和消光系数的变化情况.

从图中可以看出,对于 1 064 nm 的激光,当不进行辐照,或者采用单脉冲和 5 脉冲(脉冲能量密度  $6.2 \text{ J/cm}^2$ )激光辐照,薄膜折射率随着脉冲次数的增加而轻微升高,从 1.957 1,1.957 6,上升到 1.958 1.消光系数随着脉冲次数的增加也轻微增加,从  $1.05 \times 10^{-6}$ ,  $3.80 \times 10^{-6}$  变化为  $5.18 \times 10^{-5}$ .对于 532 nm 的激光,当不进行辐照,或者采用单脉冲和 5 脉冲(脉冲能量密度  $0.9 \text{ J/cm}^2$ )激光辐照,薄膜折射率随着脉冲次数的增加而轻微升高,从 1.955 2,1.956 5,上升到 1.956 7.消光系数随着脉冲次数的增加无明显变化规律,从  $1.20 \times 10^{-4}$ ,  $4.43 \times 10^{-5}$  变化为  $1.98 \times 10^{-4}$ .为进一步明确 532 nm 激光辐照的这种变化,并对实验的重复性进行验证,采用与前述完全一致的薄膜沉积工艺,在镀膜机上重复制备了 H4 薄膜,厚度为 136.8 nm,并对其在不同激光脉冲辐照下的特性做了进一步研究,其结果如图 4.可以证实,对于 532 nm 的激光,当不进行辐照,或者采用 1、2、3、5 个脉冲激光辐照,薄膜折射率随着脉冲次数的增加而轻微升高(图 4a).消光系数随着脉冲次数的增加无明显变化规律,但也可以发现,当脉冲数较少时,激光辐照使薄膜的消光系数变小,当脉冲数超过 3 时,辐照使薄膜的消光系数变大.由此可见,要得到较小的消光系数,对 H4 膜而言,应优选单脉冲进行辐照处理.由于激光对光学薄膜的作用表现为强烈的场效应和热效应,当高能量短脉冲激光作用到薄膜表面时,会对薄膜进行短暂的快速退火,从而使其折射率升高.H4 薄膜经激光辐照处理后,这种升高的程度不大,不会对薄膜的光谱性能产生明显影响.激光辐照一方面会消除或者降低薄膜表面的缺陷,有使其吸收降低的趋势,但另一方面,根据光斑扫描的方式可知,在其光斑重叠区域,不可避免造成多次能量的累计,这将增加薄膜表面的散射,造成损耗增加.两种效应的综合结果,使得薄膜的消光系数随着辐照脉冲数的变化并不明显.由于 532 nm 的激光光子能量高于 1 064 nm,在脉冲数较少的情况下,可有效消除薄膜内部的缺陷,使消光系数降低.而随着脉冲数的增加,薄膜表面的散射损耗增加,导致消光系数出现增加的趋势,这与 Alvi 的研究结果类似<sup>[11]</sup>.

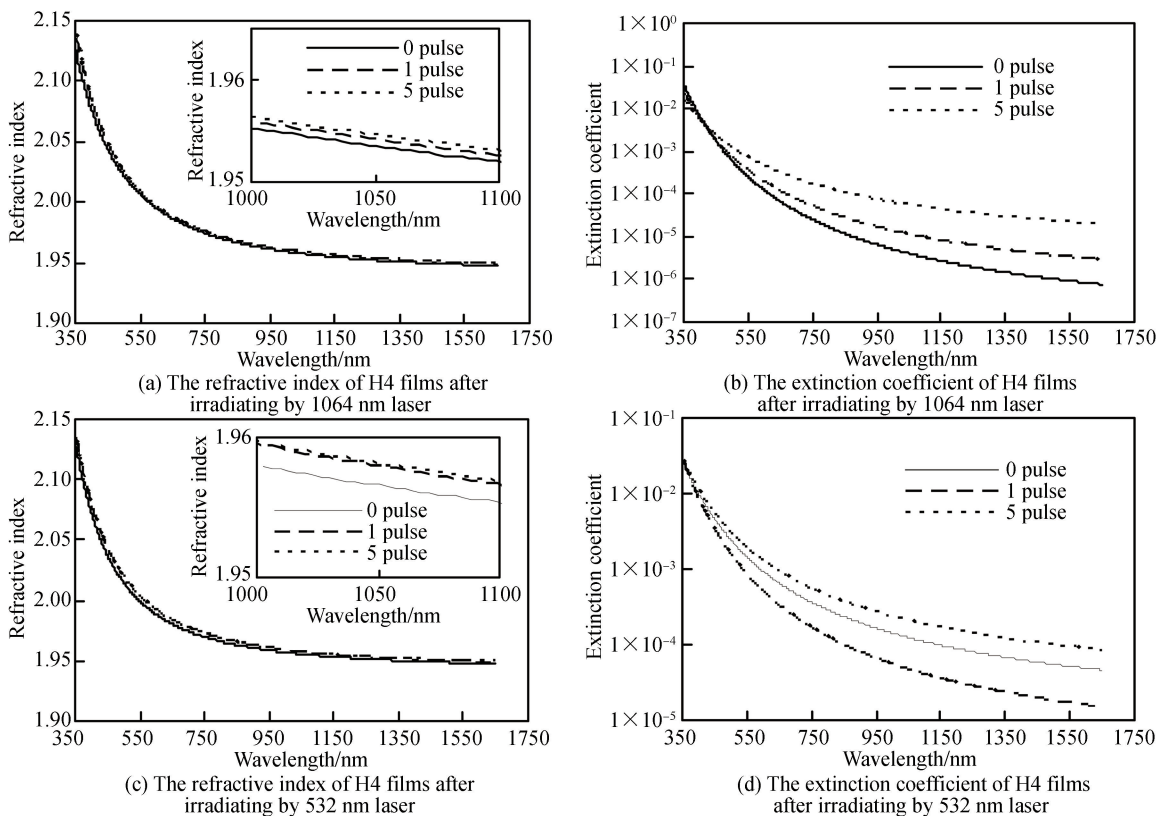


图 3 不同波长激光辐照下薄膜的光学常数

Fig.3 Optical constant of the film irradiated by different lasers

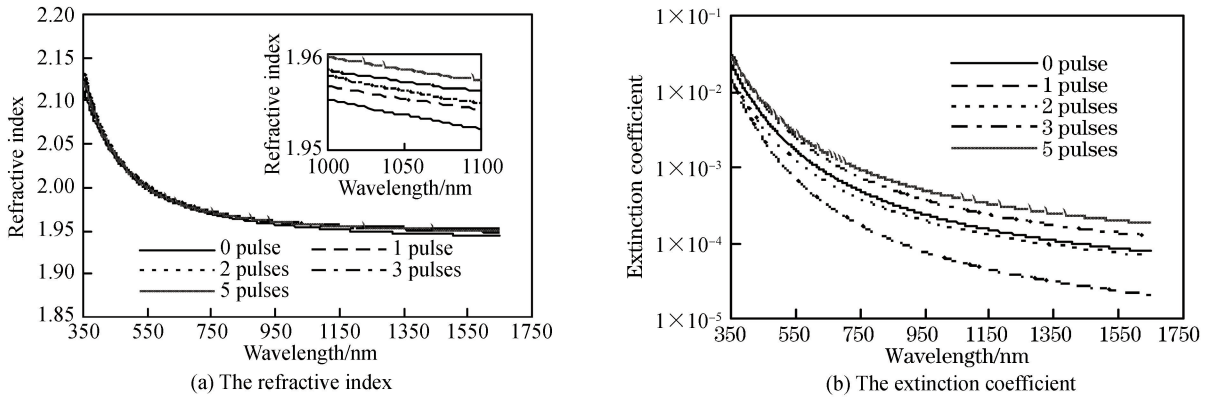


图4 532 nm 波长激光辐照后 H4 薄膜的光学常数变化

Fig.4 Optical constant change of the H4 films irradiated by a 532 nm laser

### 2.3 不同激光波长下的损伤形貌

H4 薄膜在不同激光波长下,表现为不同的损伤特性.为了便于显微镜观测,采用 Si 基底上 H4 薄膜进行研究,图 5 是 H4 薄膜在不同波长激光作用下的损伤形貌.对于 1 064 nm 的激光来说,当激光能量低于 5.6 mJ 时,无法看到明显的损伤斑,当激光能量大于 5.6 mJ 后,可看到微小的损伤斑.随着激光能量的升高,损伤斑尺寸逐渐扩大,薄膜在强激光作用下,损伤经历了: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.而对于 532 nm 的激光来说,当激光能量小于 4.3 mJ 时,无法观测到损伤斑,而一旦激光能量大于 4.3 mJ,立刻可见严重的损伤斑.H4 薄膜损伤几乎没有微损伤和轻度损伤的过程,从未损伤到损伤是一个突变的过程,薄膜的损伤过程经历了:重度损伤和极度损伤的演变阶段.另一方面也发现,在大致相等的激光能量下,H4 薄膜在 532 nm 激光诱导下的损伤斑远远大于 1 064 nm 的激光,说明当采用 532 nm 的激光时,薄膜的破损更加剧烈,这可能源于短波长激光的光子能量更高,产生的多光子电离现象更加明显的缘故.

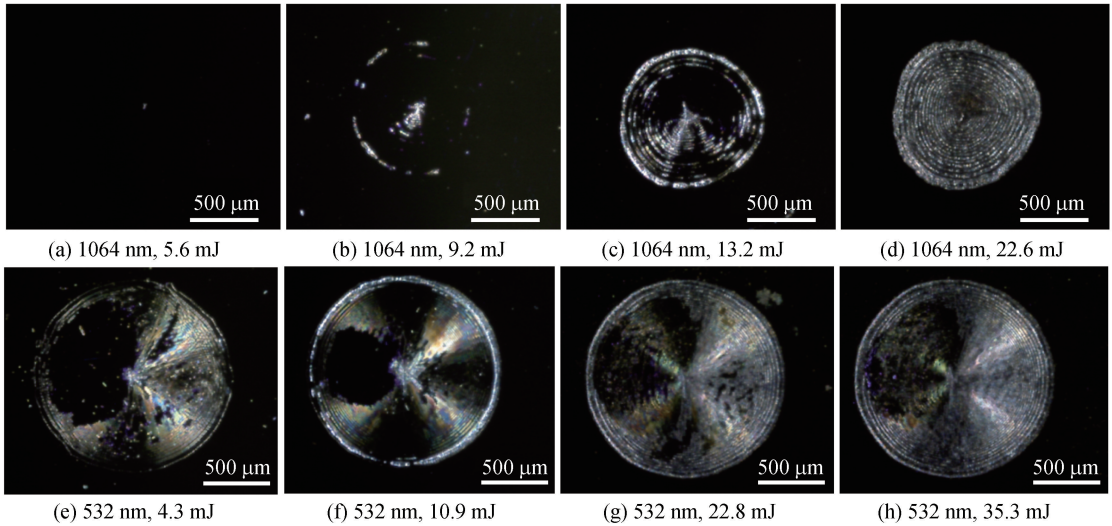


图5 不同波长激光诱导 H4 薄膜损伤过程

Fig.5 The damage process of H4 films induced by different lasers

### 2.4 不同激光波长下的损伤阈值

为了深入研究不同波长激光对 H4 薄膜的辐照效应,分别采用 1 064 nm 和 532 nm 激光,对薄膜进行辐照处理,每种波长的激光用单脉冲和 5 脉冲进行辐照,最后测量两种激光作用下的损伤阈值,其测试结果如图 6 所示.从图中可见,采用 1 064 nm 的激光辐照预处理,无论是单脉冲还是 5 脉冲,其激光损伤阈值均有明显的提高,最大可从  $10.2 \text{ J/cm}^2$  提高到  $15.7 \text{ J/cm}^2$  (1 064 nm 激光损伤阈值) 和  $2.2 \text{ J/cm}^2$  到  $2.7 \text{ J/cm}^2$  (532 nm 激光损伤阈值);而采用 532 nm 的激光进行辐照预处理后的薄膜,其损伤阈值可能略有提高 (1 064 nm 激光损伤阈值),也可能变化不明显 (532 nm 激光损伤阈值).同时可以发现,对于同一样片,采用 1 064 nm 激光测量的损伤阈值均高于 532 nm 的损伤阈值,激光损伤阈值表现出明显的波长依赖性,这一研

究结果与文献[17]相同.其原因一方面源于 H4 薄膜在 532 nm 的消光系数较大,从而导致其吸收系数增加.而 532 nm 波长的光子能量大于 1 064 nm,从而导致 532 nm 波长的总吸收率也较大.另外一个重要原因,则是源于强电场的作用.当光沿着薄膜传输时,入射光束与前一界面反射的光束发生干涉,从而在薄膜内部形成驻波电场(SWEF),这意味着薄膜的不同厚度处具有不同的电场强度.图 7 为 H4 薄膜,在 1 064 nm 和 532 nm 激光作用下,不同膜厚处的归一化电场强度.

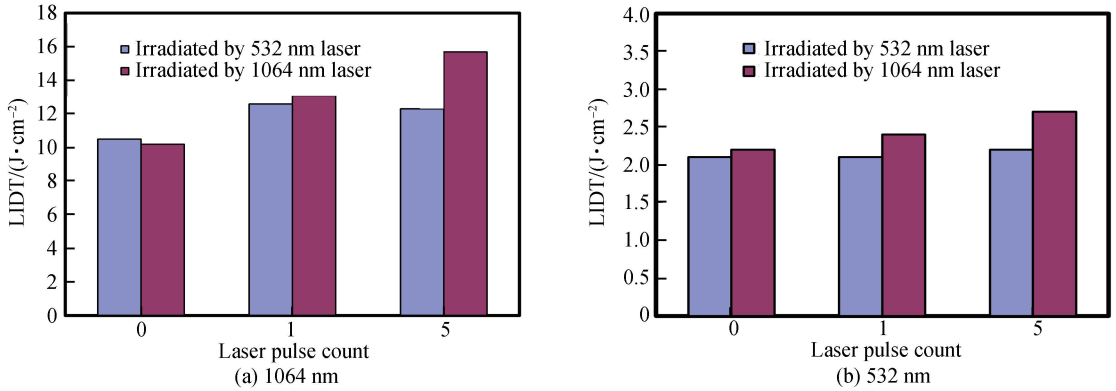


图 6 H4 薄膜在不同激光波长下的损伤阈值

Fig.6 The laser-induced damage threshold of the films after irradiating at different lasers LIDT

由图 7 可知,采用 1 064 nm 和 532 nm 激光作用时,其在薄膜空气界面处的电场强度存在很大差异,分别为 0.310 7 和 0.629 3.已有研究表明,薄膜-空气界面的电场强度是最易发生薄膜损伤的薄弱环节<sup>[1]</sup>,因此,对于 532 nm 激光而言,在界面处较大的电场强度也是其激光损伤阈值较低的重要因素之一.

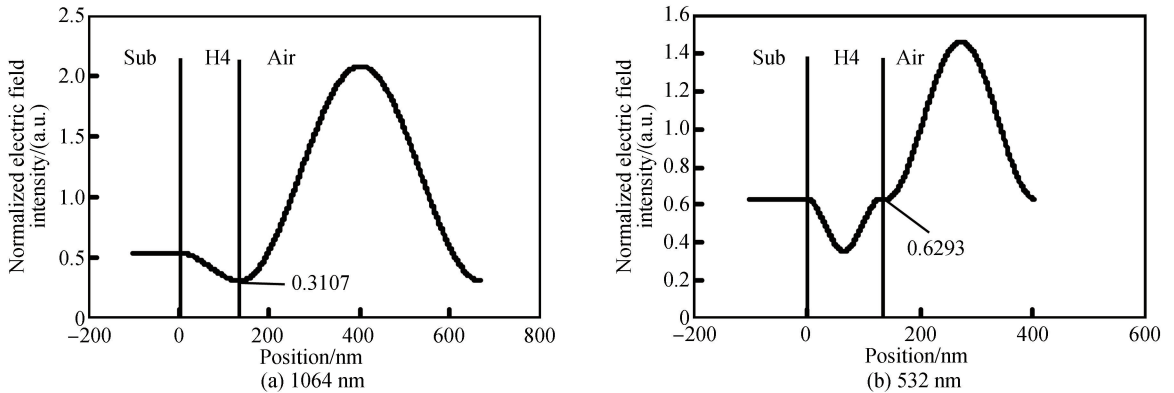


图 7 H4 薄膜在不同激光波长下的电场强度分布

Fig.7 The electric field intensity distribution of the H4 films at different wavelengths

### 3 结论

采用 1 064 nm 和 532 nm 的脉冲激光,对热蒸发技术沉积的 H4 薄膜进行了激光辐照处理.发现 H4 薄膜在强激光辐照处理后光学性能发生明显变化,且不同波长激光具有不同的处理效果.随着脉冲次数的增加,1 064 nm 的激光辐照使 H4 薄膜折射率和消光系数轻微升高,532 nm 的激光辐照,使折射率轻微升高,而消光系数无明显变化规律.适当剂量的激光辐照,会在一定程度上提高其激光损伤阈值:1064 nm 的激光辐照预处理,可使 H4 膜的损伤阈值从 10.2 J/cm<sup>2</sup> 提高到 15.7 J/cm<sup>2</sup> (1 064 nm),或者从 2.2 J/cm<sup>2</sup> 提高到 2.7 J/cm<sup>2</sup> (532 nm);532 nm 的激光辐照预处理,其 1 064 nm 激光的损伤阈值略有提高,532 nm 的激光损伤阈值提高不明显.对同一样片,1 064 nm 的激光损伤阈值远远高于 532 nm 损伤阈值.该研究结果期望能够扩大 H4 膜的应用范围,并对高性能激光薄膜的设计与制备起到一定的参考作用.

#### 参考文献

- [1] XU Jun-qi, HANG Liang-yi, SU Jun-hong, *et al.* Optical properties and laser damages of LaTiO<sub>3</sub> coatings[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2015, **35**(9): 1124-1129.  
徐均琪, 杭良毅, 苏俊宏, 等. LaTiO<sub>3</sub> 薄膜的光学及激光损伤特性[J]. *真空科学与技术学报*, 2015, **35**(9): 1124-1129.

- [2] JIA F F, ZHONG H, ZHANF W G, *et al.* A novel nonenzymatic ECL glucose sensor based on perovskite LaTiO<sub>3</sub>-Ag 0.1 nanomaterials[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, **212**: 174-182.
- [3] MKHALID I A. Visible light photocatalytic synthesis of aniline with an Au/LaTiO<sub>3</sub> nanocomposites[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, **631**: 298-302.
- [4] LIU C M, GE NN, CHENG Y, *et al.* Structural and elastic properties of LaTiO<sub>3</sub> under pressure[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2011, **406**(10): 1926-1931.
- [5] GUO Wei-hua, HAO Hong-shun, JIN Shan-shan, *et al.* Preparation and photoelectric property of ZnO: (Al, Sm) block films[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, **38**(4): 442-449.  
郭伟华,郝洪顺,靳闪闪,等. ZnO:(Al,Sm)阻挡层薄膜的制备及其光电性能[J]. *发光学报*, 2017, **38**(4): 442-449.
- [6] ZHANG J J, CHEN G B, BI J. Analytical inversion solutions for temperature dependent surface absorptivity of metal film irradiated by laser[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, **130**: 1173-1182.
- [7] YU Liang, LIANG Qi, LIU Lei, *et al.* Effect of thickness on the structure and optical properties of SnS films fabricated by RF magnetron sputtering[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(4): 429-436.  
余亮,梁齐,刘磊,等. 膜厚对射频磁控溅射法制备的 SnS 薄膜结构和光学性质的影响[J]. *发光学报*, 2015, **36**(4): 429-436.
- [8] ALEXANDER A K, OLEB B V, YURI N K. Novel hydrodynamic instability of the molten Au/Pd alloy film irradiated by tightly focused femtosecond laser pulses[J]. *Pacific Science Review*, 2014, **16**(3): 183-188.
- [9] HUANG Li-jing, REN Nai-fei, LI Bao-jia, *et al.* Effects of laser irradiation on the photoelectric properties of thermal-annealed metal/fluorine-doped tin oxide transparent conductive films[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(3): 034211  
黄立静,任乃飞,李保家,等. 激光辐照对热退火金属/掺氟二氧化锡透明导电薄膜光电性能的影响[J]. *物理学报*, 2015, **64**(3): 034211.
- [10] LIB J, HUANG L J, ZHOU M, *et al.* Surface morphology and photoelectric properties of fluorine-doped tin oxide thin films irradiated with 532 nm nanosecond laser[J]. *Ceramics International*, 2014, **40**(1): 1627-1633
- [11] ALVIM A. Structural, optical and electrical properties of laser irradiated Pb doped Ga-Se chalcogenide thin films[J]. *Current Applied Physics*, 2013, **13**(3): 474-478.
- [12] JORGE M V, CLAUDIO F R, MARTIN O M. Phase transformation in semi-transparent TiO<sub>2</sub> films irradiated with CO<sub>2</sub> laser[J]. *Materials Letters*, 2012, **66**(1): 172-175.
- [13] LIUK J, LI X H, XIE C X, *et al.* Formation of sub-200 nm nanostructure on Fe film irradiated by femtosecond laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, **94**: 28-33.
- [14] REN Nai-fei, ZU Wei, LI Bai-jia, *et al.* Research on laser irradiation treatment and photoelectric property of Ti/FTO composite films[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(5): 0502004.  
任乃飞,祖伟,李保家,等. Ti/FTO 复合薄膜的激光辐照处理及其光电性能研究[J]. *中国激光*, 2017, **44**(5): 0502004.
- [15] HU Jian-ping, MA Ping, XU Qiao. Damage threshold improvement of HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> coating by 1064 nm laser conditioning[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(11): 1053-1056.  
胡建平,马平,许乔. 用 1064 nm 激光增强 HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 薄膜的抗激光损伤能力的实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(11): 1053-1056.
- [16] TANG Duo-chang, LI Xiao-hong, YUAN Chun-hua, *et al.* Nanosecond laser damage and modification on diamond-like carbon films[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(7): 135-138.  
唐多昌,李晓红,袁春华,等. 纳秒激光辐照对类金刚石薄膜的损伤及改性[J]. *光电工程*, 2010, **37**(7): 135-138.
- [17] ZHOU Ming, ZHAO Yuan-an, LI Da-wei, *et al.* Laser damage of optical film with the combined irradiation of 1064 nm and 532 nm pulse[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(11): 3050-3054.  
周明,赵元安,李大伟,等. 1064 nm 和 532 nm 激光共同辐照薄膜的损伤[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 3050-3054.