

## 多波长飞秒激光损伤可见光滤光片的实验及机理

朱志武<sup>1,2</sup>, 程湘爱<sup>1\*</sup>, 王东<sup>2</sup>, 黄良金<sup>1</sup>, 刘泽金<sup>1</sup>

(1. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 中国人民解放军63880部队, 河南 洛阳 471003)

**摘要:**针对飞秒激光作用光学该实验条件下薄膜过程中损伤阈值与激光波长的关系问题,利用近红外波段波长可调谐的高重频飞秒脉冲激光,对可见光滤光片光谱通带的过渡区域进行了背向损伤实验,测量了不同波长下的平均功率密度损伤阈值,并从飞秒激光作用的雪崩电离过程出发,推导并计算了该阈值与薄膜干涉场分布的关系,理论结果较好的预测了不同波长下平均功率密度损伤阈值的发展趋势.研究表明,该实验条件下薄膜的飞秒激光损伤是整体行为,同一样品中,干涉场分布的平均值越高即膜层中瞬时驻留的激光能量越大时,相应损伤阈值越低.

**关键词:**激光损伤;飞秒激光;光学薄膜;损伤阈值;干涉场

**中图分类号:** TB43 **文献标识码:** A

## Damage and its mechanism to the visible wavelength filter irradiated by femtosecond laser

ZHU Zhi-Wu<sup>1,2</sup>, CHENG Xiang-Ai<sup>1\*</sup>, WANG Dong<sup>2</sup>, HUANG Liang-Jin<sup>1</sup>, Liu Ze-Jin<sup>1</sup>

(1. College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. No. 63880 Unit of PLA, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** The mechanism of damage to the optical coatings of filters induced by femtosecond laser at different wavelengths was studied. A near infrared wavelength tunable femtosecond laser was used to re-irradiate the visible wavelength filter from backside. The wavelengths were selected in the transitional region of the filter pass band and the corresponding thresholds of average power density were obtained. Based on the avalanche ionization process, the relationship between damage threshold and distribution of interference field was investigated. The theoretical results can predict the trend of thresholds. The results indicate that the damage behavior of a coating irradiated by femtosecond laser pulses exhibits an overall behavior. The damage threshold decreases with the increase of transient residual energy in the multi-layer structure of the coating.

**Key words:** laser damage; femtosecond laser; optical coating; damage threshold; interference field

**PACS:** 79.20.Eb, 06.60.Jn, 77.55.-g, 42.25.Hz

### 引言

高损伤阈值的光学薄膜是高能激光系统中的重要环节,因而研究激光与薄膜相互作用机理一直是激光与物质相互作用领域的热点问题之一<sup>[1]</sup>.由于薄膜的特殊多层结构以及生长过程中引入的大量杂质和缺陷<sup>[2]</sup>,使激光对薄膜的损伤行为比作用于均匀材料更加复杂,损伤阈值与薄膜参数之间的定量描述也更加困难<sup>[3-5]</sup>.一个被广泛接受的观点是,当

脉宽大于10 ps时,激光对材料的热击穿占主导地位,当脉宽小于10 ps时,光学击穿行为占主导<sup>[6]</sup>.因此,长脉冲作用下,损伤行为表现为缺陷诱导的热烧蚀,该过程中热累积效应、间接损伤、缺陷参数决定损伤阈值以及损伤阈值的大范围随机波动等现象均表现出来<sup>[4,5,7-8]</sup>;在超短脉冲作用下,雪崩电离所需的种子电子由多光子电离提供,击穿发生在多光子电离、雪崩电离或隧穿电离产生的等离子体浓度超过材料阈值的时候,且热传导效应在脉冲作用时

收稿日期:2011-08-22,修回日期:2012-02-27

基金项目:国家自然科学基金(11004247)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (11004247)

作者简介(Biography):朱志武(1980-),男,湖北武穴人,博士,主要从事激光与物质相互作用研究. E-mail: zhuzhi\_hust@hotmail.com.

\* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: xiang\_ai\_cheng@126.com.

Received date: 2011-08-22, revised date: 2012-02-27

间内可以忽略,因而损伤阈值表现出更好的确定性,损伤形貌也更为规则<sup>[9]</sup>.

无论是长脉冲还是超短脉冲作用下,薄膜中的干涉场分布均影响其损伤特性<sup>[10-11]</sup>.长脉冲作用下,薄膜损伤往往首先发生在干涉场分布的最大值处<sup>[10]</sup>.然而,由于该损伤行为由膜层中随机分布的杂质诱导,这种随机特性削弱了干涉场对损伤阈值的决定性作用,例如实验发现增透膜的阈值普遍低于同种材料的高反膜,但同一波长下前者的干涉场幅度一般小于后者<sup>[12-13]</sup>.在飞秒时间尺度,人们关注于超短脉冲作用材料形成的高浓度等离子体及其动力学过程.飞秒激光作用薄膜的研究也较多地集中在电离过程、损伤形貌以及脉宽对损伤阈值的影响<sup>[14-15]</sup>,而关于不同激光波长引起的干涉场分布与相应损伤阈值的关系报道较少,这一方面也可能是因为可调谐波长的飞秒激光光源比较缺乏造成的.

计算表明,定制的可见光滤光片背向入射时,不同波长形成的干涉场增强效应达到3~8倍,这有利于研究损伤阈值与干涉场分布的关系.将利用波长可调谐的飞秒激光器对该滤光片的光谱过渡区域(从高透到高反)进行背向损伤实验,研究不同波长下薄膜干涉场分布对损伤阈值的影响.

## 1 实验装置与结果

实验采用 Mai Tai 钛蓝宝石飞秒激光器,波长在 690~1040 nm 范围连续可调,每个波长处的光谱宽度约 5 nm (FWHM),重频 80 MHz,光束直径约 2 mm,发散角 50  $\mu$ rad.用白相关仪测量经过聚焦透镜之后的激光脉宽约为 150 fs.采用电子束蒸发法制备的 TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 非规整介质膜共 86 层,其中 TiO<sub>2</sub> 与 SiO<sub>2</sub> 交替沉积,衬底为 K9 玻璃,厚度 1mm.分光光度计测量表明,薄膜在背向入射时的透射谱线与理论计算结果吻合得很好,说明镀膜控制较准确,如图 1 所示.

实验光路如图 2 所示.由于激光背向入射,为了避免飞秒激光首先在熔石英衬底中产生自聚焦效应而影响阈值测量的准确性,采用非球面短焦距透镜( $f=15$  mm)进行聚焦<sup>[16]</sup>,其通光口径为 5 mm,大于光束直径.功率计 1 用于监测激光器输出功率的波动,实验过程中波动范围小于 2%,功率计 2 用于测量激光经过样品后的透射功率.采用可见光 CCD 观察等离子体闪光以及检测透射功率突变两种方法来确定损伤的发生<sup>[16,17]</sup>.CCD 像素为 537  $\times$  597,与样品一起安装在三维精密平移台上,并使镜

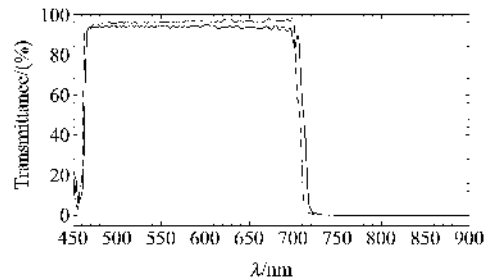


图1 薄膜背向透射谱线

Fig. 1 Transmission spectra of the film irradiated from backside

头始终对准激光作用区域.平移台最小移动步长为 1  $\mu$ m,实验前经过校准,控制样品沿光轴扫描时最小步长为 10  $\mu$ m.光阑的作用是滤除光束的边缘部分,提高损伤检测的灵敏度,因为飞秒激光作用下样品损伤总是最先发生在光斑中心区域.

首先测量光斑直径沿光轴的变化.将刀口仪固定在平移台上,在焦平面两侧不同采样点测量光斑直径,数据拟合后即可得到光斑变化曲线.阈值测量过程中,通过控制样品沿光轴前后移动的方式来调节作用的功率密度大小(如图 2 所示).先控制样品沿光轴从焦平面右侧向左运动,直至出现损伤,记录平移台位置;然后切换辐照区域并使初始位置位于焦平面左侧,控制样品向右运动,达到损伤阈值时再次记录平移台位置;结合两次损伤位置的相对位移以及光斑沿光轴的变化即可得到发生损伤时的光斑直径,从而得到损伤阈值.该方法认为样品在焦平面前后分别达到损伤阈值时,作用在薄膜上的光斑大小应该相等.实验避免了直接测量样品表面作用光斑的大小.由于焦斑面积较小,如果将样品固定在焦点位置进行实验,样品的定位非常重要,且较难操作.本文方法只需要获得平移台的相对位移即可.

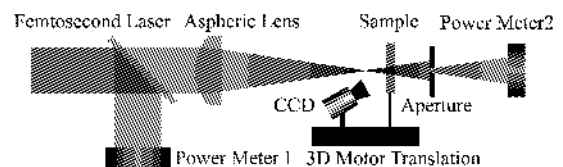


图2 实验光路示意图

Fig. 2 Schematic experimental setup

测量的光斑半径进行样条拟合后如图 3 所示.由于采用了消球差非球面透镜,激光波长为 730 nm、700 nm 和 800 nm 时的聚焦位置无明显差别.各采样点为 10 次测量的平均值,可以看出,数据变化很

平滑,说明测量结果比较精确. 焦斑(0点)半径约为 $3\mu\text{m}$ ,焦面前后光斑变化有微小不对称,表明实际激光束并非理想的高斯光束.

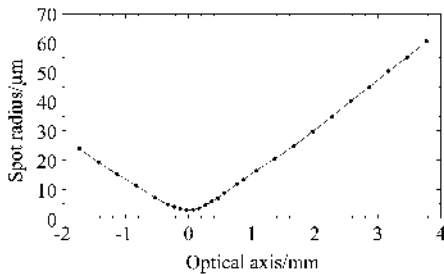


图3 聚焦光束光斑半径  
Fig. 3 Variation of spot radius along the focused beam

控制样品向焦平面移动过程中,作用在薄膜表面的功率密度逐渐升高. 薄膜损伤前,无论激光波长位于薄膜的通带内还是带外,透过率相对于正常值均明显升高. 薄膜损伤后,通带内激光透过率明显下降,而大多数情况下通带外激光透过率会有所增加. 700 nm 激光入射时的结果如图4所示,各点之间相对位移为0.05 mm,在该步长下,观察到损伤点均出现在同一位置. 损伤出现后,透射功率迅速下降,均小于0.1 W. 与此同时,通过 CCD 输出图像可以观察到等离子闪光的出现,由于火花溅射方向总是位于样品表面镀膜一侧,由此可以判断损伤发生在膜层部分. 薄膜损伤形貌如图5所示,由图可以看到,损伤发生在薄膜材料上,此时衬底未见损伤痕迹. 图中不同的损伤程度为激光功率密度达到阈值后持续不同的时间所形成,损伤区域较为规则.

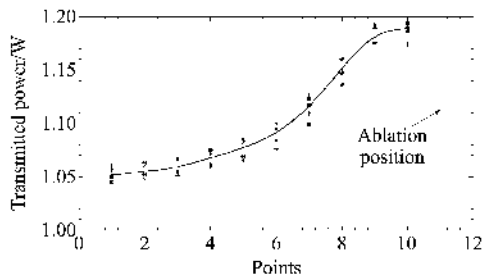


图4 薄膜沿光轴扫描过程中透射功率变化  
Fig. 4 Variation of transmission power during the film scanning along the beam axis

不同波长下薄膜损伤阈值测量结果如图6所示,曲线上每个数据点均为10次测量的平均值,由误差范围可看出实验重复性较好. 飞秒脉冲作用下薄膜损伤阈值非常确定,当控制平移台每次轴向平

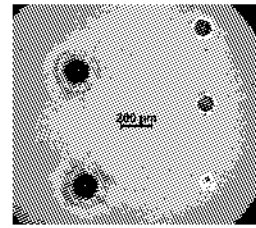


图5 薄膜损伤形貌  
Fig. 5 Damage morphology on the film

移时间间隔为2 s时,焦面前后的损伤点位置波动均为 $\pm 0.02\text{ mm}$ . 在到达预计损伤位置前0.05 mm处,最多让激光持续20 min,没有损伤发生,但在距离预计损伤点0.02 mm处持续5 min,则有约50%的概率发生损伤,且多发生在滤光片对入射波长透过率相对较高(700 ~ 730 nm)的情况下. 因此,将每一组的10次测量中损伤点位移误差范围确定为 $\pm 0.02\text{ mm}$ ,并由此得到光斑大小的误差范围,从而确定阈值波动范围. 根据滤光片光谱曲线(图1),随着波长增加,样品透过率减小,但损伤阈值与透过率并没有表现出明显规律,整体而言,在滤光片光谱过渡区域(720 ~ 750 nm)损伤阈值要小一些.

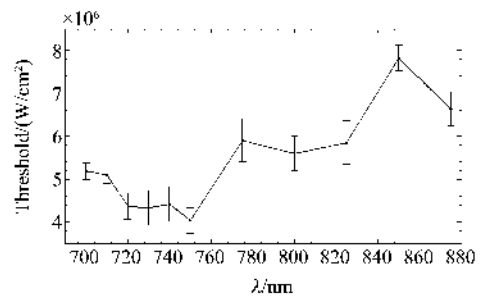


图6 不同波长下背向损伤阈值  
Fig. 6 Damage thresholds as a function of wavelengths

## 2 理论分析与讨论

### 2.1 自聚焦效应影响

设飞秒脉冲场分布为高斯型,其光强函数可表示为<sup>[18]</sup>

$$I(t) = I_0 \exp(-4\ln 2t^2/\tau^2), \quad (1)$$

其中, $\tau$ 为脉宽(HWFM). 在透明介质中,产生自聚焦效应的临界功率典型值为1 MW. 根据文献[16]中的方法估算,当激光器输出功率为2 W左右,脉冲峰值功率约0.17 MW. 采用短焦距非球面透镜使聚焦光斑直径小于 $6\mu\text{m}$ ,可得光斑中心峰值功率密度达到 $0.8\text{ TW}/\text{cm}^2$ ,电场强度达到 $2 \times 10^7\text{ V}/\text{cm}$ .

这样在很大程度上避免白聚焦效应的同时,使激光功率密度超过薄膜损伤阈值,提高阈值测量的准确性.

## 2.2 不同光子频率的影响

固体材料的直流电场击穿阈值和光频电场击穿阈值的关系为<sup>[6]</sup>

$$E_{th}^{rms}(\omega) = E_{th}^{dc}(1 + \omega^2 \tau_0^2)^{1/2}, \quad (2)$$

其中,  $\omega$  为光频率,  $\tau_0$  为激发高能电子的碰撞时间, 取 0.4 fs. 可计算出, 当入射激光波长范围为 700 ~ 875 nm(图 5 所示)时, 该频率范围对雪崩电离参数的影响可忽略, 此外, 多光子电离的阶数也不变. 因此, 只从波长改变干涉场分布的角度对滤光片损伤阈值与波长的关系进行研究.

## 2.3 薄膜干涉场计算

薄膜结构如图 7 所示,  $L_k$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) 代表各层. 激光背向入射, 因此需将图中的入射和出射介质对调. 薄膜中的干涉场计算方法较多, 这里采用特征矩阵方法进行计算<sup>[10]</sup>, 表示为

$$M = M_1 M_2 \dots M_n = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} \\ \mu_{13} & \mu_{14} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$M_k = \begin{bmatrix} \cos\beta_k & -j \frac{\sin\beta_k}{P_k} \\ -j P_k \sin\beta_k & \cos\beta_k \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中,  $M_k$  为第  $k$  层介质的矩阵,  $\beta_k = (2\pi/\lambda_0) n_k h_k \cos\theta_k$ , 激光器为 P 偏振, 则  $P_k = \sqrt{\varepsilon_0/\mu_0} n_k / \cos\theta_k$ ,  $\lambda_0$  为真空中波长,  $\theta_k$ ,  $n_k$  和  $h_k$  为第  $k$  层中的入射角度、折射率以及厚度.

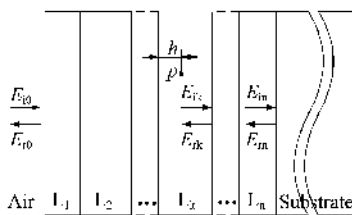


图 7 薄膜结构示意图

Fig. 7 Schematic of film structure

图 7 中, 膜层中任意点  $p$  的电场可表示为

$$\begin{aligned} \vec{E}_p = & \vec{E}_{ik} \exp(-i \frac{2\pi}{\lambda_0} n_k (h_k - h) / \cos\theta_k) \\ & + \vec{E}_{rk} \exp(i \frac{2\pi}{\lambda_0} n_k (h_k - h) / \cos\theta_k), \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $\vec{E}_{ik}$  和  $\vec{E}_{rk}$  由如下方法计算:

$$\begin{bmatrix} E_0 \\ H_0 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \dots M_k \begin{bmatrix} E_k \\ H_k \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\vec{E}_k = \vec{E}_{ik} + \vec{E}_{rk}, \quad (7)$$

$$\vec{H}_k = \sqrt{\varepsilon_0/\mu_0} (\vec{E}_{ik} - \vec{E}_{rk}) n_k. \quad (8)$$

$p$  点光强可表示为  $I_p = E_p \times E_p^*$ , 取不同的深度坐标即得到整个膜层中的干涉场分布曲线, 从而其最大值  $A$  和平均值  $\bar{I}$  均可得到.

滤光片的干涉场分布如图 8 所示, 幅度按照入射场进行归一化. 模拟中发现, 由于膜层较多, 膜层厚度、入射角度、衬底厚度等参数均影响计算结果, 并且薄膜的透射谱偏差也应考虑在内, 所取样品在 700 nm 左右偏差约为 5 nm(如图 1). 计算表明, 薄膜中光强分布的峰值绝大部分位于  $\text{SiO}_2$  层, 其平均值也远大于  $\text{TiO}_2$  层(如 840 nm 时达到 30 倍), 这说明  $\text{SiO}_2$  层承受的平均激光功率密度远高于  $\text{TiO}_2$  层. 但同时,  $\text{TiO}_2$  的材料带隙(3.5 eV)却比  $\text{SiO}_2$ (8 eV)小很多, 因此损伤阈值也要低得多<sup>[19]</sup>. 综合考虑以上两种因素, 认为薄膜损伤的瓶颈处于  $\text{SiO}_2$  层, 因此为简化过程, 后续的理论分析按照  $\text{SiO}_2$  材料的参数进行.

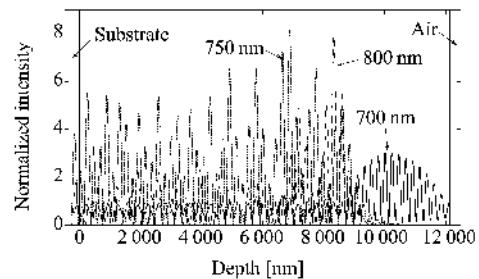


图 8 不同波长下薄膜干涉场分布

Fig. 8 Interference field in the film at different wavelengths

## 2.4 损伤阈值与干涉场分布

所用研究方法中, 损伤发生的标准为等离子体闪光以及透射率突变, 这属于宏观损伤现象, 是薄膜整体的破坏, 因此认为该损伤过程是一种平均效应的结果, 即只有当激光在薄膜中激发出一定平均浓度的自由电子等离子体时, 才能造成整个薄膜的击穿. 激光脉宽为 150 fs, 这种脉宽的激光作用于  $\text{SiO}_2$  材料时, 雪崩电离击穿为主要过程, 并且损伤过程中多光子电离只提供种子电子, 对损伤所需要的临界等离子体浓度的贡献可以忽略<sup>[20]</sup>. 从雪崩系数出发进行推导分析, 强场条件下选择 Thornber 雪崩电离系数<sup>[6]</sup>. 产生的自由电子浓度表示为

$$n_e(t) = n_0 \exp[\eta(E)t], \quad (9)$$

其中,  $n_0$  为初始电子浓度,  $\eta(E)$  为雪崩电离系数,  $E$  为电场强度. 研究材料的直流电场击穿过程中得到

$$\eta = \alpha(E)v_{\text{drift}} \tag{10}$$

其中,  $v_{\text{drift}}$  为电子漂移速度, 在强电磁场作用下达到饱和值, 即  $v_{\text{drift}} = 2 \times 10^7$  cm/s. 用于描述雪崩过程的参数  $\alpha$  表示单位长度上的碰撞电离率, 表示为

$$\alpha(E) = (eE/U_i) \exp\{-E_i/[E(1 + E/E_p) + E_{kt}]\}, \tag{11}$$

其中,  $U_i$  为禁带能量,  $e$  为电子电荷,  $E_i$ 、 $E_p$ 、 $E_{kt}$  分别表示电子克服热、声子以及电离散射所需的阈值场强. 实验中,  $E$  幅度与  $E_i$  相当, 且远大于  $E_p$  和  $E_{kt}$ . 因此, 得到  $\alpha(E) \propto eE/U_i$ . 研究干涉场与等离子体浓度的关系, 可将  $n_e$  看做关于位置  $z$  的函数. 定义函数  $J(z) = \ln(n_e(z))$ , 函数值随薄膜中  $z$  点的等离子体浓度单调递增, 由式(9)得到

$$J(z) = \ln(n_0) + \eta(E(z)t), \tag{12}$$

化简后为

$$J(z) = \ln(n_0) + \gamma E(z), \tag{13}$$

其中, 系数  $\gamma = (eE/U_i)v_{\text{drift}}t$ . 实验采用高重频激光脉冲, 研究宏观的损伤过程, 因此忽略系数  $\gamma$  随时间的瞬态变化. 将该函数在整个薄膜厚度上取平均得到

$$\bar{J} = \ln(n_0) + (1/D) \int_0^D \gamma E(z) dz, \tag{14}$$

其中,  $D$  为薄膜厚度.  $\bar{J}$  的大小与薄膜中平均等离子体浓度相对应, 因而其大小趋势应该与损伤阈值的大小趋势相吻合.

计算得到的曲线如图 9(a) 所示(已忽略式(14)中的常数, 并根据最大值归一化后适当调节幅度), 同时给出实验测量的损伤阈值曲线. 可以看出, 不同波长下干涉场分布的平均值曲线与阈值曲线吻合较好, 能够由干涉场的分布预测不同波长下损伤阈值的高低. 而传统分析方法认为干涉场增强效应的最大值点最先出现薄膜损伤, 因而干涉场的幅度决定了阈值大小的发展趋势. 作为对比, 将  $1/A$  (干涉场幅度的倒数) 曲线与阈值的比较列于图 9(b)中, 通过比较发现, 本文分析方法更加合理. 由计算过程可知, 干涉场平均值大小与膜层中瞬时驻留的激光能量高低相一致, 因此同一薄膜样品在飞秒激光作用下, 膜层中瞬时驻留的激光能量越大则损伤阈值越低.

### 3 结论

定制了  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  可见光滤光片, 采用波长可调谐的飞秒高重频脉冲激光进行了背向损伤实验.

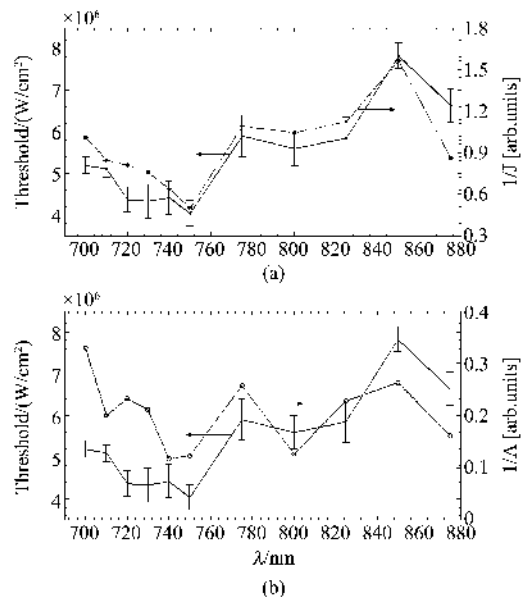


图 9 损伤阈值与干涉场及对比(a)平均值, (b)最大值  
Fig. 9 Comparison between damage threshold and interference field (a) the average value, (b) the maximum value

采用控制样品沿着聚焦光束轴向扫描的方式调节作用在薄膜上的激光功率密度, 通过焦平面前后两个损伤点之间的相对位移, 结合测量得出的光斑直径沿光轴的变化, 推算得出损伤阈值. 理论分析首先排除了自聚焦效应以及不同光子频率对损伤阈值的影响, 确定了从不同干涉场分布的角度研究激光波长与损伤阈值的关系. 接下来从飞秒激光作用的雪崩电离过程出发, 推导了干涉场的分布与损伤阈值的关系, 并发现随着干涉场平均值的升高薄膜破坏阈值降低, 由不同波长下的干涉场分布可以较好地预测损伤阈值的发展趋势. 该研究说明, 飞秒激光作用下, 薄膜损伤表现出一种整体行为, 膜层中瞬时驻留的能量越大损伤阈值越低.

### 致谢

作者非常感谢光电信息控制和安全技术重点实验室(河北 三河)的田宏研究员和下婧研究员对本文工作给予的指导和支持.

### REFERENCES

[1] Zhou D P, Fan Z X, Fan R Y, et al. Study on the laser-induced damage process of thermodynamics and protection of infrared windows[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (周东平, 范正修, 范瑞英, 等. 红外窗口的激光损伤热过程及饱和的研究. *红外与毫米波学报*), 1996, 15(3): 213-217.

- [2] Reichling M, Bodemann A, Kaiser N. Defect induced laser damage in oxide multilayer coatings for 248 nm[J]. *Thin Solid Films*, 1998, **320**:264 - 279.
- [3] LIU An Ping, HAN Wei-Feng, HUANG Mao, *et al.* Microstructure and resisting laser damage property of  $ZrO_2$  films[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘安平, 韩伟峰, 黄茂, 等.  $ZrO_2$  薄膜微结构及其抗激光损伤特性研究. 红外与毫米波学报), 2010, **29**(5): 333 - 336.
- [4] Krol H, Gallais L, Grezes-Besset C, *et al.* Investigation of nanoprecursors threshold distribution in laser-damage testing [J]. *Opt. Comm.*, 2005, **256**:184 - 189.
- [5] XIA Zhi-Lin, SHAO Jian-Da, FAN Zheng-Xiu. Effect of bulk inclusion in films on damage probability [J]. *Acta. phys. sin.* (夏志林, 邵建达, 范正修. 薄膜体内缺陷对损伤概率的影响. 物理学报), 2007, **56**(1): 400 - 406.
- [6] Du D, Liu X, Korn G, *et al.* Laser-induced breakdown by impact ionization in  $SiO_2$  with pulse widths from 7 ns to 150 fs[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(23): 3071 - 3073.
- [7] Xia Z L, Shao J D, Fan Z X, *et al.* Thermodynamic damage mechanism of transparent films caused by a low-power laser[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(32): 8253 - 8261.
- [8] Ristau D, Jupe M, Starke K. Laser damage thresholds of optical coatings[J]. *Thin Solid Films*, 2009, **518**:1607 - 1613.
- [9] Varel H, Ashkenasi D, Rosenfeld A. Laser-induced damage in  $SiO_2$  and  $CaF_2$  with picosecond and femtosecond laser pulses[J]. *Appl. Phys. A*, 1996, **62**:293 - 294.
- [10] Hu H Y, Fan Z X, Luo F. Laser-induced damage of a 1064-nm  $ZnS/MgF_2$  narrow-band interference filter [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(2):1950 - 1956.
- [11] Jasapara J, Nampoothiri A V V, Rudolph W, *et al.* Femtosecond laser pulse induced breakdown in dielectric thin films[J]. *Phys. Rev. B*, 2001, **63**(4): 045117.
- [12] Milam D. Laser-induced damage at 1064 nm, 125 psec [J]. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(5): 1204 - 1213.
- [13] Rainer F, Deaton T F. Laser damage thresholds at short wavelengths[J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(10): 1722 - 1724.
- [14] Joschick H O, Garcia M E, Benncmann K H. Theory for the ultrafast ablation of graphite films [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **87**(1): 015003 - 1.
- [15] Yuan L, Zhao Y A, He H B, *et al.* Femtosecond laser induced damage of optical coatings[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(Supplement): 257 - 259.
- [16] Schaffer C B, Brodeur A, Mazur E. Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**:1784 - 1794.
- [17] Linde D, Schuler H. Breakdown threshold and plasma formation in femtosecond laser-solid interaction [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(1): 216 - 222.
- [18] Stuart B C, Fett M D, Herman S, *et al.* Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics [J]. *Phys. Rev. B*, 1996, **53**(4):1749 - 1761.
- [19] Mero M, Liu J, Rudolph W, *et al.* Scaling laws of femtosecond laser pulse induced breakdown in oxide films [J]. *Phys. Rev. B*, 2005, **71**(11):115109.
- [20] Lenzner M, Kruger J, Sartania S, *et al.* Femtosecond optical breakdown in dielectrics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **80**(18): 4076 - 4079.

(上接第 305 页)

- sponse of silicon in the near-infrared region [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(7): 071113 - 1 - 3.
- [2] Barry I P, Bollond P C, Dudley J M, *et al.* Autocorrelation of ultrashort pulses at 1.5  $\mu\text{m}$  based on nonlinear response of silicon photodiodes [J]. *Electronics Letters*, 1996, **32**(20):1922 - 1923.
- [3] Tsang H K, Wong C S, Liang T K, *et al.* Optical dispersion, two-photon absorption and self-phase modulation in silicon waveguides at 1.5  $\mu\text{m}$  wavelength [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(3): 416 - 418.
- [4] Liang T K, Tsang H K, Day I E, *et al.* Silicon waveguide two-photon absorption detector at 1.5  $\mu\text{m}$  wavelength for autocorrelation measurements [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2002, **81**(7): 1323 - 1325.
- [5] Kikuchi K. Highly sensitive interferometric autocorrelator using Si avalanche photodiode as two-photon absorber [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(1): 123 - 125.
- [6] Maker P D, Terhune R W. Study of optical effects due to an induced polarization third order in the electric field strength [J]. *Phys. Rev.* 1965, **137**(3A):A801 - A818.
- [7] Wynne J J. Optical third-order mixing in GaAs, Ge, Si, and InAs [J]. *Phys. Rev.* 1969, **178**(3):1295 - 1303.
- [8] Moss D J, Driel H M van, Sipe J E. Third harmonic generation as a structural diagnostic of ion-implanted amorphous and crystalline silicon [J]. *Appl. Phys. Lett.* 1986, **48**(17):1150 - 1152.
- [9] Bulheier R, Lüpke G, Marowsky G, *et al.* Anisotropic interference of degenerate four-wave mixing in crystalline silicon [J]. *Phys. Rev. B* 1994, **50**(4): 2425 - 2431.
- [10] Dinu M, Quochi F, Garcia H. Third-order nonlinearities in silicon at telecom wavelengths [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(18): 2954 - 2956.
- [11] ZHANG Yu-Hong, CHEN Zhan-Guo, JIA Gang, *et al.* Research on electro-induced birefringence in crystal silicon [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张玉红, 陈占国, 贾刚, 等. 单晶硅材料电致双折射的研究. 红外与毫米波学报), 2008, **27**(3): 165 - 168.
- [12] SHI Shun-Xiang, CHEN Guo-Fu, ZHAO Wei, *et al.* *Non-linear optics* [M]. Xi'an: Xidian University Press (石顺祥, 陈国夫, 赵卫, 等. 非线性光学. 西安: 西安电子科技大学出版社), 2003.
- [13] Bepko S J. Anisotrop of two-photon absorption in GaAs and CdTe [J]. *Phys. Rev. B*, 1965, **12**(2): 669 - 672.
- [14] Desalvo R, Sheik-Bahae M, Said A A, *et al.* Z-scan measurement of the anisotropy of nonlinear refraction and absorption in crystals [J]. *Optics Letters*, 1993, **18**(3): 194 - 196.