

飞秒激光作用下薄膜的阈值损伤到膜层剥落

石峰^{1*}, 朱志武^{1,2}, 程湘爱³, 戴一帆¹

(1. 国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073;

2. 中国人民解放军 63880 部队光电对抗试验和评估技术重点实验室, 河南洛阳 471003;

3. 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要:在飞秒单脉冲激光损伤 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 薄膜样品实验中,随着激光能量密度升高,膜层从缺陷导致的点损伤发展到整层剥落,损伤区域轮廓由模糊变清晰.研究表明,尺度在纳米量级的颗粒缺陷会产生局部的场增强效应,该效应与薄膜干涉场叠加,造成了阈值损伤阶段损伤区域出现大量损伤点,且由于飞秒激光对包括缺陷在内的薄膜材料的本征损伤特性,使其损伤行为较为确定,随着激光能量的提升,薄膜出现更大面积的规则烧蚀区,此时干涉场的作用上升到主导地位,膜层的整层剥落行为掩盖了缺陷的诱导作用.

关键词:飞秒激光;光学薄膜;激光损伤;纳米颗粒缺陷;场增强效应

中图分类号:TB43 **文献标识码:**A

The evolution of coating threshold damage to peeling off under femtosecond laser irradiation

SHI Feng^{1*}, ZHU Zhi-Wu^{1,2}, CHENG Xiang-Ai³, DAI Yi-Fan¹

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

2. No. 63880 Unit of P. L. A., Key Laboratory of Electro-Optical Countermeasures Test & Evaluation Technology, Luoyang 471003, China;

3. College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In the experiment of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ coatings damaged by femtosecond single pulsed laser, the evolution of coating ablation along with increase of the laser energy was observed. The research shows that coating defects even in nanoscale can induce local light field intensification, which superposes on the interference field. As a result, the coating damage in threshold phase is mainly controlled by the particle defects even when irradiated by femtosecond laser. Because of the intrinsic damage characteristic of femtosecond laser to the coating materials including the defects of even distribution, the damage thresholds of these coatings are relatively deterministic. With the increase of pulse energy, the outline of damaged area becomes clearer. In this condition, the contribution of interference field is increasingly dominant compared with the local light field caused by defects, and the phenomena of coating spalling cover up the impact of defects.

Key words: femtosecond laser, optical coatings, laser damage, nanoscale particle defects, light field intensification

PACS: 79. 20. Eb, 06. 60. Jn, 77. 55. -g, 42. 25. Hz

引言

随着激光技术的发展,光学薄膜这一重要光学

器件的激光损伤效应受到人们的广泛关注,相关实验和理论研究非常活跃.上世纪 70 年代,David Milam 等学者就从光学薄膜的激光损伤形貌中认识到

收稿日期:2016-10-19,修回日期:2016-11-23

Received date: 2016-10-19, revised date: 2016-11-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51675526, 91323302, 91523101)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (51675526, 91323302, 91523101)

作者简介(Biography):石峰(1980-),男,辽宁朝阳人,副研究员,博士,主要研究领域为高精密光学加工.

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: sf.wind@yahoo.com

薄膜缺陷对其激光损伤行为的决定性作用^[1]. 随着镀膜工艺的改进, 尺寸在微米量级的节瘤缺陷至少在局部范围内可以被消除^[2], 但大量纳米尺度的颗粒缺陷却难以去除. 人们关注缺陷的最主要方面是吸收系数高^[3], 而对缺陷尤其是纳米颗粒缺陷可能引起的场增强效应以及局部光场分布和吸收系数两者的结合研究较少, 对这类缺陷造成的局部光场分布在飞秒激光损伤过程中的作用研究尚有不足. 相比于长脉冲激光, 飞秒激光损伤阈值更加确定^[4], 损伤形貌更为规则^[5], 损伤阈值更小^[4]. 已有研究多采用自由电子激发模型, 结合薄膜光场分布, 求解脉冲持续过程中材料导带电子浓度的演变, 当该浓度达到临界时认为损伤发生^[6]. 一般认为, 超短脉冲损伤行为由材料的本征属性决定, 然而薄膜缺陷的密度远高于体材料, 而且缺陷本身也能改变局部的光场分布, 那么在超短脉冲作用下, 缺陷的作用能否忽略, 或者在什么情况下可以忽略还需要更充分的讨论.

首先开展飞秒激光对薄膜的损伤效应实验研究, 观察薄膜在不同激光能量密度下的损伤行为发展, 进而通过计算薄膜光场分布, 分析包括干涉场增强效应和纳米缺陷引起的场增强效应, 再结合飞秒激光作用下的自由电子激发过程, 揭示薄膜随着激光能量密度的提升由点损伤发展到膜层剥落的机理.

1 实验

实验采用三块 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 薄膜样品, 标记为 1#、2# 和 3#, 采用相同的镀膜工艺, 膜系结构如表 1 所示, H 和 L 分别代表高折射率和低折射率材料在控制波长下的四分之一光学厚度, S 为熔石英衬底, Air 为空气界面. 镀膜控制波长为 800 nm, 衬底厚度 5 mm. 激光波长为 800 nm, 脉宽 100 fs, 采取 1-on-1 辐照模式, 相邻辐照点间距 1 mm. 阈值测试系统如图 1 所示, 其中损伤探测采用 He-Ne 激光散射法, 两路激光通过二向色镜合束. 透镜焦距 100 mm, 显微成像系统镜头光学放大倍率为 6.5 倍. 测试中逐渐升高飞秒激光能量, 当薄膜损伤发生后, 表面对 He-Ne 激光的散射瞬时增强, 系统对最小损伤区域的探测灵敏度为直径约 15 μm . 样品表面的每个辐照点, 无论损伤发生与否, 均只进行一次测试, 每个样品进行 10 次有效测试. 需要指出的是, 本文的阈值是在系统探测灵敏度极限条件下的作用激光峰值能量密度.

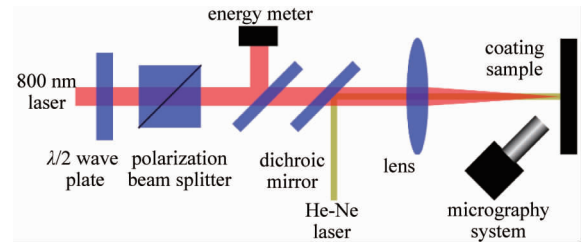


图1 阈值测试系统

Fig. 1 Threshold testing system

表1 三种薄膜样品

Table 1 Three coating samples

序号	膜系	类型
1	SIHLHLHIAir	增反膜
2	SI(HL)10HIAir	增反膜
3	SIHLIAir	增透膜

光斑分析仪拍摄的激光焦点附近光斑略呈椭圆分布, 根据高斯函数拟合椭圆光斑长、短轴分布如图 2 所示. x 轴和 y 轴的拟合公式分别为:

$$f(r) = 182.1 \times \exp\left[-\frac{2 \times (r - 24.77)^2}{9.342^2}\right], \quad (1)$$

$$f(r) = 184.9 \times \exp\left[-\frac{2 \times (r - 17.32)^2}{8.276^2}\right], \quad (2)$$

式中尺寸为像素单位. 已知像素大小为 6.8 μm (H) \times 6.2 μm (V), 根据拟合结果, 得到光斑在 x 轴的 $1/e^2$ 半径为 63.53 μm , y 轴的 $1/e^2$ 半径为 51.31 μm . 拟合结果表明, 激光器输出光斑质量较高, 这对薄膜损伤阈值测量以及后文利用光场强度模拟飞秒激光的等离子体激发过程非常重要. 损伤实验中薄膜表面位于激光焦点, 焦点处光斑直径通过刀口法测量, 得到长、短轴的测量结果分别为 28.5 μm 、22 μm , 计算出靶面光斑面积为 $1.97 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$.

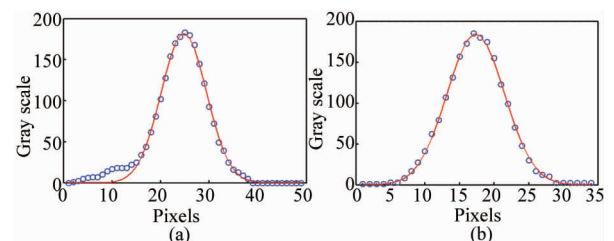


图2 光斑分布拟合结果(a) x 轴分布(b) y 轴分布

Fig. 2 Beam profile and Gaussian fit along (a) x axis and (b) y axis

实验发现, 三块薄膜样品的损伤行为均比较确定, 表现为同一块样品不同区域测量的损伤阈值波

动范围小于平均值的 $\pm 10\%$. 在系统损伤探测极限情况下得到的阈值结果及 10 次测量的波动范围如表 2 所示,3#样品的损伤阈值高于 1#和 2#,表现为增透膜高于反射膜.

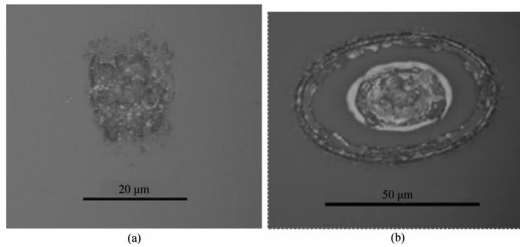


图 3 2#样品的激光损伤形貌 (a) 阈值损伤 (b) 膜层剥落

Fig. 3 Damaged area of 2# coating: (a) threshold damage, (b) coating spalling

表 2 损伤阈值
Table 2 Damage thresholds

样品	损伤阈值/ J/cm^2	波动范围/%
1#	0.88	± 7.3
2#	0.79	± 9.2
3#	1.25	± 5.1

随着激光能量密度的升高,三块样品表现出类似的损伤行为. 初始损伤发生时,损伤区域内均出现大量不规则损伤点,且损伤区域轮廓不规则,提高激光能量密度,开始出现膜层剥落,剥落区域轮廓随激光能量密度的升高而逐渐清晰、规则,并符合作用光斑的形状. 受限于损伤探测灵敏度,更初始的损伤形态未能获取,实验观察到的最小损伤区域在 $15 \mu\text{m}$ 左右. 以 2#样品为例,给出初始损伤和大于损伤阈值情况下的损伤形貌如图 3 所示.

2 理论分析

2.1 干涉场计算

计算薄膜干涉场是分析薄膜损伤机理的一种常见手段^[7]. 采用光的传输矩阵方法,计算得出三个样品的干涉场分布如图 4 所示,镀膜控制波长在 800 nm 的规则膜系对应的干涉场峰值无论增反还是增透膜均位于膜层的界面处,其中 1#、2#位于 HfO_2 和 SiO_2 界面,3#位于空气和 SiO_2 界面. 场增强系数分别为 0.8、1 和 1.1,据此可以推断,1#阈值大于 2#,但是 3#因为场强最大值位于 SiO_2 和空气界面,并且 SiO_2 材料禁带宽度为 8.3 eV ,而 HfO_2 为 5.1 eV ,通常情况下 SiO_2 材料的损伤阈值更高,因此 3#和其他两个样品不能直接比较.

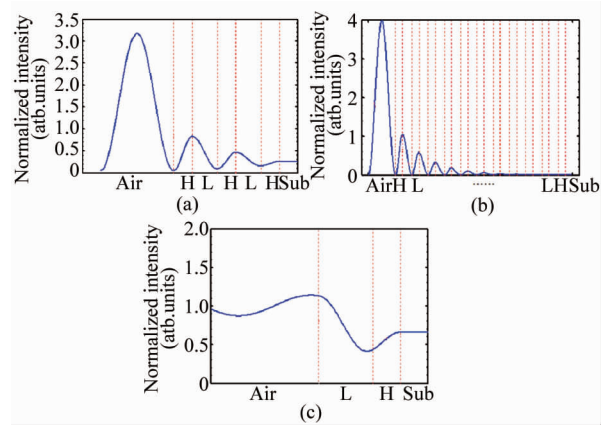


图 4 薄膜干涉场 (a) 1#样品 (b) 2#样品 (c) 3#样品

Fig. 4 Interference field of coatings for samples (a) 1#, (b) 2#, and (c) 3#

2.2 纳米颗粒缺陷的场增强效应

相比节瘤缺陷,纳米颗粒缺陷的几何结构更简单,对整个膜层结构的影响更小,但这种小体积缺陷的分布密度更高^[3,8]. 本文利用有限元法求解介质中麦克斯韦方程组的方法模拟缺陷及其周围的场分布,具体计算在 COMSOL 软件平台上实现. 如图 5 所示为包含纳米颗粒缺陷的单层薄膜,图中的坐标系与计算过程以及结果表达中采用的坐标系相同. 考虑到模拟三维光场,且缺陷与膜层尺寸差别较大,有限元法需要划分足够精细的网格,导致进行一次多层膜运算的时间过长,因此本文将膜系简化成单层膜进行计算. 这里以对比分析不同缺陷参数引起的局部场增强与膜层干涉场增强为重点,因此这种简化是合理的.

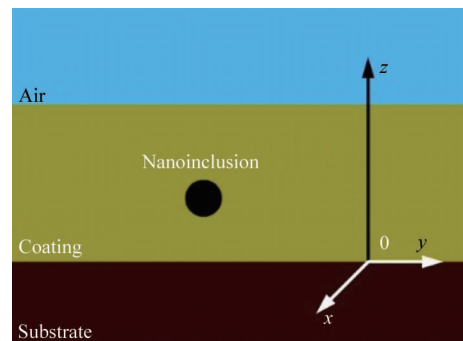


图 5 纳米颗粒缺陷结构示意图

Fig. 5 Schematic of nano-scale particle defect

设定入射激光为平面波,电场强度 1 V/m ,波长 800 nm . 沿 $-z$ 方向入射,偏振方向与 y 轴平行. 由于实际薄膜中的纳米颗粒参数难以获取,这里将各参数设置在一定范围内进行计算分析其变化规律. 衬

底为 SiO_2 , 膜层为四分之一波长厚度的 HfO_2 (折射率) 材料. 模拟变量包括缺陷折射率 (含实部和虚部)、尺寸和掩埋深度.

不失一般性, 将缺陷的复折射率写为

$$n_i = n_0 + i\eta \quad (3)$$

折射率虚部决定了缺陷颗粒对激光的吸收系数, 可写为:

$$\alpha = 2k_0\eta \quad (4)$$

式中, k_0 为真空中的波数. 为描述缺陷的光场特性, 首先考察缺陷内部的平均光强, 写为

$$I = (1/2) \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} n_i |E|^2 \quad (5)$$

$$\bar{I} = 1/V \iiint I dv \quad (6)$$

式中, $V = (4/3) \pi r^3$, 为球形缺陷的体积. 由式(4)和(5), 在整个缺陷体积内积分, 可以得到能量沉积速率:

$$Q = \iiint \alpha I dv \quad (7)$$

强激光辐照下, 缺陷的吸收系数可能与光强相关, 但为简单起见, 仍将其做为常数处理. 缺陷引起的场增强效应采用缺陷内部电场强度的模 $|E|$ 和平均光强 \bar{I} 两个量进行描述, 对该问题的详细讨论请参考文献[9], 限于篇幅这里给出模拟的结果.

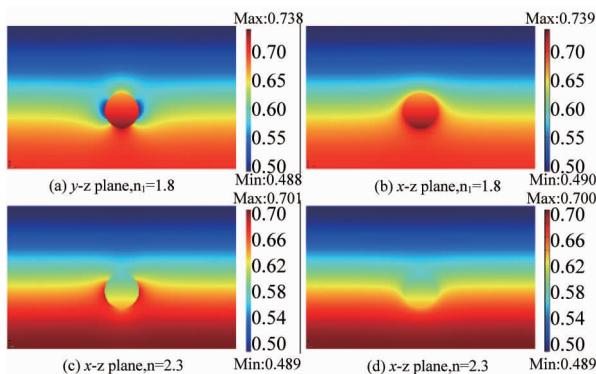


图6 纳米颗粒缺陷导致的光场分布
Fig. 6 Light field induced by nano-scale particle defect

首先, 对非吸收性缺陷, 即 $\eta = 0$, 无论 $n_0 < n_n$ 还是 $n_0 > n_n$, 缺陷均能引起局部的场增强, 直观结果如图6所示. 可见, 膜层内部出现的纳米空隙或者材料聚集都会扰乱局部区域的干涉场, 从而在缺陷周围形成一定的场增强. 当 $\eta > 0$ 时, 场增强效应系数明显更大, 也就是说吸收性缺陷在本身吸收性更高的基础上, 引起的激光聚焦效应也越强. 当消光系数 $\eta = 3.5$ 时 (镀膜坩埚铂金的消光系数, 膜层中常见

的杂质元素成分之一), 场强达到 2.45 V/m , 比同位置处理理想干涉场值高4倍. 另外, 对于同样的缺陷大小和位置, 较小的 n_0 ($n_0 < n_n$) 会导致较高的 I , 且 η 升高时, \bar{I} 值也相应升高. 值得提出的是, 模拟结果表明, 并不是缺陷的消光系数越大其沉积的激光能量越多, 当 η 超过一定的范围, 能量沉积速率反而下降, 也就是说金属性颗粒会阻止激光能量进入颗粒内部, 但是在颗粒表面附近造成较大的场增强, 这一点在研究薄膜中金属颗粒缺陷导致的激光损伤行为中需要考虑. 对高吸收性缺陷, 随着尺寸的增加, 平均能量沉积速率升高, 因此较大的缺陷更容易诱导激光损伤^[10]. 这一观点也从 L. Gallais 等人报道的实验结果中得到支持^[11].

2.3 飞秒激光作用下的等离子体激发

超短脉冲激光作用下, 材料中电子浓度随时间的变化可用速率方程描述, 参考文献[12-13], 模型中光电离率一般采用 Keldysh 理论进行计算^[14-15], 雪崩电离系数采用 Drude 模型进行计算^[12]. 临界电子浓度由等离子体谐振频率达到与入射激光频率相等这一条件决定, 写为 $n_{cr} = (\epsilon_0 m_e^* \omega^2) / e^2$.

速率方程的求解可采用4阶 Runge-Kutta 方法, 计算过程中还应考虑具体材料的属性以及激光脉冲的电场强度方程. 关于理论模型的讨论不是本文的重点, 后文利用该模型结合实际实验参数对相关结果进行计算, 解释薄膜的损伤行为.

2.4 薄膜损伤机理分析

激光辐照过程中, 材料对激光的响应经历能量吸收、转换以及释放等过程, 该过程由最初的材料导带电子浓度和能量的改变发展到后来的温度扩散、激光烧蚀等宏观效应. 超短脉冲激光在材料中产生强烈的非线性效应, 即使作用 SiO_2 等宽禁带材料也能够产生光电离效应^[16]. 当光激发的自由电子浓度达到临界时, 损伤发生. 整个过程处于亚皮秒量级, 当等离子体爆炸发生后, 材料中沉积的激光能量得以释放, 于是后续的电子能量向晶格的转移过程以及热扩散过程处于次要地位, 这也是人们将飞秒激光烧蚀称为“冷加工”的原因^[17].

一般而言, 多光子电离、隧穿电离效应能够产生足够的种子电子, 弱化了杂质电子的作用, 因而飞秒激光损伤是由材料的本征属性决定, 这一特性再加上热传导过程被弱化, 导致飞秒激光对材料的损伤阈值更确定, 损伤形貌更为规则, 间接损伤范围更小^[18]. 对薄膜而言, 场增强效应影响其激光损伤行为, 这也是薄膜损伤行为区别于均匀体材料的原因

之一. 根据模拟计算, 缺陷颗粒即使尺度在纳米量级, 其引起的场增强效应同样不可忽略, 从而导致飞秒激光损伤行为与作用均匀体材料不同. 需要指出是, 纳米颗粒缺陷只能扰乱有限区域的干涉场分布, 从这一点出发, 可以将缺陷建立的场分布叠加在干涉场分布之上, 共同考察它们对薄膜激光损伤行为的影响.

实验中观察到, 三个薄膜样品在阈值损伤和超过阈值的激光作用下, 损伤形貌由密集的点损伤向膜层剥落发展. 下面对这一过程进行分析. 阈值损伤时, 膜层剥落尚未发生, 此时薄膜干涉场增强效应还不足以导致膜层的整块剥落, 而缺陷形成的局部光场叠加在干涉场之上, 从而造成损伤点出现在膜层剥落之前. 当激光能量密度逐渐增大到大于薄膜损伤阈值时, 损伤区域轮廓逐渐清晰, 没有明显的间接损伤. 分析认为, 当激光能量密度足够大时, 缺陷诱导的损伤点被薄膜大面积剥落行为所掩盖, 此时干涉场强度已能够充分电离薄膜材料并导致损伤, 决定该损伤过程的是薄膜材料的本征属性, 缺陷的作用可以忽略.

膜层缺陷的浓度远远小于材料原子的浓度, 在飞秒激光辐照下, 膜层材料的本征属性决定了材料的电离过程, 此时由缺陷提供的种子电子可以忽略, 但缺陷引起的局部光场增强效应却不容忽视. 实际上, 在超短脉冲作用下的非线性过程中, 光场强度对损伤过程的决定性作用比在长脉冲激光作用下的热击穿过程中更显著. 例如, 在飞秒脉冲作用下的材料多光子电离近似计算模型中^[19], 自由电子浓度 $n_e = \sigma_n I^n t$, σ_n 为多光子电离系数, n 为多光子电离的阶数, 由光子能量和材料禁带宽度决定, 可见电子浓度与光强 I 的 n 次方相关 (比如 SiO_2 材料在 800 nm 激光辐照下, n 取 6^[20]). 缺陷提升了局部光场, 从而在飞秒激光作用下更容易形成电离击穿, 另一方面, 飞秒脉冲作用过程中, 间接损伤小, 烧蚀区域尺度可达纳米量级^[17], 这可以解释实验中观察到的飞秒激光损伤区域中损伤点的尺寸比普通纳秒、皮秒激光作用下更小的原因.

因此, 即使在飞秒激光作用下, 薄膜的阈值损伤同样由缺陷诱导, 但随着激光能量的进一步升高, 薄膜干涉场的作用开始体现出来. 与局部的缺陷相比, 膜层的光吸收系数和承受的干涉场强度均要小一些, 但是, 当激光能量足以导致整个膜层出现损伤时, 膜层剥落行为比缺陷导致的损伤点更为显著.

下面以 2# 样品为例进行模拟计算. 实验中, 当

激光能量密度为 0.79 J/cm^2 时, 样品出现膜层烧蚀, 由干涉场计算结果, 膜层中最大光场强度位于薄膜表面第一和第二膜层的分界处, 这应该是激光损伤发生的起始位置. HfO_2 材料的禁带宽度为 5.1 eV ^[21], 多光子电离需要的光子个数最少为 4, 而 SiO_2 材料的禁带宽度为 8.3 eV ^[22], 多光子电离需要的光子个数最少为 6 个, 因此推断损伤最先发生在 HfO_2 膜层. 飞秒脉冲函数写为 $I(t) = A \exp[-(4\ln 2)(t^2/\tau^2)]$, 激光脉宽为 100 fs, 800 nm 激光辐照下, 薄膜的干涉场增强系数约为 1, 因此系数 $A = 7.9 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$, 确定脉冲方程后, 根据上文介绍的理论模型和求解步骤进行计算. 自由电子约化质量取 $m_e^* = 0.5m_0$ ^[23], 得到 HfO_2 材料中自由电子浓度随时间的变化曲线如图 7 所示. HfO_2 材料发生等离子体烧蚀的临界电子浓度为 $n_{cr} = 8.93 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. 计算表明, 当飞秒激光能量密度为 0.79 J/cm^2 时, 激光在 HfO_2 材料中激发的自由电子浓度已经超过临界点, 从而造成等离子体烧蚀.

1#、2#和 3#薄膜样品在 800 nm 激光作用下, 干涉场增强效应系数均在 1 左右, 当飞秒激光能量密度达到 0.56 J/cm^2 时, 就会使 HfO_2 材料发生等离子体烧蚀, 这一数据低于实验测量的结果, 如果进一步考虑缺陷引起的场增强效应系数, 理论计算结果还要更小. 分析认为, 造成这一偏差的主要原因应该是本文损伤探测方法不够灵敏, 只有当损伤发展到 $10 \mu\text{m}$ 量级才能被探测到, 从而测量的阈值高于理论计算结果.

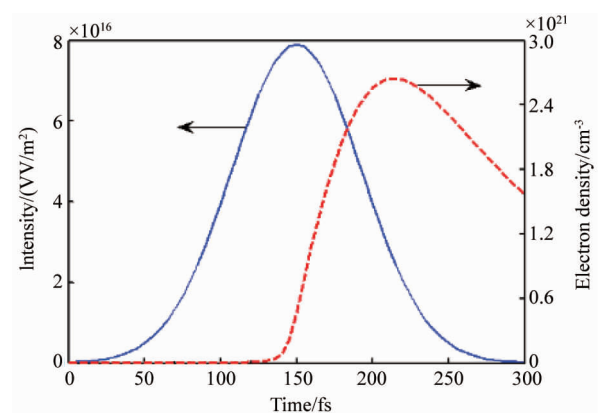


图 7 自由电子浓度随时间的变化

Fig. 7 Evolution of free electron excited by femtosecond pulse

3 结论

采用定制的 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 增反膜、增透膜进行了

飞秒单脉冲激光损伤实验. 在 1-on-1 辐照模式下, 测量了薄膜的损伤阈值, 逐渐提高激光能量密度, 观察到薄膜由缺陷导致的点损伤发展到膜层剥落的过程. 损伤机理研究从薄膜内部光场特性的计算开始, 包括干涉场和纳米量级颗粒缺陷建立的局部场增强, 结合飞秒激光作用下自由电子等离子体激发过程, 解释了薄膜在飞秒激光作用下, 随着激光能量升高, 损伤行为从大量点损伤发展到膜层剥落的机制. 研究表明, 虽然飞秒激光作用下, 薄膜损伤由其本征属性决定, 但即使尺寸在纳米量级的缺陷引起的场增强效应也将导致其损伤行为与缺陷相关. 具体为, 纳米颗粒缺陷建立的局部光场叠加在干涉场之上, 使缺陷位置首先发生等离子体损伤, 从而在损伤区域中观察到大量损伤点, 该过程中热扩散作用可以忽略, 因而损伤点比长脉冲作用下更小、更密集. 当激光能量大于阈值时, 薄膜出现分层剥落, 损伤区域轮廓清晰, 间接损伤区域很小, 表现出典型的等离子体烧蚀特性. 这是因为升高激光能量密度后, 干涉场增强效应上升到主导地位, 整个膜层的烧蚀剥落行为掩盖了缺陷的作用.

References

- [1] Milam D, Bradbury R A, Bass M. Laser Damage Threshold for Dielectric Coatings as Determined by Inclusions [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **23**(12): 654–657.
- [2] Guenther K H. Nodular defects in dielectric multilayers and thick single layers [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(6): 1034–1038.
- [3] Natoli J, Gallais L, Akhouayri H, et al. Laser-induced damage of materials in bulk, thin-film, and liquid forms [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(16): 3156–3166.
- [4] Yuan L, Zhao Y N, He H B, et al. Femtosecond laser induced damage of optical coatings [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, Supplement: S257–S259.
- [5] YUAN Lei, ZHAO Yua-Nan, HE Hong-Bo, et al. Femtosecond single pulse laser induced damage of single layer and high-reflective coating [J]. *Acta. Photonica Sinica* (袁磊, 赵元安, 贺洪波, 等. 单脉冲飞秒脉冲激光对单层和高反光学薄膜的损伤. *光子学报*), 2008, **37**(3): 417–420.
- [6] Liu Na, Wang Yingjian, Zhou Ming, et al. Laser Resistance of Ta₂O₅/SiO₂ and ZrO₂/SiO₂ Optical Coatings under 2 μm Femtosecond Pulsed Irradiation [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, **27**(7): 074215.
- [7] Jianke Yao, Zhengxiu Fan, Yunxia Jin, et al. Investigation of Damage Threshold to TiO₂ Coatings at Different Laser Wavelength and Pulse Duration [J]. *Thin Solid Films*, 2008, **516**: 1237–1241.
- [8] Krol H, Gallais L, Grézes-Besset C, et al. Investigation of Nanoprecursors Threshold Distribution in Laser-Damage Testing [J]. *Opt. Comm.*, 2005, **256**: 184–189.
- [9] Zhiwu Zhu, Xiangai Cheng, Liangjin Huang, et al. Light field intensification induced by nanoinclusions in optical thin-films [J]. *Applied Surface Science*, 2012, **258**: 5126–5130.
- [10] Cheng Xu, Jianke Yao, Jianyong Ma, et al. Laser-Induced Damage Threshold in n-on-1 Regime of Ta₂O₅ Films at 532, 800, and 1064 nm [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(12): 727–729.
- [11] Gallais L, Capoulade J, Wagner F, et al. Analysis of material modifications induced during laser damage in SiO₂ thin films [J]. *Opt. Comm.*, 2007, **272**: 221–226.
- [12] Jupé M, Jensen L, Melninkaitis A, et al. Calculations and experimental demonstration of multi-photon absorption governing fs laser-induced damage in titania [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(15): 12269–12278.
- [13] Couairon A, Sudrie L, Franco M, et al. Filamentation and damage in fused silica induced by tightly focused femtosecond laser pulses [J]. *Phys. Rev. B*, 2005, **71**(12): 125435.
- [14] Tien A C, Backus S, Kapteyn H, et al. Short-pulse laser damage in transparent materials as a function of pulse duration [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**(19): 3883–3886.
- [15] Keldys L V. Ionization in the field of a strong electromagnetic wave [J]. *Sov. Phys. JETP*, 1965, **20**: 1307–1314.
- [16] Chichkov B N, Momma C, Nolte S, et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids [J]. *Appl. Phys. A*, 1996, **63**: 109–115.
- [17] Pronko P P, Dutta S K, Squier J, et al. Machining of sub-micron holes using a femtosecond laser at 800 nm [J]. *Opt. Comm.*, 1995, **114**: 106–110.
- [18] Joglekar A P, Liu Meyhöfer H, G J, et al. A study of the deterministic character of optical damage by femtosecond laser pulses and applications to nanomachining [J]. *Appl. Phys. B*, 2003, **77**: 25–30.
- [19] Stuart B C, Feit M D, Herman S, et al. Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics [J]. *Phys. Rev. B*, 1996, **53**(4): 1749–1761.
- [20] Lenzner M, Krüger J, Sartania S, et al. Femtosecond optical breakdown in dielectrics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **80**(18): 4076–4079.
- [21] Mero M, Clapp B, Jasapara J C, et al. On the damage behavior of dielectric films when illuminated with multiple femtosecond laser pulses [J]. *Opt. Eng.*, 2005, **44**(5): 051107.
- [22] 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**: 115109.
- [23] Mero M, Sabbah A J, Zelle J R, et al. Femtosecond dynamics of dielectric films in the pre-ablation regime [J]. *Appl. Phys. A*, 2005, **81**: 317–324.