

文章编号: 0253-2239(2009)02-0560-06

光学薄膜激光预处理能量密度选取

夏志林¹ 赵元安² 黄才华¹ 邵建达² 薛亦渝¹ 杨芳芳¹ 郭培涛¹

(¹ 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430070; ² 中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 采用 Nd:YAG 三倍频激光对光学薄膜进行了预处理。实验发现三倍频激光预处理对薄膜的抗激光损伤能力有明显的影 响,影响规律比较复杂,归纳得出合适激光预处理能量密度与测试激光能量密度有关。理论上借助杂质诱导薄膜损伤的概率统计模型,从激光预处理引起的激光微区退火以及形成微尺寸损伤两个主要方面着手,很好地解释了复杂的实验现象。总体上看,预处理激光能量密度低于激光退火所需临界能量密度时,预处理效果以负作用为主;预处理激光能量密度高于激光退火所需临界能量密度,且低于激光诱导薄膜微损伤所需临界能量密度时,预处理效果以改善薄膜抗激光损伤能力为主,预处理激光能量密度要尽量选在这个范围内;预处理激光能量密度高于激光诱导薄膜微损伤所需临界能量密度时,预处理效果同样以负作用为主。

关键词 光学薄膜; 损伤概率; 激光预处理; 损伤阈值

中图分类号 TN246 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082902.0560

Selecting Energy Density for Laser Preconditioning Optical Films

Xia Zhilin¹ Zhao Yuan'an² Huang Caihua¹ Shao Jianda² Xue Yiyu¹
Yang Fangfang¹ Guo Peitao¹

(¹ School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)
(² Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800, China)

Abstract Frequency-tripled Nd:YAG laser was used to pre-treat optical film samples. The capacity of optical film's resisting laser induced damage is affected by laser preconditioning, but the influence regulations are very complicated. Results reflect that appropriate pre-treating laser energy density is related to testing laser energy density. From the aspects of laser annealing and laser induced slight damage in pre-conditioning, the probability statistical model of laser-induced damage deduced by the author can explain these complicated phenomena well. Generally, if the energy density of preconditioning laser pulse is below the critical energy density for laser annealing, the effect of laser precondition is negative mostly; when the energy density of preconditioning laser pulse is beyond the critical energy density for laser anneal and below that for laser induced micro-damage, the effect of laser precondition is positive mainly. It is appropriate to choose the preconditioning pulse energy density in this scope; while if the energy density of preconditioning laser pulse is beyond the critical energy density for laser induced micro-damage, the effect of laser precondition is negative mainly.

Key words optical films; damage probability; laser preconditioning; damage threshold

1 引 言

激光核聚变的提出和高功率激光系统的建立,对光学薄膜元部件性能提出了越来越苛刻的要求,除了更加良好的光学性能外,还要求光学薄膜具有

超强的抗激光损伤能力。光学薄膜激光损伤问题一直是激光向高能量、高功率方向发展的“瓶颈”,同时也是影响整个激光系统使用寿命的决定性因素之一。为了提高薄膜的抗激光损伤能力,研究者们开

收稿日期: 2008-05-13; 收到修改稿日期: 2008-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(10804090,60708004)、武汉理工大学校自由探索基金(XJJ2007031)和博士科研启动基金(471-38650322)资助课题。

作者简介: 夏志林(1978—),男,博士,副教授,主要从事光学薄膜激光损伤机制及高能激光损伤阈值光学薄膜制备等方面的研究。E-mail: lionel626@163.com

展了多方面的研究工作^[1~11],首先从改变薄膜制备工艺和条件着手,但这一方案近年来取得的效果不明显,难以有很大的突破。同时在光学薄膜的激光损伤研究中发现,采用低于光学元件损伤阈值的激光进行辐照可以有效地提高元件的抗激光损伤能力,这就是激光后处理技术。已有的研究发现对不同介质材料,不同膜系结构,不同方法制备的薄膜,其激光预处理的效果不同。例如,Nd:YAG 基频激光预处理电子束加热蒸发沉积的薄膜,普遍可以取得比较好的效果。但是倍频激光预处理的效果则不明显。而本文所述的三倍频激光预处理的效果则不确定,有明显改进薄膜抗激光损伤能力的,也有效果相反的。激光预处理增强薄膜抗激光损伤能力的机制主要有:激光清洗机制,激光预处理工艺去除了薄膜表面的易挥发污染物、杂质、水分等,从而提高薄膜阈值;激光退火机制,激光预处理使得薄膜微晶结构重组,由非晶到多晶,或晶体结构发生改变;电子杂质缺陷机制,激光预处理可以去除材料能带禁带的杂质缺陷能级和导带中的初始自由电子^[1~3]。这些理论可以说明一些问题,但都不是普适的。

2 理论基础

文献[4]研究了基于杂质半径分布的薄膜损伤概率统计模型,认为纳秒激光作用下,薄膜破坏机制以杂质缺陷吸收激光能量而产生热应力作用为主。一定能量密度激光作用下,不同半径杂质的温度值不统一,尺寸过小的杂质缺陷,由于其热扩散速度超过热吸收速度,温度难以积累到足以引起薄膜破坏;而尺寸过大的杂质缺陷,其吸收的激光能量也不足以使其温度升高到可以引起薄膜破坏。能引起薄膜破坏的杂质缺陷尺寸存在一个范围,文中将对薄膜损伤有贡献的杂质缺陷半径范围称为其敏感尺寸范围(SSR)。对于一定能量密度的辐照激光,薄膜中尺寸在 MIN 和 MAX 曲线之间的杂质缺陷才能诱导薄膜破坏,如图 1 所示。MIN 和 MAX 曲线相交处的能量密度便是该类杂质缺陷诱导薄膜损伤的阈值。

目前,激光预处理增强薄膜抗激光损伤能力的机制,从激光清洗机制、激光退火机制到电子杂质缺陷机制,本质上都认为预处理工艺使薄膜中杂质缺陷种类和密度得以减少,从而提高了薄膜的抗激光损伤能力。故而,分析激光预处理效果、探索预处理工艺参数,从杂质缺陷相关的理论出发必将有很大收益。

预处理激光脉冲辐照过程中,薄膜材料内可能发生的变化可以归为如下几类^[5,6]:预处理激光能

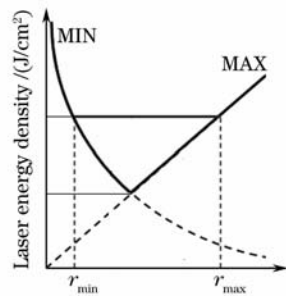


图 1 测试激光作用下杂质敏感尺寸范围(SSR)

Fig. 1 SSR of inclusions under testing laser pulse

量密度不大时,材料温度轻微升高,原子运动适度加速致使材料内形成一定浓度的点缺陷等轻度原子点阵畸变。脉冲过后的快冷将这些轻度畸变保留了下来。这对薄膜抗激光损伤能力有害;提高预处理激光能量密度,可以使材料有可观的温度升高,材料在此温度下可以发生固相相变。这对薄膜抗激光损伤能力的影响不确定,主要由相变前后材料的结构决定。而且这个过程并非任何材料都存在的。对于吸收性缺陷,吸收激光能量后温度急剧升高,从而导致局部熔化,这有助于消除该局部缺陷,这与激光退火机制相似;进一步提高预处理激光能量密度,将有可能因为杂质缺陷温度升高过度而产生局部微尺寸损伤。该损伤一般不会影响薄膜的功能,但是后续作用激光对这类微尺寸损伤极为敏感,极易诱导更大尺寸的薄膜功能性损伤。除了第一类产生新缺陷的情况之外,薄膜原本存在的杂质缺陷对激光预处理效果影响明显。本文将从预处理工艺过程中的激光微区退火以及形成微尺寸损伤两个主要方面着手分析激光预处理效果。

将文献[4]中建立 MIN 及 MAX 曲线所采用的判据由能否引起薄膜功能性破坏,改为能否对薄膜进行激光退火或能否产生微尺寸损伤,则可以得到图 2 的曲线。此图反映了激光预处理的效果,图中曲线 ABC 是以预处理能否达到激光退火作用为判据;曲线 A'B'C' 是以预处理激光能否达到诱导微损

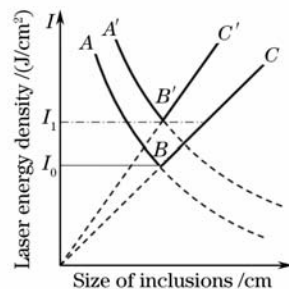


图 2 预处理激光作用下杂质敏感尺寸范围

Fig. 2 SSR of inclusions under preconditioning laser pulse

伤发生为判据。曲线 ABC 以上 ABC 以下的部分是预处理具有积极作用的区域;曲线 ABC 以下是预处理没有明显效果的区域;曲线 A'B'C'以上是预处理具有负作用的区域。即预处理激光能量密度小于 I_0 时,不会产生明显效果;大于 I_1 时,效果下降甚至产生负作用;在 I_0 和 I_1 之间效果较好, I_1 时,效果最佳。与激光诱导薄膜功能性损伤的敏感尺寸范围图结合起来,便可以分析不同能量密度的测试脉冲辐照下,不同能量密度激光预处理的效果。如图 3 所示。图中 I_0 是预处理激光脉冲能够进行退火的能量密度阈值; I_1 是预处理激光脉冲产生微损伤的能量密度阈值; I_2 是以激光退火为判据时临界杂质半径(薄膜功能性损伤为判据时 MIN 曲线和 MAX 曲线相交处杂质半径)对应的 MIN 曲线或 MAX 曲线上的能量密度值; I_3 是以出现微损伤为判据时临界杂质半径对应的 MIN 曲线或 MAX 曲线上的能量密度值。 I_{th} 是测试激光辐照时能引起薄膜功能性损伤的阈值。三种判据下的阈值大小关系为: $I_0 < I_1 < I_{th}$ 。

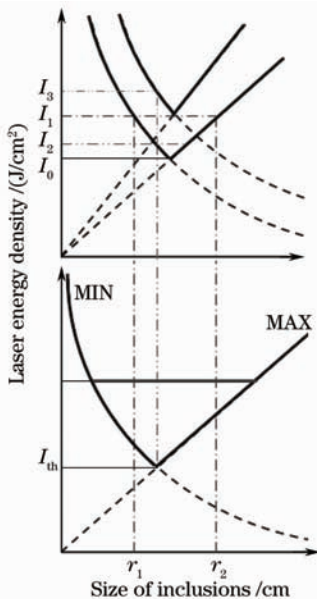


图 3 预处理激光作用下的杂质敏感尺寸范围与测试激光作用下的杂质敏感尺寸范围对照

Fig. 3 comparison between SSRs of inclusions under testing pulse and preconditioning laser pulse

由图 3 可以分析激光处理效果,从预处理能量密度角度,分析激光预处理工艺改善薄膜抗激光损伤能力的效果。预处理激光能量密度低于 I_0 时,除了可能会在薄膜内形成轻度原子点阵畸变外,对薄膜内原有杂质缺陷不会有明显的影响。预处理激光能量密度尽量不要选用在该区域,尤其是该区域的

高能段。

预处理激光能量密度在 I_0 和 I_2 之间时,对于能量密度近 I_{th} 且大于 I_{th} 的测试激光脉冲而言,不会有明显的改善效果。而对能量密度更高的测试激光脉冲而言,由于激光微区退火作用,有明显的改善效果。 I_0 和 I_2 相等时,几乎全部能量密度的测试激光脉冲,均会产生积极作用。

同时考虑到预处理激光引起薄膜内形成原子点阵畸变,情况则复杂得多。此时,预处理激光在该区域所产生的效果要视原子点阵畸变增加的缺陷密度和激光微区退火作用减少的杂质缺陷密度相对大小而定。原子点阵畸变增加的缺陷密度大于激光微区退火作用减少的杂质缺陷密度时,测试激光能量密度越大,反映出的负作用越明显;而近阈值且大于阈值能量密度的测试激光,不一定能反映出该负作用,仍有可能表现出积极作用。这是因为原子点阵畸变引起的缺陷尺寸很小,可能不在低能量密度测试激光下的杂质缺陷敏感尺寸范围之内。

预处理激光能量密度在 I_2 和 I_1 之间时,由于激光微区退火作用,对于几乎全部能量密度的测试激光脉冲而言均会产生积极作用,对样品的抗激光损伤能力有较好的改善效果。在 I_1 时效果达到最佳。预处理激光能量密度要尽量选用在该区域,尤其是该区域的高能段。 I_2 和 I_1 由薄膜材料和杂质缺陷的热力学性能参数决定,由此可见,对于较大 I_2 、 I_1 差值的情况,往往比较容易获得好的激光预处理效果;而对于较小 I_2 、 I_1 差值甚至于为零的情况,则难以在实验上获得积极的激光预处理效果。

预处理激光能量密度在 I_1 和 I_3 之间时,预处理激光辐照同时起到激光退火及诱导薄膜微损伤的作用。对于能量密度近 I_{th} 且大于 I_{th} 的测试激光脉冲而言,能引起薄膜功能性损伤的杂质敏感尺寸范围内不包含预处理激光辐照下能诱导薄膜微损伤的杂质尺寸,所以预处理有明显的改善效果。但对更高能量密度的测试激光脉冲而言,由于预处理激光辐照下能诱导薄膜微尺寸损伤的杂质尺寸进入了测试激光辐照时能引起薄膜功能损伤的杂质敏感尺寸范围内,所以,预处理效果下降,甚至于可能会有负作用,预处理能量密度越大,产生负作用的可能性越大。进一步增加测试激光的能量密度,对应的杂质敏感尺寸范围增加,而其中预处理激光辐照下能诱导薄膜微损伤的杂质尺寸范围所占的比重下降。此时,激光预处理又有可能起到积极作用,但是预处理能量密度越大,出现这种积极效果的可能性越小。

I_1 和 I_3 相等, 则可能出现这样的情况, 预处理激光能量密度稍大于 I_1 时, 微尺寸损伤形成, 对能量密度近 I_{th} 且大于 I_{th} 的测试激光脉冲, 能引起薄膜功能性损伤的杂质敏感尺寸范围便包含了预处理激光辐照下能诱导薄膜微损伤的杂质尺寸, 预处理以负作用为主; 对稍高能量密度的测试激光脉冲而言, 其对应的杂质敏感尺寸范围增加。而其中预处理激光辐照下能诱导薄膜微损伤的杂质尺寸范围所占的比重下降。此时, 激光预处理以激光退火作用为主, 所以, 激光预处理有可能起到积极作用。

可见, 激光预处理所可能产生的效果非常复杂, 这也正是实验结果分散的原因。当然, 由于薄膜材料以及杂质缺陷热物理参数的获取很困难, 目前还很难从理论上准确计算出合适的预处理能量密度范围。但弄清楚激光预处理效果的复杂性, 对激光预处理实验还是会有很大的帮助, 可以使实验计划具有很好的方向性。

3 实 验

电子束蒸发法在 K9 玻璃基片上沉积三倍频偏振分光薄膜, 高折射率材料为 Al_2O_3 , 低折射率材料为 MgF_2 。沉积过程中基片温度为 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 。样品组 1#、2#、3#、4# 采用本底真空约 $2 \times 10^{-3}\text{ Pa}$ 。镀膜后 4# 样品组保留在镀膜机的真空室中退火 3 h, 烘烤温度为 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 。采用后处理以考察真空退火对薄膜性能的影响。

薄膜损伤阈值测量装置^[7]是由波长 355 nm, 脉宽 8 ns, 入射角 33.75° 的 Nd:YAG 激光系统、He-Ne 准直光源、分光镜、聚焦凸透镜、二维可移动样品平台、CCD 和能量计等组成。用衰减片来实现激光脉冲能量的调整, 记录每次测量的衰减比。采用 Nd:YAG 激光最大能量密度的百分比表示测试激光和预处理激光的能量密度。整套系统由计算机控制。激光损伤阈值测试按照 ISO11254-1.2 国际标准, 采用 1-ON-1 方式。

调节不同能量密度台阶, 每个能量密度台阶测量 10 个点, 统计发生破坏的点数, 得出该能量密度下的薄膜损伤概率。为了保证预处理和损伤测量时激光辐照在同一点上, 在每个点进行激光损伤测量之前先由较低能量密度的脉冲作预处理。即按照定位测量点 → 激光预处理 → 激光损伤测量 → 定位下一测量点 → …… 的测量步骤进行。每一个测量能量密度台阶, 选用了不同的预处理能量密度以探索合理的预处理能量密度。

4 结果分析与讨论

由图 4 可以看出, 对样品 3# 采用 15% 和 20% 能量密度的激光脉冲预处理后, 薄膜的损伤阈值由 45.1% 下降到 42.36% 和 40.1%。对样品 1# (拟合曲线没有给出) 采用 10% 能量密度的激光脉冲预处理后, 薄膜的损伤阈值由 39.1% 下降到 26.7%, 下降明显。对样品 2# (拟合曲线没有给出) 采用 10% 能量密度的激光脉冲与处理后, 薄膜的损伤阈值由 44.6% 上升到 44.8%, 略微的增加, 改善效果不明显。对样品 4# (拟合曲线没有给出) 采用 20% 和 25% 能量密度的激光脉冲与处理后, 薄膜的损伤阈值由 48.6% 分别上升到 53% 和 55% 以上。这反映了激光预处理对薄膜抗激光损伤阈值影响的复杂性。

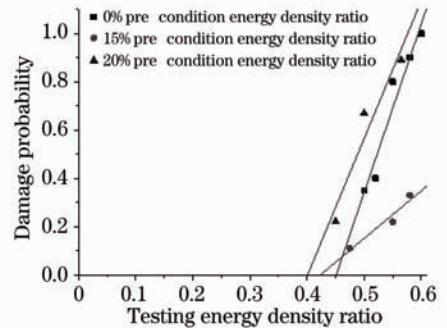


图 4 3# 样品的激光损伤阈值拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of laser induced damage threshold of sample No. 3

由图 5 可以看出, 对于确定的损伤测试能量密度, 损伤概率存在一个最佳预处理能量密度范围。预处理能量密度偏小或偏大, 对提高薄膜抗激光损伤能力不起作用或者效果不佳。

理论分析可知, 预处理能量密度偏小时激光脉冲会导致薄膜内形成轻度原子点阵畸变, 从而增加薄膜损伤概率; 而预处理能量密度偏大时, 由于微尺寸损伤的形成, 预处理效果不稳定, 可能有一定的改善效

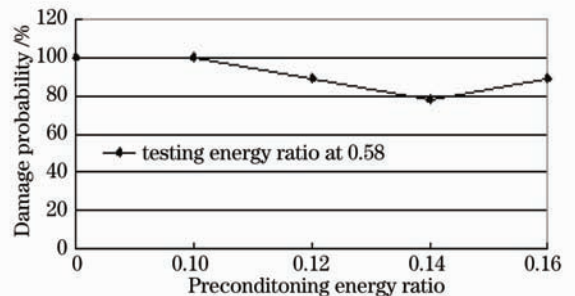


图 5 预处理能量对 2# 样品损伤概率的影响

Fig. 5 Affection of preconditioning energy density on damage probability of sample No. 2

果也可能会有负作用。在最佳预处理能量密度范围内,由于激光退火作用,薄膜损伤概率得到有效降低。

由图 6(a)可以看出,预处理激光能量密度为 20% 时损伤概率增加。对于 45% 能量密度的测试脉冲而言 15% 能量密度的预处理也是不利,虽然该预处理能量密度对于更高能量密度的测试有利。

理论分析可知,此时 20% 的预处理激光能量密度已经超过了 I_3 ,激光预处理会在薄膜中产生微尺寸损伤,对薄膜的抗激光损伤能力产生了负作用,导致薄膜抗激光损伤能力降低。而 15% 的预处理激光能量密度则相当于 I_1 和 I_3 相等时预处理激光能量密度稍大于 I_1 的情况,此时对能量密度近阈值且

大于阈值的测试激光脉冲,以负作用为主;对稍高的测试激光脉冲而言,则有一定的积极作用。

可见,此时 15% 的预处理激光能量密度为近 I_3 且大于 I_3 的能量密度,而 20% 的预处理激光能量密度则大大超过了 I_3 。45% 的测试能量密度为近阈值能量密度,这与实验拟合的样品损伤阈值对应,见图 4。

由图 6(b)可以看出,预处理能量为 25% 时损伤概率明显减小,测试能量密度为 50% 和 53% 时损伤概率变为零。预处理能量为 20% 时,测试能量密度大于 58% 时损伤概率增加,而测试能量密度小于 55% 时损伤概率降低。

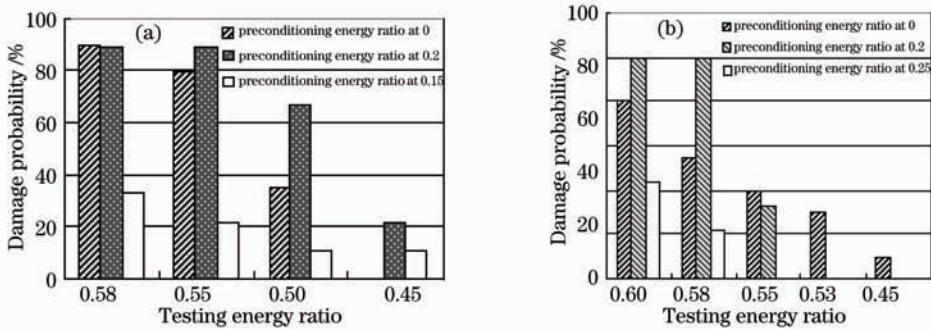


图 6 不同测试激光能量下,不同预处理能量的预处理效果。3# 样品(a), 4# 样品(b)

Fig. 6 Preconditioning effect under different preconditioning laser energy density and testing energy density of sample No. 3 (a), No. 4 (b)

理论分析可知,25% 能量密度的预处理激光可以使得几乎全部能量密度测试激光下的损伤概率降低,所以其能量密度在 I_2 和 I_1 之间。而 20% 的预处理激光能量密度在 I_0 和 I_2 之间,此时原子点阵畸变增加的缺陷密度大于激光微区退火作用减少的杂质缺陷密度,但近阈值且大于阈值能量密度的测试激光,不能反映出该负作用,而以积极作用为主;测试激光能量密度越大,反映出的负作用越明显。

可见,此时 20% 的预处理激光能量密度在 I_0 和 I_2 之间,而 25% 的预处理激光能量密度则在 I_2 和 I_1 之间。50% 和 53% 的测试能量密度为近阈值能量密度,这与实验拟合的样品损伤阈值对应。

5 结 论

激光预处理对薄膜抗激光损伤能力的改变效果非常复杂。由杂质缺陷诱导损伤理论可以解释复杂的实验现象,这反映了杂质诱导损伤理论的合理性,同时也为实验上选定激光预处理参数提供了方向性的指导。理论分析表明预处理激光能量密度应尽量避免低于 I_0 ; 在 I_0 和 I_2 之间时,对能量密度近 I_{th} 且

大于 I_{th} 的测试激光脉冲而言,不会有明显的改善效果。而对更高能量密度的测试激光脉冲有明显的改善效果。如果 I_0 和 I_2 相等,则对于几乎全部的测试激光脉冲而言均会产生积极作用。考虑到预处理激光引起薄膜内形成原子点阵畸变,情况则复杂得多;预处理激光能量密度在 I_2 和 I_1 之间时,对于几乎全部能量密度的测试激光脉冲而言均会产生积极作用;预处理激光能量密度在 I_1 和 I_3 之间时,预处理激光辐照同时起到激光退火及诱导薄膜微损伤的作用。对于能量密度近 I_{th} 且大于 I_{th} 的测试激光脉冲而言,预处理具有明显改善效果的可能(I_1 和 I_3 不相等时)。但对更高能量密度的测试激光脉冲而言,预处理效果下降,甚至于可能会有负作用。预处理能量密度越大,产生负作用的可能性越大。进一步增加测试激光的能量密度,激光预处理又有可能起到积极作用,但是预处理能量密度越大,出现这种积极效果的可能性越小。

参 考 文 献

- 1 Kozlowski M R, Wolfe C R. Large area laser conditioning of dielectric thin film mirrors[C]. Laser Induced Damage in Optical

- Materials, 1989 NBS. Spec. Pub., 1990, 801: 376~392
- 2 Arenberg I W, Mordaunt D W. Experimental investigation on the role of wavelength in the laser conditioning effect[C]. Laser Induced Damage in Optical Materials, 1988 NBS. Spec. Pub., 1989, 775: 516~519
- 3 Stewart A, Guenther A H. The properties of laser annealed dielectric films, laser induced damage in optical materials[C]. Laser Induced Damage in Optical Materials, 1987 NBS. Spec. Pub., 1988, 756: 369~387
- 4 Zhilin Xia, Jianda Shao, Zhengxiu Fan. A new theory for evaluating the number density of inclusions in films[J]. *Applied Surface Science*, 2006, **252**(23): 8235~8238
- 5 Xia Zhilin, Shao Jianda, Fan Zhengxiu. Electrons-phonons collision velocity in films radiated by laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(1): 400~406
夏志林, 邵建达, 范正修. 激光作用下薄膜中的电子-声子散射速率[J]. *物理学报*, 2007, **56**(1): 400~406
- 6 Xia Zhilin, Fan Zhengxiu, Shao Jianda. Effect of bulk inclusion in films on damage probability[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(6): 3007~3012
夏志林, 范正修, 邵建达. 薄膜体内缺陷对损伤概率的影响[J]. *物理学报*, 2006, **55**(6): 3007~3012
- 7 Zhan Meiqiong, Huang Jianbing, Shang Shuzhen *et al.*. Effects of vacuum annealing on the performance of 355 nm $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgF}_2$ high reflectance coatings[J]. *High Power Laser and Partial Beams*, 2004, **16**(11): 1389~1392
占美琼, 黄建兵, 尚淑珍等. 真空退火对 355 nm $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgF}_2$ 高反射薄膜性能的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(11): 1389~1392
- 8 Li Dawei, Xu Cheng, Zhao Yuan' an *et al.*. Delamination of optical thin films induced by 1064 nm laser pulse[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 764~767
李大伟, 许程, 赵元安等. 1064 nm 激光脉冲致光学薄膜分层剥落损伤特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 764~767
- 9 Kong Dejun, Zhang Yongkang, Chen Zhigang *et al.*. Effects of laser heat treatment on properties of Ni-P alloy film by chemical deposition[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 871~875
孔德军, 张永康, 陈志刚等. 激光热处理对化学沉积 Ni-P 合金薄膜性能的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 871~875
- 10 Wei Chaoyang, He Hongbo, Shao Jianda *et al.*. Thermodynamics damage of optical coatings induced by absorbing inclusion thermal irradiation[J]. *Sinica Acta Optica*, 2008, **28**(4): 809~812
魏朝阳, 贺洪波, 邵建达等. 吸收杂质热辐射诱导光学薄膜破坏的热力机制[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 809~812
- 11 Xiao Qiling, He Hongbo, Shao Shuying *et al.*. Influence of deposition temperature on residual stress of yttria-stabilized zirconia thin films[J]. *Sinica Acta Optica*, 2008, **28**(5): 1007~1011
肖祁陵, 贺洪波, 邵淑英等. 沉积温度对氧化钇稳定氧化锆薄膜残余应力的影响[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 1007~1011