

光学材料激光预处理技术机理研究现状

沈超¹ 程湘爱^{1,2} 朱志武³ 江天¹ 戴一帆³

¹国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073

²国防科学技术大学高性能计算国家重点实验室, 湖南长沙 410073

³国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073

摘要 以机理研究为主线对激光预处理技术进行了回顾。从材料类型和激光参数等方面对预处理的理论与实验结果进行归纳分析,得出预处理效果取决于缺陷在热作用下的演变规律的结论。重点分析了三种定量模型,对比了各模型的优缺点,并指出了未来预处理模型的发展趋势。最后结合机理研究的新方法、工业化应用和进一步提高增益等问题对预处理技术进行了展望。

关键词 激光技术; 激光预处理; 激光损伤阈值; 预处理机制

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.050004

Research Progress in Laser Conditioning of Optical Materials

Shen Chao¹ Cheng Xiang'ai^{1,2} Zhu Zhiwu³ Jiang Tian¹ Dai Yifan³

¹College of Opto - Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

²State Key Laboratory of High Performance Computing, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

³College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Focusing on the intrinsic mechanism, research progress in laser conditioning of optical materials is reviewed. In terms of material types and laser parameters, theoretical and experimental conditioning results are concluded and analyzed. As a result, the conditioning effects is determined by the evolution rule of defects under heat. Three quantitative models are discussed in detail. Their merits and demerits are compared, and the modeling tendency of conditioning is pointed out. Finally, the direction of future work is introduced considering problems such as novel research methods, industrial application and improving conditioning gain.

Key words laser technology; laser conditioning; laser-induced damage threshold; conditioning mechanism

OCIS codes 140.3380; 140.3440; 140.3330; 140.3460

1 引言

激光预处理是一种通过在材料表面或体内预辐照低于损伤阈值的激光以改变材料抗激光损伤能力的技术^[1]。经过预辐照后的材料样品通常具有更高的阈值和更小的损伤点密度,因此,激光预处理作为一种有效的后处理手段,已被广泛应用于薄膜、倍频晶体和玻璃等光学元件中^[2-4]。为了在获得最大阈值增益的同时最小化预处理能耗和时间,需要掌握激光预处理机制。激光与材料间的相互作用涉及到光热、光电、非线性吸收、电场作用及等离子体产生等多个方面,其物理机制十分复杂,难以给出一种普适的作用机理。然而理论与实验研究人员通过多年的努力,已经对激光预处理的物理本质取得了一些定性或定量的研究成果

收稿日期: 2013-12-11; 收到修改稿日期: 2014-01-01; 网络出版日期: 2014-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(61340017)

作者简介: 沈超(1989—),男,博士研究生,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: chaoshen0000@sina.com

导师简介: 程湘爱(1966—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: xiang_ai_cheng@126.com(通信联系人)

^[5-11]。魏朝阳等^[12-13]对这些结果进行了总结,但更侧重于预处理技术的总体发展,对机理的总结还不够深入。本文以机理研究为主线,对最新的成果进行归纳分析,重点研究三种定量模型,并指出了激光预处理领域当前存在的问题和发展方向。

2 激光预处理理论与实验研究现状

激光诱导材料损伤的过程大致是:材料通过对激光的本征吸收、杂质吸收和非线性吸收等方式,将光能耦合进材料表面或内部,转化为热能或产生高浓度等离子体,造成热熔融或者击穿破坏^[14]。激光损伤过程本质上具有随机性,但当入射光能大于100%损伤概率能量密度时,发生损伤是确定的^[15]。与损伤过程相比,激光预处理的区别仅在于作用激光能量较低。当低能激光预辐照材料后,材料的阈值却可能提高^[16]、下降^[17]或不变^[18]。同时,阈值变化可能是永久的^[19],也可能是暂时的^[20]。由于其现象的复杂性,目前最有效的研究手段就是进行大量实验,然后从中总结一般性的实验规律。在解释这些共性现象的同时,试图对预处理的本质给出物理层面的解释。

2.1 不同材料的激光预处理特征

作为透明体材料,晶体和玻璃经过预辐照后,除了损伤点密度减少,还伴随着表面粗糙度降低和透射率增加等现象^[21-24]。这些现象使得激光清洗机制^[20]被提出,即激光预辐照光学材料的表面,可以去除其表面吸附的水分、尘埃及其他污染杂质,从而提高其抗激光损伤能力。然而,越来越多的实验表明,激光预处理现象具有永久性,因此激光清洗仅是一种附加机制而非本质原因。Hu等^[23]进一步计算了预处理脉冲作用区域晶体的温度变化,发现晶体内部温度先急剧上升再缓慢下降,表明预处理是一种热退火过程。薄膜的预处理效果相对复杂,与镀膜方式、膜层结构等有关。比如,对LaF₃/MgF₂高反膜,使用电子束沉积的样品阈值提高大于2倍,而对舟皿法沉积样品则没有影响^[25];对HfO₂/SiO₂分光膜能够观察到阈值明显升高^[26],而对高反膜则几乎没有影响^[18]。薄膜预处理过程存在的共性现象是粒子发射^[27]。Schildbach等^[27]认为,这是由于激光预处理过程中沉积的热使薄膜表面膨胀开裂,从而利于节瘤排出和应力释放,提高阈值。然而,也有一些无法用退火机制解释的现象,比如Ling等^[17]发现真空环境下对ZrO₂/SiO₂预处理会导致阈值降低,且氧元素含量会下降,说明预处理过程会诱导产生化学计量比缺陷。这意味着激光预处理过程伴随着缺陷的产生与湮灭,而产生与湮灭缺陷的相对数量则决定了预处理的效果^[7,28]。

2.2 激光参数对激光预处理的影响

连续与脉冲激光预处理实验均有报道^[5-6],连续光的作用机制主要是对材料面形的熔融修复,本文仅对脉冲光进行讨论。脉冲参数包括波长、脉宽、总通量(单脉冲通量×脉冲数)等,其中通量的影响已基本确定,即存在一个阈值通量,高于此通量才有较明显的预处理效果,同时在不造成材料损伤的前提下,通量越高,预处理效果越好^[29-30]。对波长和脉宽的研究目前仅在倍频晶体中开展。Adams等^[31]比较了3 ω (351 nm)、脉宽在55 ps~10 ns之间的激光脉冲对DKDP晶体的预处理效果,测试脉宽为2.6 ns,发现预处理脉宽在860 ps时损伤点密度最小。他还比较了3 ω 和2 ω (527 nm)对KDP晶体在2 ω 测试波长下的预处理效果,结果表明3 ω 预处理效果更好。DeMange等^[30-32]较为系统地研究了1064、532、355 nm三种波长的预处理效果,发现532 nm和355 nm的预处理对三种波长均有效,而1064 nm波长仅对该波长处的损伤有效,对532 nm和355 nm没有影响;同时355 nm预处理只能消除部分缺陷,而532 nm则可消除全部缺陷。他认为原因是1064 nm与532 nm和355 nm的缺陷不同,且532 nm和355 nm的缺陷虽然特征相同,但是具有不同的演变规律。这些结论不但明确了预处理效果是由缺陷主导的,也为定量模型的建立提供了数据支撑。

2.3 预处理方式对激光预处理的影响

最理想的预处理方式是以元件口径大小的激光光斑直接辐照元件表面,然而该方法对激光束的光强分布和束径大小提出了极为苛刻的要求,目前还在探索中^[13]。工程上使用最广泛的是光栅扫描(N-on-1)法^[33],即使用小光斑对元件表面逐点辐照以实现均匀覆盖,并通过优化扫描方式、脉冲能量增幅、单点脉冲个数和最大脉冲能量等参数获得最优效果。Negres等^[34]的研究表明,脉冲能量增幅、单点脉冲个数和最大脉冲能量三种参数的不同组合能获得相同的预处理效果。因此,优化扫描方式成为了减少预处理功耗和时间的关键,也是预处理技术工业化的一个难点。

3 激光预处理的三种定量模型

纳米量级的吸收元已被证明是纳秒激光损伤的主因^[35],因此分析预处理过程也应从纳米吸收缺陷着手。这些缺陷包括划痕等结构缺陷和杂质粒子等外部污染。目前较成熟的定量预处理模型共有三种,这些模型假设存在两个阈值温度:预处理阈值温度 T_{cond} (对应预处理阈值通量 F_{cond})和损伤阈值温度 T_c (对应损伤阈值通量 F_c)。当入射光通量 F 在 (F_{cond}, F_c) 之间时,缺陷减少或湮灭, $F > F_c$ 时发生损伤而 $F < F_{\text{cond}}$ 时无预处理效应。三种模型的区别在于缺陷减少的过程,即预处理后缺陷数量的计算方法不同,详述如下:

3.1 Feit-Rubenchik-Dyan 模型

Feit-Rubenchik-Dyan (F.R.D)模型^[8-10]假设缺陷是杂质粒子,其受光照后升温,当温度大于 T_{cond} 时,杂质分解使得半径 a 减小但其余特性不变。通过求解热扩散方程,该模型给出了阈值通量与粒子半径之间的表达式

$$F_{c/\text{cond}} = \frac{2\lambda T_{c/\text{cond}}}{\alpha \sqrt{\kappa} \xi(a)} \sqrt{\tau}, \quad (1)$$

式中 λ 为基底材料热导率, α 为杂质吸收系数, κ 为基底材料热扩散率, τ 为脉宽,其中

$$\xi(a) = \frac{UA}{1-X^2} \left[\phi\left(\frac{X}{A}\right) - X^2 \phi\left(\frac{1}{XA}\right) \right], \quad (2)$$

式中 $U = \sqrt{\frac{D}{\kappa}}$, $X = U + \sqrt{U^2 - 1}$, $A = \frac{a}{\sqrt{4D\tau}}$, $D = \frac{3\lambda}{4\rho_p c_p}$, $\phi(x) = 1 - \exp(x^2) \text{erfc}(x)$, $\text{erfc}(x)$ 为误差函数, ρ_p 和 c_p 分别为杂质的质量密度和比热。

图1为F.R.D模型下阈值通量与粒子半径的典型分布曲线,其中虚线代表损伤阈值,实线代表预处理阈值^[10]。从图中可看到,预处理前材料阈值为 10 J/cm^2 ,但当通量约为 10 J/cm^2 的脉冲预处理后,半径在 $(a_-(F), a_+(F))$ 之间的杂质半径减小到 $a_-(F)$ 以下,因此阈值上升到 17 J/cm^2 。同时当 $10 \sim 17 \text{ J/cm}^2$ 脉冲辐照后,原本半径大于 $a_+(F)$ 的杂质半径可能会减小至 $(a_-(F), a_+(F))$ 范围内,阈值重新降低,因此需要进行多次能量递增的预处理。假设杂质数密度按照半径的分布为 $n(a)$,则预处理后的损伤点密度为

$$\rho(F) = \int_{a_-(F)}^{a_+(F)} n(a) da - \int_{a_-(F_{\text{cond}})}^{a_+(F_{\text{cond}})} n(a) da, \quad (3)$$

式中 $a_{+/-}(F_{\text{cond}})$ 为通量为 F_{cond} 预处理脉冲可消除的缺陷半径。因此,只要通过实验得到 F_c 和 F_{cond} ,并已知粒子数分布,该模型就能够预测出预处理后损伤点密度。

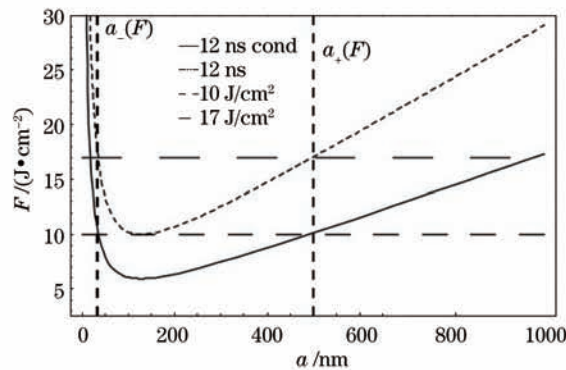


图1 F.R.D模型中阈值通量随粒子半径的典型分布

Fig.1 Typical distribution of threshold fluence as a function of particle size in F.R.D model

3.2 吸收分布模型

吸收分布(ADM)模型^[11,36]在F.R.D模型的基础上,进一步假设吸收元会随机聚集,因而半径相同的杂质吸收系数 α 也存在一定分布。ADM模型认为该分布是正态的,即其概率密度函数为

$$f(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(\alpha-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (4)$$

式中 μ 和 σ 为与缺陷类型有关的参数。ADM 模型将缺陷概括为两种:可被预处理消除的缺陷 μ_1 、 σ_1 和不可消除的缺陷 μ_2 、 σ_2 , 因而总的参数值 $\mu = \mu_1 + \mu_2$, $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$ 。那么,在通量 F 脉冲作用下,半径为 a 的杂质发生损伤的概率为

$$P(F, a) = \int_{\alpha_s(F, a)}^{+\infty} f(\alpha) d\alpha, \quad (5)$$

式中 $\alpha_s(F, a)$ 为半径为 a 的杂质在通量 F 下要达到损伤阈值温度 T_c 所需的吸收系数,可通过热传导方程求得。进一步可给出损伤点密度

$$\rho(F) = \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} n(a) P(F, a) da, \quad (6)$$

式中 a_{\max} 和 a_{\min} 分别为粒子半径的极大和极小值,按经验取 500 nm 和 50 nm。该模型还指出,在 $\alpha_s(F, a)$ 已知情况下,可分别通过 R-on-1 和 S-on-1 损伤实验得到 $P(F, a)$,再从(5)式中算出 μ_2 、 σ_2 和 μ 、 σ ,然后根据粒子半径分布和(6)式即可求出损伤点密度。图2为 ADM 模型的理论值与实验值对比^[37]。可以看出,只要选取合适的 $n(a)$, ADM 模型能够很好地预测出损伤点密度。

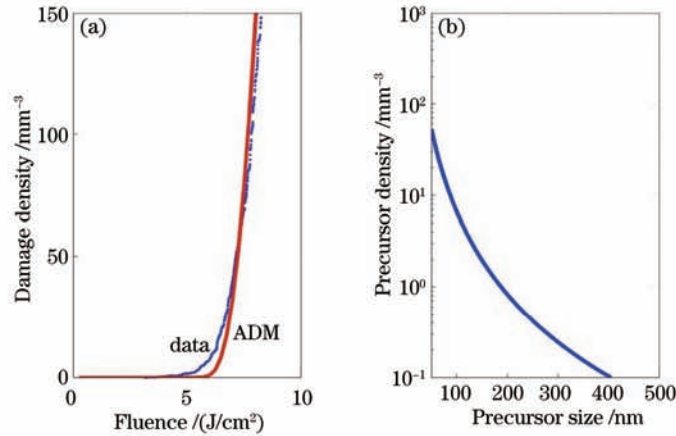


图2 ADM模型理论与实验值对比。(a)损伤点密度对比;(b)相应的 $n(a)$ 值

Fig.2 Comparison between theoretical and experimental results in ADM model. (a) Comparison result of damage site; (b) corresponding value of $n(a)$

3.3 Duchateau 模型

与前两个模型相比, Duchateau 模型^[7]同样考虑光生热对缺陷的影响,不同之处在于其认为缺陷主要是内嵌原子团和结构缺陷,并分别通过内嵌原子团与空位的复合(机制一)和热熔融(机制二)消除。该模型首先给出了 $a \ll \sqrt{D\tau}$ (a 为缺陷半径)时,缺陷吸收产生的温度场表达式

$$T(r, t) = T_0 + \sum_{i=1}^{n_0} \frac{P_A a^2}{4\lambda} \int_{r_i^2/4Dt}^{\infty} \exp(-u) / u du, \quad (7)$$

式中 t 为时间, u 为积分变量,无物理意义, T_0 为初始温度, n_0 为初始缺陷数, $P_A = \varsigma F / \tau$ 为单位体积吸收的功率, ς 为吸收系数,取 10^4 cm^{-1} 。机制一认为,在预处理脉冲作用时,每个内嵌原子团每隔 1 ps 都可能向周围晶格转移,转移概率为

$$P(t) = \exp\left[-\frac{E_a}{k_B T(t)}\right], \quad (8)$$

式中 E_a 为激活能, k_B 为玻尔兹曼常数。原子团每一次转移过程中,只有复合与不复合两种可能。转移过程

停止的条件是 $P(t) < 0.01P(t = \tau)$ 。因此,在转移了 m 步后,剩下的缺陷数量 n_a 为 $n_0 \prod_{i=1}^m [1 - P(t = t_i) \times 0.5]$ 。机制二认为,当与结构缺陷距离大于 $5e$ (e 为缺陷宽度)处的材料温度超过沸点时,缺陷被消除。利用(7)式计算符合消除条件的缺陷数 n' ,则剩余的缺陷数 n_a 为 $n_0 - n'$ 。因为 $F_c \propto \alpha^{-1}$,而 $\alpha \propto n$,因此预处理后的阈值增益为

$$g = \frac{F_c^{\text{ac}}}{F_c^{\text{bc}}} = \frac{n_0}{n_a}, \quad (9)$$

式中 F_c^{ac} 为预处理后的材料损伤阈值, F_c^{bc} 为预处理前的材料损伤阈值。

Duchateau 还对比了两种机制对其他预处理特征的预测能力,结果表明两种机制都能很好地解释脉冲通量和脉宽对预处理结果的影响,但机制一无法解释预处理前后损伤密度曲线形状不变的原因,机制二则无法解释预处理效果与脉冲数的关系。

3.4 对比分析

从三种模型的理论出发点可知, F.R.D 模型和 Duchateau 模型是从求解热方程出发,将温度变化与缺陷数目结合起来计算损伤点密度和阈值变化,而 ADM 模型更依赖于统计理论,其参数的取值从实验获得,因此预测结果具有较高的准确性。值得注意的是,目前求解热方程时都假设温升过程中杂质和基底材料的物理参数为常数。实际上,杂质的吸收系数可能会是温度的增函数,因此会对温升过程产生正反馈,从而引发热不稳定性^[37]。另外,根据 Mie 理论,杂质的吸收还应与入射波长和杂质半径有关。这也许是当前热模型结果不够准确的原因。另外,虽然 ADM 模型针对的是 DKDP 晶体的预处理,但由于模型预测结果并不依赖于材料的物理参数,因此该模型具有较高的可移植性。从热过程出发虽然更有可能揭示预处理的本质,但这种从实验数据中获取参数的方法将是未来预处理模型发展的趋势。

4 存在的问题和发展方向

4.1 理论与实验结合

预处理领域的研究工作开展的较早较多,但由于研究变量的复杂性和应用背景的单一性,目前的研究重点还是预处理对损伤阈值和损伤点密度的影响。实际上,对样品损伤的其他方面进行考察可能会发现揭示预处理本质的新方法。比如,尹伟等^[38]比较了 355 nm 预处理前后熔石英的损伤增长情况,发现预处理后的损伤增长速度远高于预处理前。如果明确了主导损伤增长的缺陷,就可能对预处理过程中缺陷的演变规律有更深一步的了解。

4.2 最优预处理方式

前已指出,增益相同的情况下,扫描方式是决定预处理功耗和时间的关键,就高斯光斑预处理而言,其包括扫描路径、相邻光斑覆盖比例和扫描次数等。这些参数的选择取决于关心的指标,比如最小预处理诱导损伤^[39]和能量覆盖最均匀^[40]等。另外,激光能量和光斑位置的波动也会影响扫描方式的选择。如何就给定的预处理系统和技术指标给出最合适的扫描方式,是目前预处理工程应用中亟需解决的难题。

4.3 提高预处理增益

推广预处理工艺的另一个困难是预处理增益不高,尤其是对熔石英,目前报道的最高阈值增益仅为 1.4^[22]。相比之下, HF 蚀刻技术的最高增益能达到 6^[41]。将预处理与 HF 蚀刻和 CO₂ 修复等技术相结合是提高预处理增益的有效手段。然而,由于后两种方法属于破坏式技术,此时还需要考虑残余应力、面型变化以及导致的波前畸变等负效应。

5 结论

激光预处理能有效提高光学材料的抗损伤阈值,并具有无污染、安全性高等优点,是高功率激光领域广泛使用的后处理技术。纳秒及皮秒脉冲下对预处理机理的研究表明缺陷是决定预处理效果的主要因素,但由于缺陷本质的复杂性和观测手段的缺乏,对预处理过程中缺陷的演变规律尚不清楚。预处理加快损伤增长等新现象的发现,为准确完善的定量建模提供了可能。最后,预处理技术的研究目前仍局限于实验室阶

段,如何将其工业化,是预处理工作者需要努力的方向。

参考文献

- 1 H Bercegol. What is laser conditioning? A review focused on dielectric multilayers [C]. SPIE, 1994, 3578: 421-426.
- 2 M R Kozlowski, M Staggs, F Rainer. Laser conditioning and electronic defects of HfO_2 and SiO_2 thin films [C]. SPIE, 1990, 1441: 269-282.
- 3 Mike Staggs, Ming Yan, Mike Runkel. Laser raster conditioning of KDP and DKDP crystals using XeCl and Nd:YAG lasers [C]. SPIE, 2001, 4347: 400-407.
- 4 Joseph A Menapace, Bernie Penetrante, Don Golini, *et al.*. Combined advanced finishing and UV-laser conditioning for producing UV-damage-resistant fused silica optics [C]. SPIE, 2002, 4679: 56-68.
- 5 J Swain, S Stokowski, D Milam, *et al.*. Improving the bulk laser damage resistance of potassium dihydrogen phosphate crystals by pulsed laser irradiation [J]. Appl Phys Lett, 1982, 40(4): 350-352.
- 6 Paul A Temple, W Howard Lowdermilk, David Milam. Carbon dioxide laser polishing of fused silica surfaces for increased laser-damage resistance at 1064 nm [J]. Appl Opt, 1982, 21(18): 3249-3255.
- 7 G Duchateau. Simple models for laser-induced damage and conditioning of potassium dihydrogen crystals by nanosecond pulses [J]. Opt Express, 2009, 17(13): 10434-10456.
- 8 M D Feit, A M Rubenchik, J B Trenholme. Simple model of laser damage initiation and conditioning in frequency conversion crystals [C]. SPIE, 2005, 5991: 59910W.
- 9 M D Feit, A M Rubenchik. Implications of nanoabsorber initiators for damage probability curves, pulselength scaling and laser conditioning [C]. SPIE, 2003, 5273: 74-82.
- 10 Anthony Dyan, Matthieu Pommès, Guillaume Duchateau, *et al.*. Revisited thermal approach to model laser-induced damage and conditioning process in KH_2PO_4 and $\text{D}_{2x}\text{KH}_{2(1-x)}\text{PO}_4$ crystals [C]. SPIE, 2007, 6403: 640307.
- 11 Zhi M Liao, M L Spaeth, K Manes, *et al.*. Predicting laser-induced bulk damage and conditioning for deuterated potassium dihydrogen phosphate crystals using an absorption distribution model [J]. Opt Lett, 2010, 35(15): 2538-2540.
- 12 Wei Chaoyang, Zhao Yuanan, He Hongbo, *et al.*. Laser conditioning on optical thin film components [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(5): 51-57.
魏朝阳, 赵元安, 贺洪波, 等. 光学薄膜元件的激光预处理技术[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(5): 51-57.
- 13 Chen Meng, Yuan Xiaodong, Lü Haibing, *et al.*. Laser conditioning technology of optics [J]. Optical Technique, 2010, 36(1): 79-83.
陈 猛, 袁晓东, 吕海兵, 等. 光学元件激光预处理技术[J]. 光学技术, 2010, 36(1): 79-83.
- 14 A A Manenkov, A M Prokhorov. Laser-induced damage in solids [J]. Sov Phys Usp, 1986, 19(1): 104-122.
- 15 M F Koldunov, A A Manenkov, I L Pokolotilo. Interrelation of the laser-induced damage characteristics in statistical theory [J]. Quantum Electronics, 2000, 30(7): 592-596.
- 16 Chaoyang Wei, Hongbo He, Jianda Shao, *et al.*. Effects of CO_2 laser conditioning of the antireflection $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ coatings at 351 nm [J]. Opt Commun, 2005, 252(4-6): 336-343.
- 17 Xiulan Ling, Yuanan Zhao, Dawei Li, *et al.*. Laser conditioning of high-reflective and anti-reflective coatings in vacuum environments [J]. Opt Commun, 2010, 283(13): 2728 ~ 2731.
- 18 Yuanan Zhao, Tao Wang, Dawei Zhang, *et al.*. Laser conditioning and multi-shot laser damage accumulation effects of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ antireflective coatings [J]. Applied Surface Science, 2005, 245(1-4): 335-339.
- 19 J E Swain, S E Stokowski, D Milam, *et al.*. The effect of baking and pulsed laser irradiation on the bulk laser damage threshold of potassium dihydrogen phosphate crystals [J]. Appl Phys Lett, 1982, 41(1): 12-14.
- 20 M E Frink, J W Arenberg, D W Mordaunt. Temporary laser damage threshold enhancement by laser conditioning of antireflection-coated glass [J]. Appl Phys Lett, 1987, 51(6): 415-418.
- 21 N C Kerr, D C Emmony. The effect of laser annealing on laser-induced damage threshold [J]. Journal of Modern Optics, 1990, 37(4): 787-802.
- 22 Shizhen Xu, Xiaodong Yuan, Wei Yin, *et al.*. Effect of UV laser conditioning on fused silica in vacuum [J]. Optical Materials, 2009, 31(6): 1013-1016.
- 23 Guohang Hu, Yuanan Zhao, Dawei Li, *et al.*. Transmittance increase after laser conditioning reveals absorption properties variation in DKDP crystals [J]. Opt Express, 2012, 20(22): 25169-25180.

- 24 G Guéhenneux, Ph Bouchut, M Veillerot, *et al.*. Impact of outgassing organic contamination on laser-induced damage threshold of optics: effect of laser conditioning [C]. SPIE, 1995, 5991: 1-11.
- 25 E Eva, K Mann, N Kaiser, *et al.*. Laser conditioning of LaF₃/MgF₂ dielectric coatings at 248 nm [J]. Appl Opt, 1996, 35 (28): 5613-5619.
- 26 Dawei Li, Yuan'an Zhao, Jianda Shao, *et al.*. 0.532- μ m laser conditioning of HfO₂/SiO₂ third harmonic separator fabricated by electron-beam evaporation [J]. Chin Opt Lett, 2008, 6(5): 386-387.
- 27 M Schildbach, L L Chase, A V Hamza. Investigation of neutral atom and ion emission during laser conditioning of multilayer HfO₂-SiO₂ coatings [C]. SPIE, 1990, 1441: 287-293.
- 28 Liu Hao, Chen Songlin, Wei Yaowei, *et al.*. Laser conditioning on HfO₂ film monitored by calorimeter [J]. Opt Express, 2012, 20(1): 698-705.
- 29 Paul DeMange, Christopher W Carr, Raluca A Negres, *et al.*. Laser annealing characteristics of multiple bulk defect populations within DKDP crystals [J]. J Appl Phys, 2008, 104(10): 103103.
- 30 Paul DeMange, Raluca A Negres, Christopher W Carr, *et al.*. Laser-induced defect reactions governing damage initiation in DKDP crystals [J]. Opt Express, 2006, 14(12): 5313-5328.
- 31 J J Adams, T L Weiland, J R Stanley, *et al.*. Pulse length dependence of laser conditioning and bulk damage in KD₂PO₄ [C]. SPIE, 2004, 5647: 265-278.
- 32 P DeMange, C W Carr, R A Negres, *et al.*. Multiwavelength investigation of laser-damage performance in potassium dihydrogen phosphate after laser annealing [J]. Opt Lett, 2005, 30(3): 221-223.
- 33 Lynn Sheehan, Mark Kozlowski, Frank Rainer, *et al.*. Large-area conditioning of optics for high-power laser systems [C]. SPIE, 1994, 2114: 559-568.
- 34 R A Negres, P DeMange, S G Demos. Investigation of laser annealing parameters for optimal laser-damage performance in deuterated potassium dihydrogen phosphate [J]. Opt Lett, 2005, 30(20): 2766-2768.
- 35 Laurent Gallais, Jérémie Capoulade, Jean-Yves Natoli, *et al.*. Investigation of nanodefekt properties in optical coatings by coupling measured and simulated laser damage statistics [J]. J Appl Phys, 2008, 104(5): 053120.
- 36 Zhi M Liao, R Roussell, J J Adams, *et al.*. Defect population variability in deuterated potassium di-hydrogen phosphate crystals [J]. Optical Materials Express, 2012, 2(11): 1612-1623.
- 37 M F Koldunov, A A Manenkov. Theory of laser-induced inclusion-initiated damage in optical materials [J]. Opt Engineering, 2013, 51(12): 1-11.
- 38 尹伟. 熔石英的真空损伤与损伤增长的研究[D].成都:电子科技大学, 2009. 35-39.
- 39 M D Feit, A M Rubenchik. Analysis of raster scanning damage and conditioning experiments [C]. SPIE, 2003, 4932: 238-249.
- 40 M Runkel, M C Nostrand. An overview of raster scanning for ICF-class laser optics [C]. SPIE, 2003, 4932: 136-146.
- 41 Tayyab I Suratwala, Phil E Miller, Jeffery D Bude, *et al.*. HF-based etching processes for improving laser damage resistance of fused silica optical surfaces [J]. J Am Ceram Soc, 2011, 94(2): 416-428.