

2 μm 激光对磷锗锌晶体的损伤阈值测量及影响因素分析

苑利钢 陈 国 侯天禹 韩 隆 赵 鸿 王克强

华北光电技术研究所固体激光技术重点实验室, 北京 100015

摘要 参照国际标准 ISO 21254 及其规范, 组建了一套 2 μm 波长脉冲激光损伤阈值测试装置, 利用该实验装置并采用 R-on-1 的测试方法, 测量了不同表面光学质量红外非线性晶体磷锗锌的表面激光损伤阈值, 同时测量并分析了激光脉冲频率、脉冲宽度等参数对磷锗锌晶体激光损伤阈值的影响, 通过测试对该晶体在实际使用中避免激光损伤提供了重要的实验参考。

关键词 激光器; 2 μm 脉冲激光器; 磷锗锌晶体; 激光损伤阈值; R-on-1

中图分类号 TN246 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0802001

Damage Threshold Measurement of 2 μm Laser on ZnGeP₂ Crystal and Its Influencing Factors

Yuan Ligang Chen Guo Hou Tianyu Han Long Zhao Hong Wang Keqiang

Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China

Abstract A 2 μm pulsed laser damage threshold testing apparatus is set up according to the international standard ISO 21254, the surface laser damage threshold of infrared nonlinear optical crystal ZnGeP₂ with different surface quality are measured, meanwhile, the influence of different laser parameters, such as pulse frequency, pulse width, etc, on the surface laser damage threshold testing results are analyzed. These testing results provide an important experimental reference to avoid laser damage to ZnGeP₂ in practical use.

Key words lasers; 2 μm pulsed laser; ZGP crystal; laser damage threshold; R-on-1

OCIS codes 140.3070; 140.3330

1 引 言

磷锗锌(ZnGeP₂, ZGP)是一种性能优越的红外非线性晶体材料,其透明波段范围宽(0.7~12 μm)、非线性系数高($d_{36}=75 \text{ pm/V}$)、热导率高(350 $\text{mW/cm}\cdot\text{K}$)、硬度大,同时具有较大的双折射系数^[1],这些优点使得该晶体成为目前应用最为广泛的红外非线性晶体材料。利用 2 μm 脉冲激光器作为该晶体的抽运源,并采用光参量振荡(OPO)技术,国内外研究人员已经实现了高功率中红外激光输出^[2-3],也实现了波长超过 8 μm 的长波红外激光输出^[4]。然而,尽管有着诸多优点,该晶体抗激光损伤性能成为限制其实现更高功率或更大能量输出的一个瓶颈。国外已经有研究人员对 ZGP 晶体的激光损伤阈值(LDT)在一定的激光参数下进行了实验测试^[5],得出了一些有益的结论,然而不同激光参数对 ZGP 晶体损伤的影响如何,以及如何降低 ZGP 晶体的在使用中的损伤几率,目前为止,尚没有开展过系统的实验研究分析,也没有明确的结论。为此,本文设计了一套的实验装置,通过改变激光的频率、脉冲宽度等参数,在实验中测得了 ZGP 晶体在不同参数 2 μm 脉冲激光辐照下的表面损伤阈值,并通过对实验数据的分析,得出了降低 ZGP 晶体在实际使用过程中损伤几率的重要结论。

收稿日期: 2015-01-12; 收到修改稿日期: 2015-03-08

基金项目: 固体激光技术重点实验室基金(9140C040604)

作者简介: 苑利钢(1979—),男,博士,高级工程师,主要从事二极管抽运固体激光器方面的研究。

E-mail: greenlaser@sina.com

2 研究方法和装置

2.1 研究方法

目前国际上存在的激光损伤阈值测试方法主要有 1-on-1, S-on-1, R-on-1 和光栅扫描共 4 种, 并且都制定了相应的检测标准和相应的测试规范^[6-8]。其中 1-on-1 和 S-on-1 的测量结果是用零几率损伤阈值表示, 尤其是 1-on-1 方式, 应用最为广泛, 但是其测试过程耗时较长且测试区域有限; R-on-1 和光栅扫描在一定程度上体现了激光预处理的效果^[9], 其中, R-on-1 中的每个测试点都有独立的损伤阈值, 其最低的损伤阈值反映了测试样品本身的阈值; 光栅扫描方式是对样品进行大面积扫描, 能反映出节瘤等缺陷对激光损伤阈值的影响^[10], 但耗时最长。4 种测量方式都反映了测试样品表面损伤特性, 尽管不同测量方式测得的结果有差异^[11], 有时可能相差较大^[12], 但是在某种程度上都表征了样品表面的抗激光辐照能力。

受限于测试样品的数量, 也为了测试流程的简化, 实验中选择了 R-on-1 的测试方法, 其主要测量步骤如下:

对每一个测试点进行激光多脉冲辐照, 按照一定的梯度逐步增加激光的能量, 直到样品表面出现损伤为止, 记录下发生损伤时的能量密度(F_{Dmin})及前一个未发生损伤时的能量密度(F_{NDmax}), 然后移至下一个测试点, 重复这一过程, 每个测试点处最大不发生损伤能量密度与最小发生损伤能量密度的平均值 $F_{th}=(F_{Dmin}+F_{NDmax})/2$ 为该测试点的损伤阈值。

2.2 实验装置

实验中所采用的激光损伤阈值测试装置如图 1 所示, 其核心部分为一台主振荡功率放大(MOPA)结构的 Ho:YLF 激光器, 该激光器光路结构原理如图 2 所示, 种子光为线偏振输出、波长 2050 nm 的 Ho:YLF 激光器, 由波长 1940 nm 连续输出的 Tm:YAP 激光器进行抽运, Ho:YLF 激光器采用声光 Q 开关(AO-QS)进行脉冲调制, 脉冲重复频率 2~5 kHz 连续可调, 平均输出功率约 15 W, 为了达到足够产生破坏的能量, 对种子光进行了一级放大, 放大后的输出平均功率最高可达 50 W。实验中所采用的 Ho:YLF 激光器采用了端面抽运结构, 由于采用端面抽运结构, 又采用了 MOPA 方式进行放大, 所以最终输出激光光束质量非常高, 接近衍射极限, 图 3 为实际测得作用在晶体表面位置处的光斑二维和三维分布图, 从图中可以看出, 光斑截面分布较为光滑, 具有明显的高斯光束分布特征。由于该激光器的种子源和放大级均采用了激光二极管(LD)连续抽运方式, 输出的激光脉冲能量稳定性也非常好, 实际测量的激光脉冲能量不稳定性波峰-谷(PV)值小于 2%, 保证了测试光源符合 ISO 21254 要求。

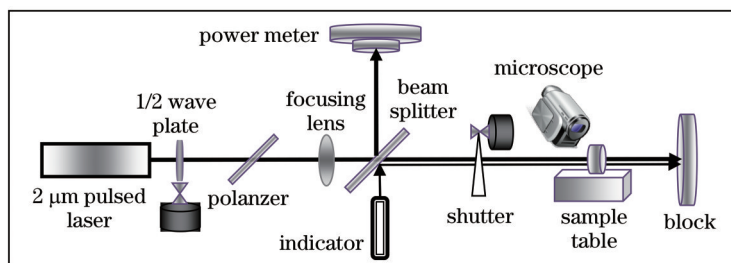


图 1 激光损伤阈值测试实验装置

Fig.1 Schematic of the laser induced damage threshold testing setup

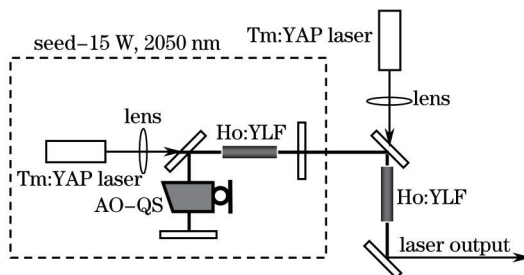


图 2 2 μm 脉冲激光器实验装置图

Fig.2 Experimental setup of 2 μm pulsed laser

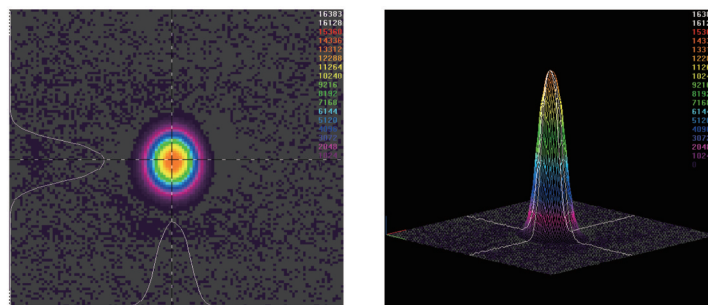


图3 光斑截面二维和三维分布图

Fig.3 2D and 3D distribution of facula profiles

在激光损伤阈值测试实验装置中,激光器输出的2050 nm波长偏振光首先进入由1/2波片和偏振片组成的衰减器,通过转动1/2波片的角度使得最终到达测试样品的单脉冲能量连续可调,为了在测试样品表面达到所需的光斑尺寸,采用了聚焦透镜对光束进行会聚,将入射至晶体测试表面的激光光斑调整为合适大小,光斑太小会导致测量不精确,带来较大测量误差,光斑如果太大,又达不到产生破坏所需要的能量密度。实验中实际采用的光束直径为1 mm左右,按照ISO 21254对高斯光束的定义通过光斑分析仪进行测量。在聚焦透镜之后,加入了反射率为5%的分光镜对激光能量进行实时监测,同时分光镜也作为He-Ne指示光的耦合镜,使得激光和指示光在分光镜后完全重合,辅助测试者控制激光作用在测试样品表面的位置。在分光镜之后,光路中装有光闸,由电控开关进行控制,在光闸之后为摆放测试样品的样品台,样品台由二维机械调整装置控制,被测样品可以在垂直光路截面上水平和上下两个方向平移。在样品台的侧上方放置有一台放大倍率为10的光学显微镜,辅助观测样品表面有无损伤发生。

测试时,首先将测试样品放置到光路中距耦合透镜固定距离的位置,通过指示光摆放好被测样品表面与激光作用的部位,并使其表面与入射光严格垂直,待2 μm脉冲激光器输出至额定功率,按梯度逐步调整1/2波片与偏振片的夹角,增加辐照到样品表面的能量,每次调整1/2波片的角度后,由电控开关控制光闸的闭合,使样品每次接收激光辐照的时间为1 s,并通过显微镜观测样品表面有无损伤发生,并通过能量计记下此刻的脉冲能量,如果没有损伤发生,则继续调整1/2波片,直到损伤发生,记录下此刻的脉冲能量,记为 E_{Dmin1} ,前一个未发生损伤时记录的脉冲能量记为 E_{NDmax1} ,并由电荷耦合器件(CCD)相机在分光光路上等效距离处,测量该位置的光束直径,记为 D_1 ,等效光斑面积为 A_1 ,则该点的损伤阈值为 $F_{th1}=(E_{Dmin1}+E_{NDmax1})/2$,平移样品,采用同样的方法,测得另外两个点的损伤阈值分别记为 F_{th2} 、 F_{th3} ,则此3个数的最小值 $F_{thmin}=\text{Min}(F_{th1},F_{th2},F_{th3})$ 即为在该样品的表面损伤阈值。

3 实验结果与分析

实验之前,准备了6块截面为7 mm×7 mm、长度为7~15 mm、表面粗糙度不等的ZGP晶体测试样品,如图4所示,从左至右两两分别为表面粗抛光、精抛光、镀制增透膜的3种样品。

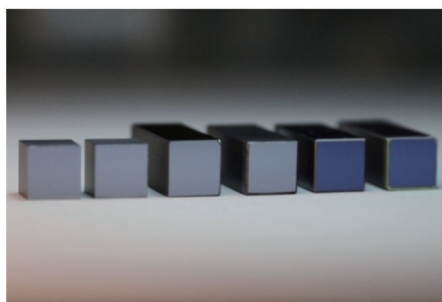


图4 测试前的ZGP晶体样品

Fig.4 Samples of ZGP crystal before test

3.1 不同表面光学质量对ZGP晶体表面损伤阈值的影响

实验中,首先在同样的激光参数辐照下,测试了表面光学质量对ZGP损伤阈值的影响,测试条件为激光

脉冲重复频率为 2 kHz, 脉冲宽度为 25 ns, 光斑直径 1.0 mm。为了避免晶体表面溅射挥发物质对下一测试点的影响, 通过样品台机械二维调整装置控制 2 个测试点的间距大于 2.5 mm。从表 1 测量结果可以看出, 三种不同表面光学质量的晶体测得的激光损伤阈值有着较大的差别, 分别为 1.21、1.33 和 1.56 J/cm², 表面粗糙度的降低提升了 ZGP 晶体表面激光损伤阈值, 增透(AR)膜的镀制能够进一步提升其表面激光损伤阈值。

表 1 3 种不同光学表面质量样品损伤阈值测量结果

Table 1 LDT results of three samples with different surface optical quality

Sample type	Roughness (R_a) /nm	F_{th1} /(J/cm ²)	F_{th2} /(J/cm ²)	F_{th3} /(J/cm ²)	F_{thmin} /(J/cm ²)
Rough polished	30~50	1.21	1.23	1.29	1.21
Fine polished	3~5	1.37	1.39	1.33	1.33
AR-coated	1~5	1.58	1.63	1.56	1.56

3.2 激光脉冲重复频率对 ZGP 晶体损伤阈值的影响

为了明确激光脉冲频率对测试结果的影响, 对于表面镀有增透膜的 ZGP 测试样品, 开展了在不同脉冲重复频率条件下的对比实验, 所采用的脉冲重复频率依次为 2、3、4 和 5 kHz, 测试结果如表 2 所示, 由于很难精确调制不同脉冲重复频率条件下的脉冲宽度, 实验中选取了不同脉冲频率条件下脉冲宽度最接近的一组数据进行对比, 从测试结果来看, 不同脉冲频率条件下测得的 ZGP 表面损伤阈值有着明显的区别, 脉冲重复频率的提升降低了其表面激光损伤阈值, 从脉冲频率为 2 kHz 时的 1.56 J/cm², 降至 5 kHz 时的 0.71 J/cm²。

表 2 不同激光脉冲重复频率条件下样品损伤阈值测量结果

Table 2 LIDT results of sample at the condition of different laser pulse repetitions

Sample type	Repetition rate /kHz	Pulse width /ns	F_{th1} /(J/cm ²)	F_{th2} /(J/cm ²)	F_{th3} /(J/cm ²)	F_{thmin} /(J/cm ²)
AR-coated	2	25	1.58	1.63	1.56	1.56
AR-coated	3	32	1.39	1.35	1.41	1.35
AR-coated	4	33	0.97	1.11	0.95	0.95
AR-coated	5	35	0.81	0.85	0.71	0.71

由表 2 测试结果很明显可以看出, 随着脉冲重复频率的增加, 以单脉冲能量密度表示的晶体表面激光损伤阈值在逐渐降低, 然而晶体表面可以承受的激光辐照的平均功率却是随着脉冲重复频率的增加而增大。如图 5 所示, 镀有增透膜的 ZGP 晶体表面发生损伤之前可以承受的最大平均功率由 2 kHz 时的 24.5 W, 提升至 5 kHz 时的 32.0 W。

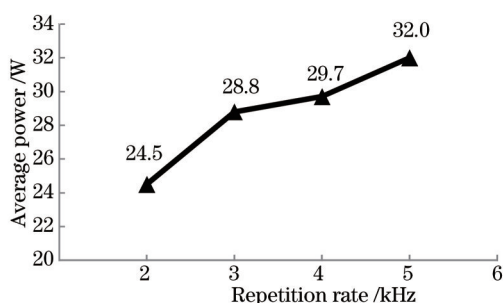


图 5 不同脉冲重复频率条件下晶体表面可承受激光辐照的最高平均功率

Fig.5 Maximum average power of crystal surface can endure under different pulse repetition frequency conditions

3.3 激光脉冲宽度对 ZGP 晶体损伤阈值的影响

为了测量脉冲宽度对于测量结果的影响, 对于相同表面光学质量的测试样品, 通过调整 2 μm 种子源的脉冲宽度, 测量了 3 种脉冲频率条件下不同脉冲宽度条件下 ZGP 晶体表面激光损伤阈值, 测试结果如表 3 所示。

在表 3 中, 分别测试了 3、4、5 kHz 3 个脉冲频率下不同脉冲宽度对 ZGP 晶体损伤阈值的影响, 由于各频率条件下脉冲宽度很难精确调整, 所以实验中并没有测量出不同脉冲频率和相同脉冲宽度条件下的数据对比, 而且实际工作中由于 2 kHz 条件下脉冲宽度很难调整, 所以也没有给出 2 kHz 下, 不同脉冲宽度条件下的测试对比结果。但是从图 6 可以明显看出, 脉冲重复频率对于测量结果有着明显的影响, 而相同脉冲重复频率、不同脉冲宽度条件下的测量结果并没有明显差别, 可以看出在数十纳秒范围内, 脉冲宽度的变化不会显

著影响晶体表面的激光损伤阈值。

表3 不同脉冲宽度条件下样品损伤阈值测量结果

Table 3 LDT results of sample at the condition of different pulse widths

Sample type	Repetition rate /kHz	Pulse width /ns	$F_{th1}/(J/cm^2)$	$F_{th2}/(J/cm^2)$	$F_{th3}/(J/cm^2)$	$F_{thmin}/(J/cm^2)$
AR-coated	3	32	1.39	1.35	1.41	1.35
AR-coated	3	45	1.29	1.31	1.37	1.29
AR-coated	3	48	1.31	1.35	1.33	1.31
AR-coated	3	60	1.35	1.39	1.33	1.33
AR-coated	4	33	0.97	1.11	0.95	0.95
AR-coated	4	47	0.95	0.93	0.93	0.93
AR-coated	4	55	0.91	0.93	0.95	0.91
AR-coated	5	35	0.81	0.85	0.71	0.71
AR-coated	5	50	0.69	0.71	0.71	0.69
AR-coated	5	65	0.73	0.73	0.75	0.73

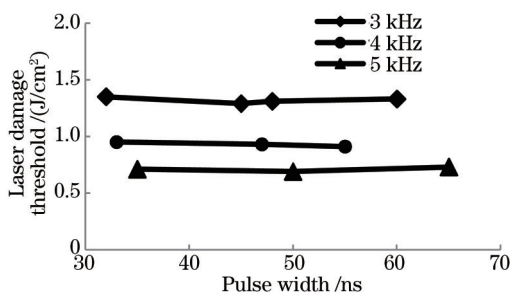


图6 不同脉冲宽度和脉冲频率条件下测得的损伤阈值曲线图

Fig.6 LDT curve measured under different pulse widths and frequencies

图7为测试后的部分晶体样品,从左至右依次为粗抛光、精抛光、镀制增透膜三种表面条件的样品,测试过程中,粗抛光晶体表面在激光辐照下极易形成损伤,由于表面光学质量不均匀,所以产生激光损伤程度差别较大,有些点只是形成细微的损伤,镀制增透膜的ZGP测试样品,损伤阈值比前者明显要高,但是一旦产生损伤,其表面的破坏程度也较为严重。

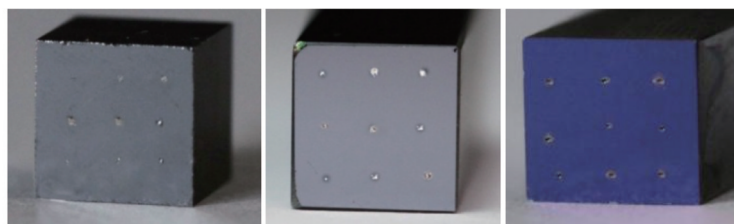


图7 测试后的ZGP晶体样品

Fig.7 Samples of ZGP crystal after test

激光与光学元件的相互作用是一个复杂的过程,对于脉冲宽度为纳秒量级的激光而言,其对光学元件的损伤主要由热效应引起,元器件吸收光能转换为热能,形成局部高温和温度梯度,并由此产生热熔融和热应力损伤,其起始过程与元器件的杂质和表面缺陷有很大关系。

由于纳秒量级激光产生的损伤由热效应引起,从实际的测量结果可以看出,随着脉冲重复频率的增加,温度的累积效应越严重,所测得的ZGP晶体激光损伤阈值越低。

光学元器件表面的激光损伤阈值具有较强的脉宽效应。一般而言,其激光损伤阈值随脉冲宽度的增加而升高,激光能量密度损伤阈值与脉冲宽度的经验公式为

$$J_{th} \propto J_0 \cdot t_p^m, \quad (1)$$

式中 J_{th} 为光学元件的理论损伤阈值, J_0 为归一化损伤阈值, t_p 为脉冲宽度, m 为与光学元件本身特性相关的影响因子。由激光脉冲宽度对ZGP晶体损伤阈值的影响实验结果可以看出,其损伤阈值并没有随脉冲宽

度的增加而增加,可能原因有两个:1)由于实验条件所限,测量中所采用激光脉冲宽度范围有限,没有反映出整体趋势;2)ZGP晶体损伤阈值影响因子 m 值较小,脉冲宽度的变化引起的损伤阈值的变化很小。

4 结 论

为了分析 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光对ZGP晶体的损伤影响因素,搭建了一套 $2.05\ \mu\text{m}$ 波长激光损伤阈值测试装置,通过该装置并采用R-on-1的测试方法,测量了不同表面光学质量、不同脉冲重复频率以及不同脉冲宽度条件下,ZGP晶体的表面损伤阈值。由测试结果可以看出:1)ZGP表面光学质量对其表面损伤阈值有着很大的影响,表面光学质量的改善,能够明显提升其抗损伤阈值;2)损伤阈值与脉冲重复频率关系密切,脉冲重复频率越高,则其损伤阈值越低,但是同样条件下,其表面可以承受的总的平均功率反而更高;3)同样表面光学质量和同样脉冲重复频率,不同脉冲宽度条件下,测得的ZGP晶体表面损伤阈值基本相同。由此可见,在实际使用过程中,尤其是ZGP晶体在OPO技术应用领域,为了提升ZGP晶体的抗激光破坏能力必须尽可能提升ZGP晶体的表面光学加工质量;其次,应尽量采用更高脉冲重复频率的激光,以提升总的可承受平均功率;同时,尽可能压缩激光脉冲宽度以提升峰值功率从而提高OPO转换效率。

参 考 文 献

- 1 G D Boyd, E Buehler, F G Storz. Linear and nonlinear optical properties of ZnGeP_2 and CdSe [J]. Appl Phys Lett, 1971, 18(7): 301-304.
- 2 Wei Lei, Xiao Lei, Han Long. ZGP optical parametric oscillator pumped by $\text{Tm}:\text{YAP}$ laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0702006.
魏磊,肖磊,韩隆. $\text{Tm}:\text{YAP}$ 激光抽运ZGP晶体光参量振荡器[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0702006.
- 3 E Lippert. Progress with OPO-based systems for mid-IR generation[C]. SPIE, 2011, 8187: 8187OF.
- 4 K L Vodopyanov, F Ganikhanov, J P Moffetone, *et al.*. ZGP optical parametric oscillator with $3.8\sim 12.4\ \mu\text{m}$ tunability[J]. Opt Lett, 2000, 25(11): 841843.
- 5 Kevin T Zawilski. Laser damage threshold of single crystal ZnGeP_2 at $2.05\ \mu\text{m}$ [C]. SPIE, 2005, 5991: 599104.
- 6 International Standardization Organization, Lasers and laser-related equipment—determination of laser-induced damage threshold of optical surfaces—part 1: 1-on-1 test, ISO 21254-1[S]. 2011.
- 7 International Standardization Organization, Lasers and laser-related equipment—determination of laser-induced damage threshold of optical surfaces—part 2: S-on-1 test, ISO 21254-2[S]. 2011.
- 8 Jean H, Pierre G, Jean D, *et al.*. R-on-1 automatic mapping: a new tool for laser damage testing[C]. SPIE, 1996, 2714: 90-101.
- 9 Sheehan L, Kozlowski M, Stolz C, *et al.*. Large area damage testing of optics[C]. SPIE, 1996, 2775: 357-369.
- 10 Shen Chao, Cheng Xiang'ai, Zhu Zhiwu, *et al.*. Research progress in laser conditioning of optical materials[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 050004.
沈超,程湘爱,朱志武,等. 光学材料激光预处理技术机理研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 050004.
- 11 Zhou Gang, Ma Bin, Jiao Hongfei, *et al.*. Laser damage threshold measurements of $1064\ \text{nm}$ high-reflection mirrors[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(4): 963-968.
周刚,马彬,焦宏飞,等. $1064\ \text{nm}$ 高反射薄膜激光损伤阈值测量方法[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(4): 963-968.
- 12 Liu Xiaofeng, Li Dawei, Li Xiao, *et al.*. $1064\ \text{nm}$ laser conditioning effect of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ high reflectors deposited by e-beam[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(6): 1545-1549.
刘晓凤,李大伟,李笑,等. 电子束蒸发制备 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 高反膜的 $1064\ \text{nm}$ 激光预处理效应[J]. 中国激光, 2009, 36(6): 1545-1549.

栏目编辑: 宋梅梅