

大口径融石英光栅反射衍射的 SBS 损伤分析

朱德燕, 彭志涛, 向勇*

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 为了分析大口径融石英光栅反射衍射导致的受激布里渊散射(SBS)损伤,建立了光栅的设计分析模型,计算了光栅从 1 到 6 级次的反射衍射角、焦距及效率;根据 SBS 原理分析了未施加相位调制和施加相位调制下融石英光栅反射衍射的 SBS 增益及强度,并结合工程实例验证了该分析结果的可靠性。实验结果表明:在未施加相位调制时,融石英光栅反射衍射的 SBS 强度大,元件损伤严重,寿命短;施加相位调制后,光栅反射衍射的 SBS 增益大幅降低,SBS 强度小于融石英的损伤阈值,元件寿命得以显著延长。在实际的高功率激光系统中,必须施加相位调制以抑制光栅反射衍射的 SBS 损伤。

关键词 光栅; 受激布里渊散射损伤; 融石英; 反射衍射; 大口径

中图分类号 O439; O437.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0108002

Analysis of Stimulated Brillouin Scattering Damage by Reflected Diffraction of Fused Silica Grating with Large Aperture

Zhu Deyan, Peng Zhitao, Xiang Yong

Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang,
Sichuan 621900, China

Abstract In order to solve the stimulated Brillouin scattering (SBS) damage by reflected diffraction of fused silica grating with large aperture, we establish the design and analysis model of grating, the reflected diffraction angle, focal length and efficiency from 1 to 6 orders reflected diffraction of the grating are calculated. The gain and intensity of SBS with modulated laser and original laser are analyzed based on SBS principle, and the reliability of the analysis is verified by an engineering example. The experimental results show that the SBS intensity is large, the grating element is seriously damaged and its service life is short when the phase modulation is not applied. Moreover, when the phase modulation is applied, the SBS intensity is less than the damage threshold of fused silica and the service life of grating element increases evidently. In the actual high power laser system, phase modulation must be applied to suppress SBS damage of grating reflected diffraction.

Key words grating; stimulated Brillouin scattering damage; fused silica; reflected diffraction; large aperture

OCIS codes 050.1950; 160.6030; 290.5900

1 引 言

随着科技的进步,激光驱动器正朝着大口径、高功率密度的趋势发展。在实际的激光驱动器系统中,高功率光学损伤集中在终端光学系统中的倍频晶体、聚焦透镜、窗口玻璃、融石英光栅等元件上。

融石英光栅作为一种特殊的光学元件,其损伤机理和负载能力已成为当前激光装置发展中人们广泛关注的问题^[1-3]。

融石英光栅的基本原理是:在融石英玻璃后表面刻蚀光栅结构,使得 0 级衍射光聚焦到靶点,1 级衍射光聚焦到取样光焦点。因此,融石英光栅的损

收稿日期: 2017-08-17; 收到修改稿日期: 2017-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(61377102,61605185)、国防基础科研计划(B1520133010)

作者简介: 朱德燕(1990—),女,博士,助理研究员,主要从事光学设计、检测方面的研究。

E-mail: zhedy@aliyun.com

* 通信联系人。E-mail: xiangyong_caep@163.com

伤除了包括高功率激光对它的破坏外,还包括光栅结构导致的损伤,光栅结构导致的损伤主要是指光栅反射衍射导致的受激布里渊散射(SBS)损伤。针对高功率激光对大口径融石英材料的破坏,1990年诺瓦(NOVA)系统的相关研究机构提出高功率激光下融石英材料会产生SBS、受激拉曼散射、自聚焦效应等,这些非线性效应将导致传输激光附加相位、光束质量下降,并导致融石英玻璃损伤。美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)早在20世纪70年代就开始了这方面的相关研究,分析了大口径融石英玻璃的损伤机理,研究了融石英三倍频体的损伤阈值^[2-8]。中国科学院上海光学精密机械研究所等单位也从非线性效应的原理上分析了融石英玻璃的损伤机理和负载能力,建立了横向SBS(TSBS)的数值耦合模型,提出了抑制TSBS等增益的方案^[7-11]。针对光栅结构本身导致的损伤,美国LLNL针对实验结果进行分析后认为:在不施加相位调制的条件下,融石英光栅反射衍射导致的SBS损伤强度远高于融石英元件三倍频体的损伤阈值,光栅会被损坏;施加相位调制后,融石英光栅反射衍射导致的SBS损伤强度低于其损伤阈值,不会产生额外的SBS损伤。然而,国内外科研机构均没有根据光栅原理计算光栅反射衍射参数,也没有从理论上分析反射衍射导致的SBS增益及强度,或与实验结果进行对比^[11-15]。

目前,国内外激光驱动器系统大都采用融石英光栅作为三倍频取样测量的重要光学元件,其设计原理、设计参数、损伤机理已成为驱动器研究及工程化的一个重要问题。本文建立了融石英光栅的设计模型,根据模型计算了神光III原型装置中大口径融石英光栅的1~6级反射衍射角、焦距及效率,利用SBS基本原理结合衍射效率计算出了融石英光栅的SBS增益及强度,找到了减小SBS的方法,并通过实验验证了该模型和分析方法。

2 光栅原理及设计模型

高功率激光驱动器系统中融石英光栅的基本原理是光学全息术。光学全息术分为两步成像:第一步是利用干涉的方法将物体的全部信息(振幅和相位)记录下来,第二步是利用光学衍射的方法将物体的全部信息再现出来。具体来说,就是利用靶点和取样光焦点的两个点光源记录,光栅的波前再现意味着提供一种波前变换。光栅的基本示意图如图1所示。

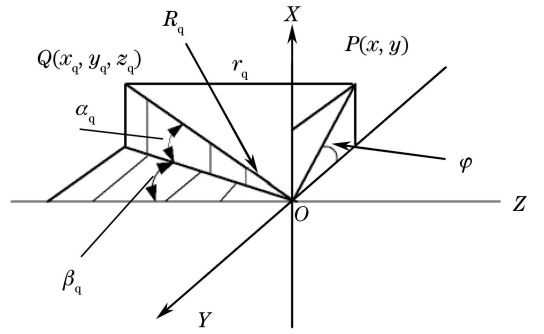


图1 光栅坐标系

Fig. 1 Coordinate system of grating

全息光栅的干涉图形成在一个直角坐标系中。其中, Q 是空间中的任意一点,光栅面在 XOY 平面内, P 是光栅全息面上的一点,从 Q 到 P 点的距离为 r_q ,从 Q 到全息面坐标系中心点的距离为 R_q ,直线 OQ 在 YOZ 平面上的投影与 Z 轴的夹角为 β_q ,与直线 OQ 的夹角为 α_q ,则 Q 点在该坐标系中的位置可以用三个参量 α_q 、 β_q 和 R_q 来确定。因此,可以通过成像性质确定光栅结构光线的方向和成像点位置为^[4]

$$\frac{1}{R_I} = \frac{1}{R_C} \pm \frac{\mu}{m^2} \left(\frac{1}{R_O} - \frac{1}{R_R} \right), \quad (1)$$

$$\sin \alpha_I = \sin \alpha_C \pm \frac{\mu}{m} (\sin \alpha_O - \sin \alpha_R), \quad (2)$$

$$\cos \alpha_I \sin \beta_I = \cos \alpha_C \sin \beta_C \pm \frac{\mu}{m} (\cos \alpha_O \sin \beta_O - \cos \alpha_R \sin \beta_R). \quad (3)$$

式中 R 为距离, α 和 β 均为夹角,各参数的下标 R 、 O 、 C 、 I 分别表示记录参考点、记录物点、再现点和像点, $\mu = \frac{\lambda_C}{\lambda_O}$ 为再现光与记录光的波长之比, m 为衍射级次, λ 为衍射波长。

像方焦点坐标的表达式为^[4]

$$\begin{cases} x_{F'} = \frac{m^2 z_R z_O \pm m \mu (x_O z_R - x_R z_O)}{\pm \mu (z_R - z_O)} \\ y_{F'} = \frac{m^2 z_R z_O \pm m \mu (y_O z_R - y_R z_O)}{\pm \mu (z_R - z_O)} \\ z_{F'} = \frac{m^2 z_R z_O}{\pm \mu (z_R - z_O)} \end{cases}, \quad (4)$$

式中 z_R 为记录参考点的 z 坐标, z_O 为记录物点的 z 坐标, x_O 为记录物点的 x 坐标, x_R 为记录参考点的 x 坐标, y_O 为记录物点的 y 坐标, y_R 为记录参考点的 y 坐标。(4)式中的 \pm 符号在分析虚像时取正值,分析实像时取负值。因此,全息光学元件的焦距可以表示为^[4]

$$f_H = \frac{\mu}{m} \left(\frac{1}{R_O} - \frac{1}{R_R} \right). \quad (5)$$

全息光学元件的衍射效率定义为从全息光学元件表面出射后的成像光束能量与进入衍射表面之前的能量之比。因此,考虑具有倾斜干涉条纹的厚全息光学元件,其示意图如图 2 所示。

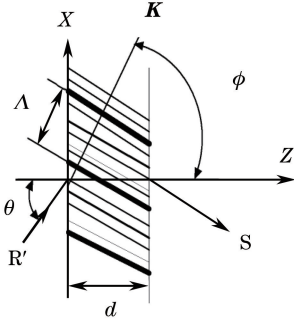


图 2 具有倾斜干涉条纹的全息光学元件

Fig. 2 Holographic optical element with tilted interference stripes

在图 2 中, R' 为入射波, S 为衍射波, θ 为光线在介质外的入射角, \mathbf{K} 为垂直于干涉条纹面的光栅矢量, Λ 为干涉条纹间隔, ϕ 为条纹的倾斜角度, d 为全息光学元件的厚度。因此可以根据其耦合波方程式,定义 \mathbf{S} 为衍射波函数, C 为倾斜因子,将耦合波方程简化^[4]为

$$\begin{cases} C_{R'} = \cos \theta \\ C_S = \cos \theta - \frac{\mathbf{K}}{\beta} \cos \phi \\ \mathbf{K} = \frac{2\pi}{\Lambda} \\ \nu = \frac{\pi n_1 d}{\lambda (C_{R'} C_S)^{1/2}} \\ \xi = \frac{\nu d}{2C_S} \end{cases}, \quad (6)$$

式中 $C_{R'}$ 为入射波的倾斜因子, C_S 为衍射波的倾斜因子, β 为全息图与 z 轴夹角, n_1 为记录介质的折射率。

则衍射效率 η 可定义为

$$\eta = \frac{|C_S|}{C_{R'}} \mathbf{S} \mathbf{S}^*, \quad (7)$$

式中 \mathbf{S}^* 为衍射波函数的共轭。将(7)式化简可得到透射衍射效率 η_t 和反射衍射效率 η_r :

$$\eta_t = \frac{\sin(\nu^2 + \xi^2)}{(1 + \xi^2/\nu^2)^{1/2}}, \quad (8)$$

$$\eta_r = 1 / \left[1 + \frac{1 - \xi^2/\nu^2}{\text{sh}^2(\nu^2 + \xi^2)^{1/2}} \right]. \quad (9)$$

3 光栅反射衍射的 SBS 损伤分析

3.1 光栅设计结果

神光 III 原型装置的靶场系统示意图如图 3 所示。

由图 3 可知,靶点位置为光栅 0 级衍射光焦点,根据光栅 0 级和 1 级透射衍射角和焦距计算出全息光栅,再结合(5)~(9)式可以计算得到光栅各级次的反射衍射角 θ 、焦距 f 及效率 η ,如表 1 所示,下标表示光栅的反射衍射级次。

表 1 光栅设计结果

Table 1 Designing results of grating

Parameter	Value
θ_1, f_1, η_1	$9.50^\circ, 1202.8 \text{ mm}, 2.1 \times 10^{-3}$
θ_2, f_2, η_2	$27.2^\circ, 1202.8 \text{ mm}, 1.6 \times 10^{-7}$
θ_3, f_3, η_3	$34.1^\circ, 636.5 \text{ mm}, 2.3 \times 10^{-4}$
θ_4, f_4, η_4	$42.2^\circ, 457.6 \text{ mm}, 1.6 \times 10^{-7}$
θ_5, f_5, η_5	$59.1^\circ, 178.9 \text{ mm}, 7.8 \times 10^{-5}$
θ_6, f_6, η_6	$64.5^\circ, 91.4 \text{ mm}, 4.7 \times 10^{-8}$

全内反射条件为 $n \sin \theta \geq 1$ (n 为折射率), 融石英材料在 351 nm 波段的折射率为 1.4767, 则满足全内反射的临界角为 42.6° 。由表 1 可知, 融石英光栅反射衍射时, 其 1~4 级反射衍射光的衍射角均小于临界角, 不满足全内反射条件, 第 5 级以及更高级次的反射衍射角满足全内反射。从第 6 级次开始, 衍射效率在 1×10^{-7} 量级及以下, 第 5 级次衍射光比更高级次衍射光的效率高太多。因此, 分析光栅第 5 级次反射衍射导致的 SBS 损伤。

3.2 SBS 原理及增益计算

SBS 过程可描述为抽运波、斯托克斯波通过声波进行的非线性相互作用。抽运波通过电致伸缩产生声波, 之后引起介质折射率的周期性调制。抽运形成的折射率光栅通过布拉格衍射散射抽运光, 由于多普勒位移与以声速移动的光栅有关, 散射光产生了频率下移。同样, 这个散射过程可以看成是一个抽运光子的湮灭, 同时产生了一个斯托克斯光子和一个声频声子, 示意图如图 4 所示。

散射过程始终遵循能量和动量守恒, 将斯托克斯波的形成用布里渊增益系数来描述, 当入射激光通量较高时, SBS 增益较大。则针对大口径融石英光栅, 其 SBS 增益可表示为^[8]

$$G(I_L, L, \lambda, t_L) = 2 \sqrt{\frac{g(\lambda) I_L L t_L}{\tau(\lambda)}}, \quad (10)$$

$$I = I_0 \exp(G), \quad (11)$$

式中 $g(\lambda)$ 为增益系数; $\tau(\lambda)$ 为声子弛豫时间, $\tau(\lambda) = 1.1 \text{ ns}$; I_L 为抽运光功率密度; t_L 为抽运光

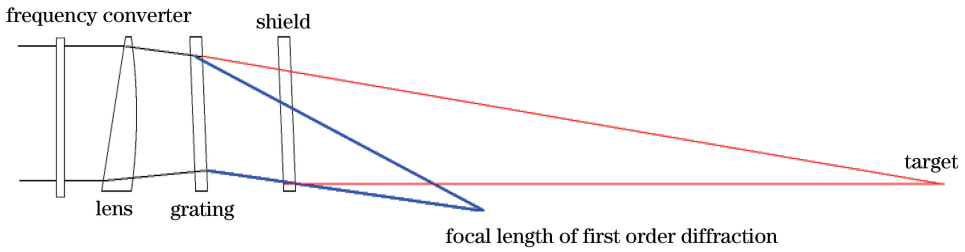


图 3 终端光学组件示意图

Fig. 3 Schematic of optical layout of final optics assembly

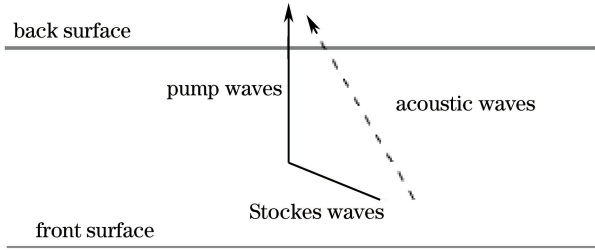


图 4 SBS 示意图

Fig. 4 Schematic of stimulated Brillouin scattering

脉宽; L 为 SBS 增益长度; I 为 SBS 强度; I_0 为输入激光强度。

若基频光为窄带光, 光栅工作在 351 nm 波长下, 其增益系数为 7.07 cm/GW, 脉宽为 3 ns, 激光通量为 3.1 J/cm², 光栅尺寸为 33 cm, 光束有效通光口径为 29 cm, 光栅侧面未抛光斜化, 侧面反射率为 1, 则 SBS 传输距离 L_0 为 61 cm, 考虑光栅的光束非通光区, 则 SBS 增益长度 $L = L_0 - (33 - 29) \times 2 = 53$ cm。光栅的 SBS 增益为 $G = 2 \times \sqrt{\frac{7.07 \times (3.1/3) \times 53 \times 3}{1.1}} = 65$, 强度 $I = (3.1/3) \times 7.8 \times 10^{-5} \times \exp(65) = 1.4 \times 10^{24}$ GW/cm²。

若 SBS 从光栅侧面逸出, 不反射, 只考虑单程, 则 SBS 增益长度为光束通光口径的一半, 即 14.5 cm, 此时 SBS 增益 $G = 2 \times \sqrt{\frac{7.07 \times (3.1/3) \times 14.5 \times 3}{1.1}} = 34$, 强度 $I = (3.1/3) \times 7.8 \times 10^{-5} \times \exp(34) = 4.8 \times 10^{10}$ GW/cm²。

由于融石英元件的三倍频体损伤阈值为 114 GW/cm², 若基频光不施加相位调制, 不论是侧面反射还是只考虑单程, 光栅反射衍射导致的 SBS 强度都会超过其损伤阈值, 最后会产生“之”字形的 SBS 损伤, 即前后表面交替出现的弧形损伤, 损伤示意图如图 5 所示。

若前端增加相位调制器, 则窄带光变为相位调

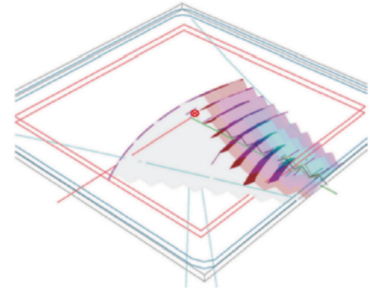


图 5 光栅反射衍射的 SBS 损伤示意图

Fig. 5 Schematic of stimulated Brillouin scattering damage by reflected diffraction of grating

制宽带光, 其示意图如图 6 所示。

从光谱上看, 窄带只有单一的频率成分, 施加相位调制后出现了多个频率成分, 不同频率成分的强度不同。由于 SBS 强度与抽运光强度有关, 因此考虑强度最大的频率成分。施加 30 GHz 的相位调制后, 其最强频率成分的强度为窄带光强度的 0.078, 其 SBS 增益 $G = 2 \times \sqrt{\frac{7.07 \times 0.078 \times (3.1/3) \times 14.5 \times 3}{1.1}} = 9.49$, 强度 $I = 0.078 \times (3.1/3) \times 7.8 \times 10^{-5} \times \exp(9.49) = 0.08$ GW/cm²。在前端施加相位调制后, 调制后的 SBS 增益得以大幅降低, 最强频率成分的 SBS 强度都远小于其损伤阈值, 不会出现“之”字形损伤。

3.3 光栅反射衍射的 SBS 损伤实验

基于神光 III 原型装置, 采用基频光为窄带, 三倍频光为 3 ns 脉宽、3.1 J/cm² 通量, 连续进行 26 发次实验, 光栅的暗场成像结果如图 7 所示。

对比图 7 与图 5 可知, 经过 26 发次的高功率激光成像后, 光栅上出现了明显的“之”字形损伤, 其损伤形状与预估的一致, 且该损伤导致光栅损坏, 不能继续使用, 阻碍了装置正常运行。在此基础上, 更换一块新的取样光栅, 基频光增加 30 GHz 带宽, 三倍频光仍为 3 ns 脉宽、3.1 J/cm² 通量, 再进行连续 26 发次实验, 光栅的暗场检测结果如图 8 所示。

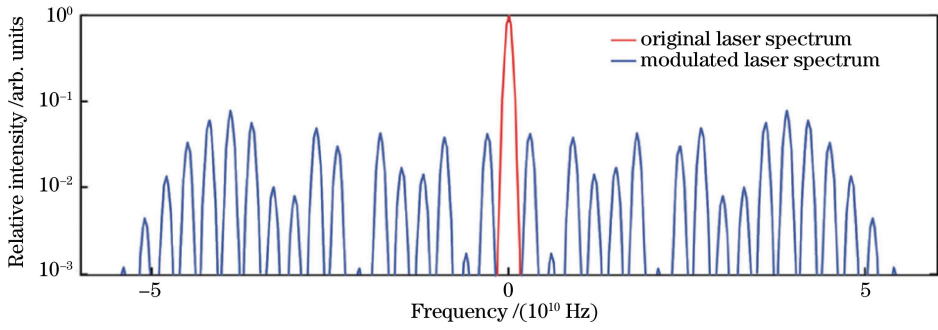


图 6 增加相位调制后的光谱与原光谱

Fig. 6 Modulated laser spectrum and the original laser spectrum

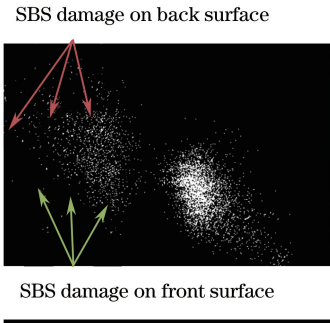


图 7 光栅反射衍射的 SBS 损伤

Fig. 7 Stimulated Brillouin scattering damage by reflected diffraction of grating

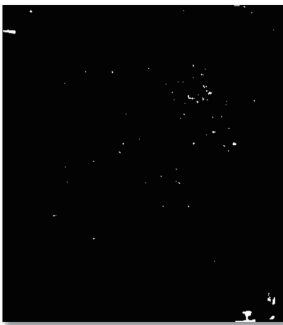


图 8 光栅暗场检测结果

Fig. 8 Dark-field result of grating

由图 8 可知,施加相位调制后,融石英光栅上未出现“之”字形损伤,光栅的反射衍射光不会导致 SBS 损伤。因此,针对高功率激光驱动器系统中的融石英光栅,为了减小元件损伤,使其寿命更长,应在前端增加相位调制。我国神光 III 原型装置与美国 LLNL 的实验对比均可以验证这个结论。

4 结 论

建立了光栅的设计分析模型,利用模型计算了光栅从 1 到 6 级次的反射衍射角、焦距及效率,根据 SBS 原理计算出未施加相位调制和施加相位调制下

融石英光栅反射衍射的 SBS 增益及强度,并利用工程实例验证了该分析结果。结果显示:在未施加相位调制时,融石英光栅反射衍射的 SBS 增益大,SBS 强度大于损伤阈值,元件损伤严重;施加相位调制后,光栅反射衍射的 SBS 增益大幅降低,SBS 强度小于融石英的损伤阈值,元件寿命得以显著延长。本研究在抑制大口径融石英光栅 SBS 损伤、提高大口径融石英光栅使用寿命及保证装置高效运行等方面具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] English R E, Laumann C W, Miller J L, *et al.* Optical system design of the National Ignition Facility [C]. SPIE, 1998, 3482: 726-736.
- [2] Lawrence Livermore National Laboratory. National Ignition Facility user guide [Z/OL]. [2016-06-30]. http://lasers.llnl.gov/for_users/pdfs/2012user_guide.pdf.
- [3] van Wonterghem B M, Burkhart S C, Spaeth M L. National Ignition Facility commissioning and performance [C]. SPIE, 2004, 5341: 55-65.
- [4] Zhou H X, Cheng Y F. Holographic optics [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 16-68.
周海宪, 程云芳. 全息光学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 16-68.
- [5] Bude J, Miller P, Baxamusa S, *et al.* High fluence laser damage precursors and their mitigation in fused silica [J]. Optics Express, 2014, 22(5): 5839-5851.
- [6] Eggleston J M, Kushner M J. Stimulated Brillouin scattering parasitics in large optical windows [J]. Optics Letters, 1987, 12(6): 410-412.
- [7] Yang A H, Liu D A, Gao Y R, *et al.* Propagation and judgement technique of hot images in high power laser system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0901006.
杨爱华, 刘德安, 高雅茹, 等. 高功率激光系统中热像的传输及预判技术 [J]. 中国激光, 2017, 44(9):

- 0901006.
- [8] Thompson C E, Kyrazis D T, Murray J R, *et al.* Experimental observation and suppression of transverse stimulated Brillouin scattering in large optical components[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1989, 6(12): 2402-2410.
- [9] Tang S X, Ouyang X P, Zhu B Q, *et al.* Research on high-power laser induced damage of large aperture fused silica [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(3): 756-760.
唐顺兴, 欧阳小平, 朱宝强, 等. 高功率激光对大口径融石英玻璃的破坏的研究[J]. 光学学报, 2009, 29(3): 756-760.
- [10] You K W, Zhang Y L, Zhang X J, *et al.* Analysis of near-field modulations caused by defects in high power laser system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 43(3): 0302002.
尤科伟, 张艳丽, 张雪洁, 等. 高功率激光系统中缺陷引起的近场调制分析[J]. 中国激光, 2017, 43(3): 0302002.
- [11] Hao Y F, Sun M Y, Shi S, *et al.* Research on rear surface damage in picosecond laser ablation of K9 glass[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0102015.
郝艳飞, 孙明营, 时双, 等. 皮秒激光烧蚀 K9 玻璃后表面损伤研究[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0102015.
- [12] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, *et al.* The National Ignition Facility laser performance status[J]. Applied Optics, 2007, 46(16): 3276-3303.
- [13] Wang J, Zhang X M, Han W, *et al.* Experimental observation of near-field deterioration induced by stimulated rotational Raman scattering in long air path[J]. Chinese Physics Letters, 2011, 28(8): 084211.
- [14] Smith A V, Do B T. Bulk and surface laser damage of silica by picosecond and nanosecond pulses at 1064 nm[J]. Applied Optics, 2008, 47(26): 4812-4832.
- [15] Mose E I. Ignition on the National Ignition Facility: a path towards inertial fusion energy [J]. Nuclear Fusion, 2009, 49(10): 486-496.