

大口径片状放大器放大自发辐射效应的实验研究

曹兆栋^{1,2} 王 利^{3*} 张志祥³ 张攀政³ 周申蕾³ 谢 静³ 冯 伟² 马伟新² 朱 俭² 王占山¹

¹同济大学物理科学与工程学院, 上海 200092

²中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800

³中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

摘要 放大自发辐射(ASE)是影响钕玻璃大口径片状放大器增益性能的重要因素。通过测试钕玻璃大口径片状放大器在不同抽运条件下的增益性能,研究了 ASE 效应对增益系数和增益分布均匀性的影响,并利用实验数据推算出 ASE 效应造成的增益系数降低比例。随着抽运能量的增加,ASE 效应造成的增益分布塌边、平均增益降低愈发明显。该研究为国产大口径钕玻璃片状放大器的优化设计提供了实验支撑。

关键词 激光光学;片状放大器;增益;放大自发辐射

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0601006

Experimental Study on Amplified Spontaneous Emission in Large-Aperture Slab Amplifiers

Cao Zhaodong^{1,2} Wang Li³ Zhang Zhixiang³ Zhang Panzheng³ Zhou Shenlei³
Xie Jing³ Feng Wei² Ma Weixin² Zhu Jian² Wang Zhanshan¹

¹School of Physical Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

²Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China

³Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Amplified spontaneous emission (ASE) is a key issue which affects the gain of large-aperture Nd:glass slab amplifiers. Gain measurement experiments under different pump conditions are carried out to study the effect of ASE on gain coefficients and gain distributions. The gain coefficient derating ratio caused by ASE is calculated based on the experimental data. The results show that the gain turning-down and the decrease of average gain becomes notable as the pump energy increases. The study provides experimental support for further optimization of home-made large-aperture slab amplifiers.

Key words laser optics; slab amplifier; gain; amplified spontaneous emission

OCIS codes 140.3280; 140.3530; 140.3580; 230.4480

1 引 言

片状放大器是高功率激光装置中最为重要的组成部分,原因在于:1)高功率激光装置中超过 99%的能量来自装置中的大口径片状放大器;2)片状放大器及其匹配的能库是高功率激光装置建成本中最重要的一部分;3)片状放大器引入的波前畸变(含线性和非线性部分)是影响高功率激光装置输出光束质量的最重要因素^[1-3]。

高功率激光装置对片状放大器的性能要求为高增益系数、高储能效率和低波前畸变。高增益系数可以

收稿日期: 2016-01-04; **收到修改稿日期:** 2016-02-04

作者简介: 曹兆栋(1987—),男,硕士研究生,主要从事高功率片状放大器等方面的研究。E-mail: gdczd@163.com

导师简介: 王占山(1963—),男,博士,教授,主要从事极紫外、软 X 射线和 X 射线光学与光学薄膜等方面的研究。

E-mail: wangzs@tongji.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: wl@siom.ac.cn

在保持合理的装置累积 B 积分情况下显著提升高功率激光装置的输出能力。低波前畸变可以降低装置对自适应光学系统的校正范围需求。高储能效率可以降低能库的配置需求,从而降低建造成本。

放大自发辐射(ASE)效应是影响片状放大器增益系数和储能效率的重要因素。Trenholme^[4]于1972年采用基于蒙特卡罗的光线追迹方法研究了不同形状(球形、矩形、椭圆形)片状放大器中ASE效应的影响。该方法成为ASE研究的基本方法,并成为设计片状放大器的指导性原则之一,即片状放大器长轴与峰值增益系数的乘积(gL)一般不大于3,使得ASE效应处于可接受的水平。20世纪70年代至80年代,LLNL(美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室)针对包边参数对ASE效应的影响进行了理论和实验研究,并发展了适合大口径片状放大器的包边工艺^[5]。1990年,LLNL报道了基于小口径样片荧光效应比对进行ASE效应评估的方法,并通过实验数据拟合获得了ASE衰减速率模型^[6]。至此,LLNL对于钽玻璃片状放大器中ASE效应的研究形成了完整的体系,其ASE模型可以准确预估放大器的增益性能。

国内对于片状放大器ASE效应的研究主要来自中科院上海光学精密机械研究所张华^[7-8]以及中国工程物理研究院贺少勃的研究小组^[9-12]。张华等依据LLNL报道的光线追迹方法编写了用于ASE效应研究的模拟程序,再现了LLNL的报道结果。贺少勃等建立了一套较完整的包含空间分布和时间效应的三维ASE模型,分析了不同电压、不同储能分布、不同抽运时刻、不同增益长度积条件下ASE效应对放大器储能效率和小信号增益系数的影响。利用该模型,对通光口径为29 cm的 $4 \times 2 \times 3$ 组合式放大器进行了模拟计算。计算结果表明,随着抽运电压升高,ASE效应明显加强,抽运电压为23 kV时,ASE效应造成平均储能下降21.1%,小信号增益系数损耗为16.62%,增益不均匀性为7.44%。

目前国内报道的研究成果主要是理论模拟结果,鲜有实验结果。由于片状放大器的作用过程要经过复杂的能量转移转化,需要将存储在能源模块中的电能传输到抽运氙灯,氙灯产生等离子体发光将电能转化为抽运光,空间传输的抽运光只有部分能够最终抵达钽玻璃并被钽玻璃吸收,而被钽玻璃吸收的抽运光中也只有极少部分能够最终转化为激光信号的放大输出。在该作用过程中,每一个转移转化过程的效率都受到片状放大器的能源参数、氙灯具体参数及分布^[13]、放大器腔结构、腔内表面处理工艺、钽玻璃参数等多方面的相互制约和影响,所以理论结果虽然有助于更好地理解片状放大器的物理规律,但在没有实验结果支撑、校正的情况下,很难精确预测放大器实际放大性能。同时,国产钽玻璃的组分、包边材料与工艺都与国际上的报道不同,因此在钽玻璃放大器的优化设计过程中无法直接采用国际上已经报道的实验研究结果。

本文在不同抽运条件下测试了单口径片状放大器(SSA)的增益性能,实验研究了ASE效应对大口径片状放大器小信号增益系数和增益均匀性的影响,在此基础上拟合得到ASE效应衰减速率公式,为国产钽玻璃放大器增益性能的进一步优化设计提供了重要的实验支撑和指导。

2 实验方法和理论分析

2.1 实验方案

在钽玻璃组分和包边(含材料和工艺)一定的条件下,ASE效应与增益介质的长轴长度和增益乘积(gL)密切相关^[4-6]。实验中通过改变 gL 观察放大器增益性能的变化,从而反映出ASE效应对增益特性的影响,进一步推算出抽运能量转化为ASE的比例以及ASE对横向增益分布均匀性的影响^[14]。

改变 gL ,可以通过改变 L 或改变 g 实现。改变 L 要求在保持抽运密度相同的条件下制作口径不同的放大器,使钽玻璃的长轴尺寸逐渐变化,实验成本昂贵。改变 g 则要求抽运能量可以在很宽的范围内变化。在不更改放电回路其他参数的条件下,抽运能量的改变通过更改充电电压实现。当氙灯的爆炸系数在0.075~0.3之间变化时^[2],增益系数的变化可以反映ASE效应的影响。

从实验成本考虑,选择第二种方法评估ASE效应对增益性能的影响。保持放大器腔结构、钽玻璃、氙灯参数、氙灯排布、放电回路等条件不变,通过改变充电电压实现抽运能量变化,从而改变放大器的增益系数 g 。该方法的要点在于降低注入氙灯的抽运能量,使ASE效应达到可以忽略的水平,然后逐渐增加抽运能量,提升放大器的增益系数 g ,使ASE效应逐渐显现,直至 gL 达到可以触及的最大数值,此时ASE效应也最为严重。根据横向增益分布以及全口径平均增益系数随 g 的变化过程,分析得出ASE效应对放大器增益性能的实际影响情况。

2.2 实验测试系统

为了精确测量大口径放大器的增益分布,提出了基于光纤阵列的全光纤增益分布测试系统,如图 1 所示。光纤分束器将入射光分为 6 束信号光沿光纤传输,其中 1 束作为参考光束(I_r),其余 5 束作为探测光束(I_p)。参考光束直接进入示波器作为增益测量参考信号。5 束探测光由光纤准直器分别输出,经过待测放大器后被对应位置的光纤准直器接收,再次进入光纤传输并被合束器合束后进入示波器。通过控制每束探测光传输光纤的长度将 5 束光从时间上进行分离。5 组准直器呈水平等间隔分布,用于单次测量放大器同一水平线上 5 个点的增益。通过竖直方向同时移动 5 组准直器可以测量放大器不同水平线的增益情况。经过 5 次放电,可以得出一组放大器的增益分布矩阵。参考光束和探测光束经过示波器进行比对,从而获得增益信息。整个测量系统采用全光纤结构,除了经过待测放大器以外,信号光一直在光纤中传输。光纤准直器对接收光的角度和方向都有严格要求,结合窄带滤光片有效避免了空间噪声光和氙灯光对测量精度的影响,并且结构简单轻便,调节方便,避免了全口径增益测量系统中大口径空间滤波器的使用^[6],大幅降低了实验成本和复杂性。通过调节分束器前的偏振控制器 2,可以调节探测光进入放大器时的偏振方向,从而改变放大器静态透射率。偏振控制器 1 和在线偏振器(ILP)结合,有效避免了测试光源偏振态抖动对测量精度的影响,同时可以调节到达合束器的信号能量,有利于示波器选择合适的测量量程,提高测量精度。采用静动态对比的测量方法,有效避免了测试光源能量抖动对测量精度的影响。

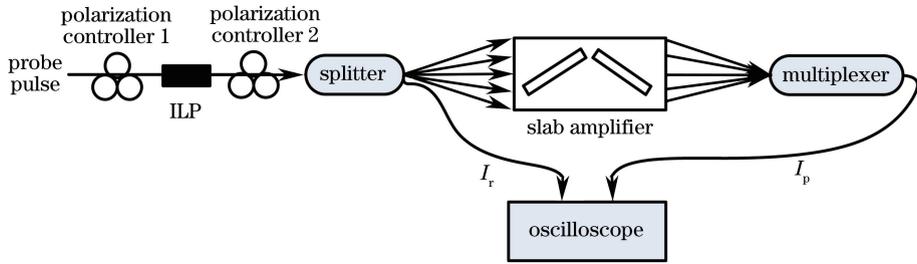


图 1 基于光纤阵列的增益分布测试系统光路示意图

Fig. 1 Light path diagram of gain distribution measurement system based on optical fiber arrays

放大器不工作时,增益倍数的理论值为 1,此时放大器的净损耗为

$$T = I_p / I_r, \tag{1}$$

放大器工作时,透射信号与参考信号的比值为放大器的净损耗和增益系数的乘积:

$$T_0 = I_{p_0} / I_{r_0} = GT, \tag{2}$$

则放大器的净增益值为

$$G = T_0 / T. \tag{3}$$

系统的测试精度可以通过放大器不工作时测得的增益倍数来表征。表 1 所示为测试系统 5 个测试位置 10 个发次的测试值。由表 1 可见所有位置的峰谷值偏差不超过 1%,表明测试系统具有较高的测试精度,满足 ASE 实验研究的测量精度要求。

表 1 全光纤增益测试系统的测试结果

Table 1 Measurement data for each channel of all-fiber gain measurement system when amplifier is not hired

Channel No.	Gain									
Channel 1	0.994	0.998	0.996	0.997	1.001	0.996	1.000	1.000	0.997	1.002
Channel 2	0.997	0.999	1.002	0.997	1.001	1.004	1.002	0.997	0.994	1.001
Channel 3	0.995	1.001	1.003	1.001	1.004	1.000	1.000	1.003	1.001	1.002
Channel 4	0.999	1.001	1.000	0.998	1.002	1.002	1.004	0.999	1.001	1.002
Channel 5	0.998	0.998	1.002	0.998	1.000	0.998	1.002	1.004	1.001	1.002

2.3 理论分析

为了研究 ASE 效应对增益的影响,除了实验测量放大器实际增益分布以外,还需要通过理论模拟得出相同抽运条件下假设无 ASE 时的增益情况。编写增益系数模拟程序,ASE 效应对增益-时间曲线的影响如

图 2 所示。ASE 会使增益系数的峰值提前到达,幅度显著降低^[6]。但是在抽运脉冲产生后的最初 200 μs 内, gL 比较小,ASE 效应的影响可忽略。因此 0~200 μs 内的测试结果可以作为校正模拟程序的基准数据。经过校正的模拟程序可以估算出其他时刻(大于 200 μs)假设无 ASE 时的增益系数。

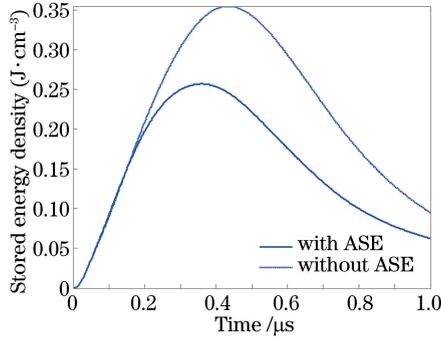


图 2 ASE 效应对增益时间曲线的影响

Fig. 2 Effect of ASE on temporal gain curve

3 实验测量结果及讨论

实验所用放大器为神光 II 装置 350 mm 单口径放大器(350SSA)^[15]。测试充电电压为 22 kV 时不同时刻的全口径平均增益系数,结果如图 3 所示。在前 200 μs 内共有 7 个测试点($t=0$ 点为理论值)。根据图 2 所示模拟结果,ASE 效应对这 7 个点增益系数的影响可忽略,因此可以用于辅助校正模拟程序,得出忽略 ASE 影响时放大器的增益系数。

为了确定 ASE 效应造成的增益系数降低比例,测试了延迟时间为 350 μs ,即放大器增益最大时刻时,不同充电电压下的全口径平均增益系数。图 4 所示为充电电压在 9~22 kV 之间变化时 350SSA 的增益系数随充电电压的变化。

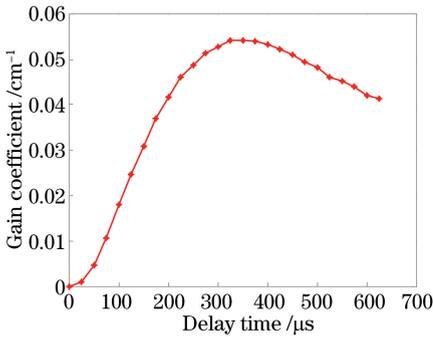


图 3 350SSA 的增益系数随时间的变化

Fig. 3 Gain coefficient of 350SSA versus time

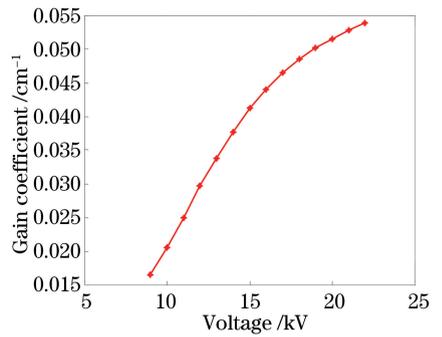


图 4 350SSA 的增益系数随充电电压的变化

Fig. 4 Gain coefficient of 350SSA versus charge voltage

对于相同 gL , ASE 效应造成的全口径平均增益系数降低比例 R 可以表示为

$$R = \frac{g_{w/ASE}}{g_{0/ASE}}, \quad (4)$$

式中 $g_{w/ASE}$ 为包含 ASE 效应时的全口径平均增益系数, $g_{0/ASE}$ 为不包含 ASE 效应时的增益系数。

根据图 4 的测试结果以及经过图 3 校正的理论模拟结果, ASE 效应造成的增益系数降低比例随 gL 的变化如图 5 所示。拟合得到的经验公式为

$$R = l - a \times (gL)^b, \quad (5)$$

式中 $a=0.003984, b=3.144$ 。

根据上述分析结果,对于 350SSA,当其增益系数达到最大值,即 gL 为 4.18 时, ASE 效应造成的增益系数降低比例达到了 36%。

如图 6 所示,片状放大器采用侧向抽运的方式,且钕玻璃为偶数片。根据氙灯、钕玻璃和放大器通光窗

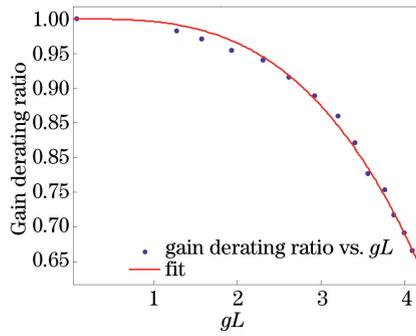


图 5 ASE 效应造成的增益系数降低比例随 gL 的变化

Fig. 5 Gain coefficient derating ratio caused by ASE versus gL

口的相对位置不同将放大器分为 A 侧和 B 侧。A 侧氙灯所发射的抽运光会有一部分通过窗口玻璃到达放大器腔外,从而引起片腔内抽运光的损耗。氙灯距离放大器窗口越近,氙灯所发射的抽运光通过窗口溢出产生的损耗越多。B 侧氙灯不存在窗口引起的抽运损耗问题。所以最终导致靠近窗口的铍玻璃吸收的抽运光强度沿长边方向从 A 侧到 B 侧呈递减趋势,表现为放大器的增益系数沿水平方向出现倾斜。

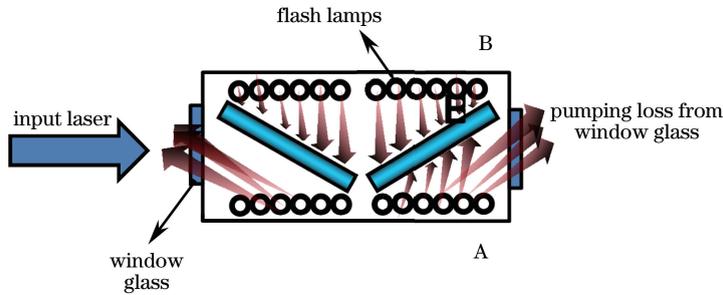


图 6 350SSA 放大器窗口抽运光损耗示意图

Fig. 6 Schematic of pumping loss from the window glass of 350SSA

gL 变化过程中 ASE 效应对增益系数横向分布的影响如图 7 所示。 gL 小于 3 时,增益系数的横向分布主要由抽运分布决定,因而呈现与偶数片开口效应相对应的倾斜直线型分布,且直线的斜率随 gL 增加而逐渐增加,说明随着抽运能量的增加放大器的开口效应也在逐渐增强,在此过程中 ASE 效应并不显著。

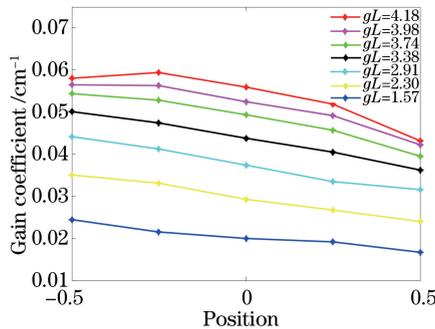


图 7 350SSA 增益系数横向分布随 gL 的变化

Fig. 7 Variation in transverse distribution of gain coefficient of 350SSA with gL

随着放大器增益系数的增加,沿铍玻璃长边方向传输的自发荧光辐射被迅速放大,待传输到铍玻璃短边沿处,由于该信号的放大消耗了大量的上转换粒子,所以放大器表现出增益沿铍玻璃长边方向(横向)边沿明显降低的现象,即 ASE 效应引起的增益塌边。当 gL 大于 3.5 时,ASE 效应显著显现,两端增益系数随抽运能量的增长速度低于中间部分,因而使放大器的增益分布呈现塌边越来越显著的状态。增益分布的中间区域主要反映抽运分布,而两端增益系数表现出的塌边则主要反映 ASE 效应的影响。

当 gL 达到 350SSA 所能达到的最大值 4.18 时,根据中间 3 点拟合出的直线斜率可以估算 ASE 效应不

显著时两端点处的增益系数分别为 0.0633 cm^{-1} 和 0.0482 cm^{-1} 。测试结果显示,两个端点处的增益系数分别比上述估算值降低了 0.519% 和 0.506% 。ASE 效应对放大器的增益产生了严重影响,且增益大的一端由于 ASE 效应引起的增益降幅更大。

4 结 论

搭建了全光纤增益分布测试系统,测试了神光 II 350 mm 大口径片状放大器在不同时刻的增益。建立了放大器增益理论模型,根据测试结果进行修正,得到不同时刻 ASE 效应对放大器增益的影响。测试了不同抽运能量下的全口径增益系数和增益分布,随着抽运能量的增加,ASE 效应造成的增益分布塌边、平均增益降低愈发明显。根据实验测试结果,拟合出 ASE 影响增益系数的经验公式,为国产钕玻璃放大器的优化设计提供了重要的实验支撑。

参 考 文 献

- Koehler W. Solid-state laser engineering[M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang, Transl. Beijing: Science Press, 2002: 164-169.
克西奈尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社, 2002: 164-169.
- William E M, John B T, Gary J L, *et al.*. Solid-state disk amplifiers for fusion-laser systems[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1981, 17(9): 1774-1754.
- Erlanson A C, Rotter M D, Frank D N, *et al.*. Design and performance of the beamlet amplifiers[J]. LLNL ICF Quarterly Report, 1994, 5(1): 18-28.
- Trenholme J B. Fluorescence amplification and parasitic oscillation limitations in disc lasers[J]. NRL Memorandum Report, 1972, 2480: 4-62.
- Trenholme J B. Amplifier analysis: Fluorescence amplification in different disk geometries[R]. LLNL Laser Program Annual Report, 1983: 6-8.
- Powell H T, Erlanson A C, Jancaitis K S, *et al.*. Flashlamp pumping of Nd:glass disk amplifiers[C]. SPIE, 1990, 1277: 103-120.
- Zhang Hua, Fan Dianyuan. Investigation of the amplified spontaneous emission in Nd:glass disk laser amplifier[J]. Acta Physica Sinica, 2000, 49(6): 1047-1051.
张 华, 范滇元. 钕玻璃片状激光放大器自发辐射放大特性的研究[J]. 物理学报, 2000, 49(6): 1047-1051.
- Zhang Hua, Fan Dianyuan. The dynamic modulation for gain performance in multi-segment Nd:glass disk laser amplifier[J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(12): 2375-2381.
张 华, 范滇元. 组合式钕玻璃片状激光放大器增益性能的动态模拟[J]. 物理学报, 2001, 50(12): 2375-2381.
- He Shaobo, Yu Haiwu, Zheng Wanguo, *et al.*. Research of amplified spontaneous emission in high power slab laser amplifier[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(5): 603-606.
贺少勃, 於海武, 郑万国, 等. 高功率激光片状放大器中自发辐射放大研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(5): 603-606.
- Feng Guoying, Lü Baida. Amplified spontaneous emission in multi segment amplifier[J]. Chinese J Lasers, 1997, 24(6): 489-494.
冯国英, 吕百达. 多段阵列式钕玻璃放大器中放大自发辐射问题的研究[J]. 中国激光, 1997, 24(6): 489-494.
- Wang Chengcheng, Yu Haiwu, Tang Jun, *et al.*. Research of small signal gain by a probe beam in a new multi-segment-amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(6): 489-493.
王成程, 於海武, 唐 军, 等. 新型阵列式片状放大器点探针光小信号增益实验研究[J]. 中国激光, 2003, 30(6): 489-493.
- Chen Lin, He Shaobo, Yu Haiwu, *et al.*. Pump-induced wave-front distortion of the 4×2 assembled slab amplifier with 400 mm aperture[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 59-63.
陈 林, 贺少勃, 於海武, 等. 400 mm 口径 4×2 组合式片状放大器的动态热畸变[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 59-63.
- Liu Tao, Zhou Shenlei, Zhang Panzheng, *et al.*. Optimization design of xenon flashlamp pumping in Nd:glass slab amplifier based on simulated annealing algorithms[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0214002.
刘 涛, 周申蕾, 张攀政, 等. 模拟退火算法优化设计钕玻璃放大器氙灯抽运[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0214002.
- Hao Xin, Chen Lin, Chen Yuanbin, *et al.*. Research on the measurement methods for the gain distribution uniformity of

large aperture slab amplifiers[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(s1): s108001.

郝 欣, 陈 林, 陈远斌, 等. 大口径片状放大器增益均匀性测量方法研究[J]. 中国激光, 2014, 41(s1): s108001.

- 15 Tang Xianzhong, Zhu Jian, Ma Weixin, *et al.*. The manufacture of $\phi 350$ mm disk amplifier[J]. Collection of Theses on High Power Laser and Plasma Physics, 2005, 3(1): 40-47.

唐贤忠, 朱 俭, 马伟新, 等. 口径 350 mm 片状放大器的研制[J]. 高功率激光及等离子体物理研究论文集(专题), 2005, 3(1): 40-47.