

短翼仿渐开线型抽运反射器的优化设计与实验验证

马 明^{1,2} 施翔春¹ 李 磊¹ 杨中国¹ 王建磊¹ 程小劲¹ 刘 晶¹ 陈汝风¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全国态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 设计了基于激活反射式钕玻璃激光放大器的抽运反射结构。反射式钕玻璃激光放大器的抽运结构与传统透射型阵列式片状放大器(MSA)不同,为提高氙灯背向抽运光的利用效率,抽运反射罩的排布与面型需要与结构形式匹配的优化设计。针对反射式钕玻璃激光放大器的独特结构形式,通过 Matlab 模拟仿真,提出了一种新型短翼仿渐开线型反射罩面型。用光学仿真软件 TracePro 进行配光追迹,得到了新型抽运反射罩的模拟传输效率,比平板反射器的模拟结果高 17.58%。通过氙灯抽运的全尺寸反射式钕玻璃激光放大器实验装置,对优化结果进行了验证,实际效率提高约 15.19%。

关键词 激光器;放大器;光线追迹;渐开线;反射罩

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0902008

Optimization and Experiments of Short Wing Involute Reflector

Ma Ming^{1,2} Shi Xiangchun¹ Li Lei¹ Yang Zhongguo¹ Wang Jianlei¹
Cheng Xiaojin¹ Liu Jing¹ Chen Rufeng¹

(¹ Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A type of pump reflector for large aperture active mirror slab amplifier is designed. The amplifier is different from the conventional multi-segment-amplifier (MSA). The reflector should be specially designed to improve the efficiency of the pump Xe-lights. For the unique structure, the theoretical optimized curve function is calculated by Matlab. TracePro is used to simulate the designed reflector based on the optimized function, and get the theoretical efficiency of the reflector. Compared to the flat reflector, the efficiency is 17.58% higher. A 1:1 experiment is designed and used to test the performance of the reflector, whose efficiency is 15.19% higher than the flat one.

Key words lasers; laser amplifier; ray-tracing; involute; reflector

OCIS codes 140.3280; 140.3460; 140.3538

1 引 言

在用于惯性约束聚变的高能量钕玻璃激光驱动器中,主放大器大都采用了氙灯抽运结构形式^[1]。传统的透射型阵列式片状放大器(MSA)采用了多种反射器面型方案,如双渐开线型、圆柱形截面型、瓦楞板型、平板型以及漫反射平板型等^[2-3]。研究结果表明,完整的渐开线形式是效率最高的反射器

面型,其理论效率为 100%^[4]。

反射式钕玻璃激光放大器与传统透射型阵列式片状放大器(MSA)有一定的结构差异,在抽运结构上主要表现为抽运源为单边布置,即反射式片状放大器的抽运能量主要来源于单侧抽运^[5]。在给定的结构空间下,抽运源数量的增加,将导致氙灯的抽运光束之间较强的遮挡与吸收,从而降低了抽运效率。为了达到最

收稿日期: 2014-03-21; 收到修改稿日期: 2014-04-17

作者简介: 马 明(1989—),男,硕士研究生,主要从事高功率固体激光技术方面的研究。E-mail: mam07@foxmail.com

导师简介: 施翔春(1969—),男,博士,研究员,主要从事高功率固体激光技术方面的研究。

E-mail: shixc@siom.ac.cn(通信联系人)

高的抽运功率密度,通过对单侧抽运的实验结构进行研究,在合理布置氙灯的基础上,优化抽运源的数量与反射罩的结构形式,对于提高反射式激光系统的总效率,获得较高能量增益,具有十分重要的意义。

研究反射式钕玻璃激光放大器的抽运结构优化设计,在给定的抽运结构形式下,通过理论计算得到最佳的抽运结构形式;在此基础上,设计了此条件下的反射器最优面型。通过激活反射式钕玻璃激光系统的模块验证光路^[5-6],对实际效果进行了验证。

2 仿真设计

2.1 类渐开线反射器在氙灯抽运激光系统中的应用

在氙灯抽运的高能量钕玻璃片激光放大器中,优化抽运光的传输效率一直是激光放大器效率提高的重要手段。类渐开线反射器可以有效提取后向传输的抽运光,并将之有效传输到增益介质上。其几何构型如图 1 所示。

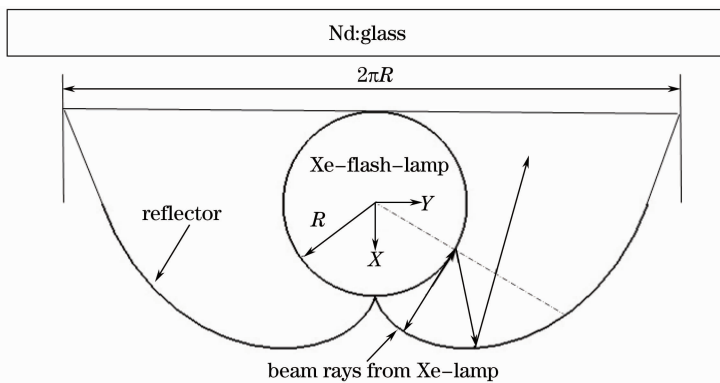


图 1 渐开线型抽运反射罩

Fig.1 Involute pump reflector

图 1 给出了渐开线翼型反射罩的工作原理。氙灯为兰贝特余弦体光源,每一点的光束极限发射位置在其发光面的切线方向。由渐开线的数学关系可知,该光线经与灯柱同轴的渐开线反射面反射后,原路返回,即理论效率达到 100%。设其坐标系的 Z 轴与氙灯灯柱的发光轴线重合,则氙灯发光面在 XOY 坐标面的投影为半径为 R 的圆形,以半径的转角 T 为自变量,则反射器在 XOY 面上投影曲线的参数方程为

$$\begin{aligned} X &= R(\cos T + T \cdot \sin T), \\ Y &= R(\sin T - T \cdot \cos T) \cdot p, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $T \in (-\pi, \pi)$, $p \leq 1$, 当 $p = 1$ 时,为标准渐开线。

由图 1 可以看出,对于渐开线型反射罩,其展开的总长度与氙灯半径比值为 2π ,空间占用率不理想。

2.2 短翼渐开线型与仿渐开线型反射器的翼展使用系数与效率

在类渐开线型反射罩中,对称截取中间的一部分作为使用反射面型。定义 m 为类渐开线型反射罩的翼展使用系数:

$$m = \frac{l}{2\pi r}, \frac{1}{\pi} \leq m \leq 1, \quad (2)$$

翼展长度 l 的缩小即使用系数的减小有利于氙灯排

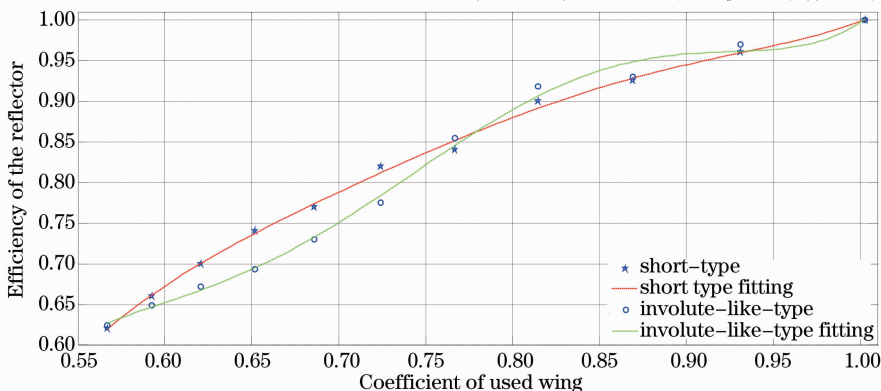


图 2 不同翼展使用系数条件下的反射器理论效率曲线

Fig.2 Theoretical efficiency of the reflector with different m

布密度的提高,而其与反射罩传输效率矛盾,如图 2 所示。

2.3 给定空间约束条件下短翼型与仿型渐开线型的最佳排布

在激活反射式构型的钕玻璃激光放大器中,采用 N31 型钕玻璃,净通光口径和厚度为 $384 \text{ mm} \times$

$404 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,包边厚度 15 mm ,包边并做表面加工后的外形尺寸为 $450 \text{ mm} \times 890 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,掺杂浓度(质量分数)为 1.2% ;抽运源采用了极间距 430 mm 的脉冲氙灯抽运,竖直方向排列,氙灯发光内径 $\phi 21 \text{ mm}$,如图 3 所示。

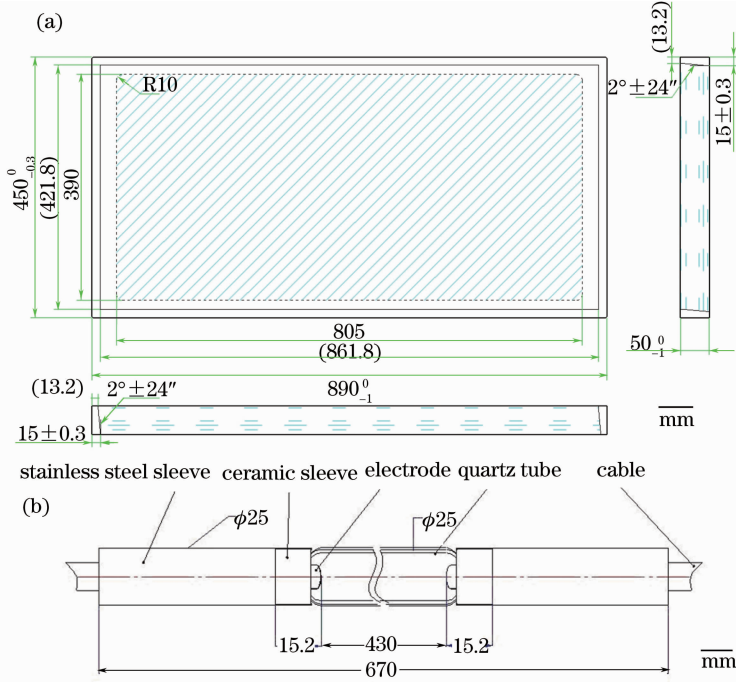


图 3 钕玻璃放大器的元件参数。(a) 钕玻璃增益介质；(b) 抽运氙灯

Fig. 3 Parameters of Nd:Glass Amplifier. (a) Nd:Glass gain medium; (b) pump Xe-flash lamps

如上所述,在给定的技术条件下,增加氙灯排布密度以牺牲单灯传输效率为代价。因此,以抽运密度最大化为目标,存在氙灯的最佳排布方式,以图 3

参数为入口条件,进行类渐开线型反射罩最佳排布方式求解,其总的有效抽运相对强度(设单灯强度设为 1)与排布密度的关系如图 4 所示。

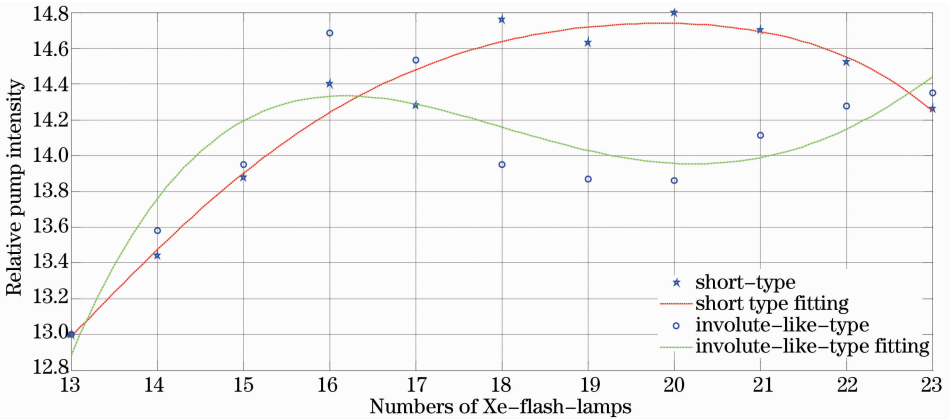


图 4 有效抽运相对总强度与氙灯数目关系

Fig. 4 Relationship between relative pump intensity and number of Xe-flash lamps

由图 4 可以看出,氙灯排布密度存在最优值。当排布 20 只灯时,获得了最强的相对抽运密度,但在此密度时,仿渐开线型由于变形严重导致效率损

失严重。因此,反光罩的面型设计以短翼型为基础,考虑工程工艺等因素制约,提出了短翼型仿渐开线型反射器,进一步提高传输效率,其曲面方程为

$$\begin{cases} x = \cos \alpha \cdot [r \cdot (\sin T - T \cdot \cos T)] \cdot p + \sin \alpha \cdot [r \cdot (\cos T + T \cdot \sin T)] \\ y = \cos \alpha \cdot [r \cdot (\cos T + T \cdot \sin T)] - \sin \alpha \cdot [r \cdot (\sin T - T \cdot \cos T)] \cdot p \end{cases} \quad (3)$$

式中氙灯发光表面的展开半径 $r = -10.5$, 变位系数 $p = 0.9$, 这两个参数决定曲线的形状; $\alpha = 0.1755$, 该参数表示曲线整体在坐标系内旋转, 以保证在曲线最低点氙灯与抽运反射罩的距离满足安全限制; 由以上三个参数以及氙灯的排布参数约束的 $x \in (0, 21.5)$ 即可算出参数 T 的范围: $-3.3124 \leq T \leq -0.959$, 代入数据后为

$$\begin{cases} x = -9.3048 \cdot (\sin T - T \cdot \cos T) - 1.8332 \cdot (\cos T + T \cdot \sin T) \\ y = -10.339 \cdot (\cos T + T \cdot \sin T) + 1.650 \cdot (\sin T - T \cdot \cos T) \end{cases} \quad (4)$$

2.4 基于 TracePro 软件的全尺寸模型仿真

针对以上的计算求解, 采用了光学追迹配光软件 TracePro 对实验结果进行仿真验证^[7-8], 同时对平板反射器结果进行仿真验证, 作为仿真与实验的对照。仿真条件分别如图 5(a)、(b) 所示, N31 型钕

玻璃与氙灯排列完全相同, 内径 $\phi 21$ mm 的氙灯轴心距离为 42 mm, 仅图 5(b) 中的反射器换成了平板反射器。对于氙灯发光被其他氙灯或自身吸收之后的发射情况, 其计算十分复杂^[9], 因此, 在仿真中做了氙灯吸收率为 100% 的假设。

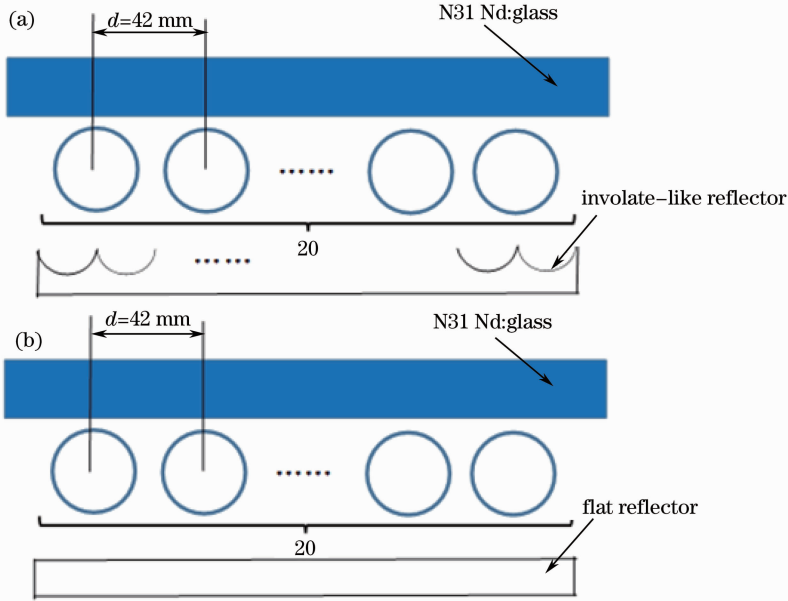


图 5 (a) 类渐开线型反射器仿真条件; (b) 平板反射器仿真条件

Fig. 5 Simulation condition of (a) short-involute reflector; (b) flat reflector

图 6 为 TracePro 软件的仿真结果, 其中图像灰度值代表相对抽运强度, 抽运光束的有效投射面积为 $860 \text{ mm} \times 430 \text{ mm}$, 如图刻度所示, 仿真结果整理后如表 1 所示。

为 $860 \text{ mm} \times 430 \text{ mm}$, 如图刻度所示, 仿真结果整理后如表 1 所示。



图 6 (a) 平板反射器仿真结果; (b) 短翼仿渐开线反射器仿真结果; (c) 短翼标准渐开线仿真结果

Fig. 6 Simulation result of (a) flat reflector; (b) shortwing involute reflector; (c) shortwing standard involute reflector

表 1 TracePro 对三种反射器的仿真结果

Table 1 Simulation result of the three reflectors by using TracePro

Type of reflector	Relative illumination on the glass surface	Simulated efficiency /%
Shortwing involute	11.06	55.3
Flat	9.406	47.03
Standard shortwing involute	10.48	52.4

仿真结果显示,短翼仿渐开线型反射器的相对传输效率比标准的短翼渐开线型提高了 5.53%,较平板反射器提升了 17.58%。

3 实验验证

为了验证仿真结果,搭建了如图 7 所示的等比例单模块验证光路,通过测量同等条件下,不同抽运发射器造成增益介质的小信号增益系数的差异,来判断抽运传输效率的实验结果,整个光路如图 7 所示。

种子源采用一台 Nd:YLF 调 Q 激光器,重复频率为 1 Hz,中心波长为 1053 nm,光斑直径约为 1 mm,脉宽为 10 ns,最大输出能量为 10 mJ,出射光偏振方向为水平方向。经过 1:5 扩束后,经过 M1, M2 通过窗口玻璃,以布儒斯特角进入钕玻璃,经过后表面反射后从前表面出射,经过 M3 返回,最后经过窗口出射,进入能量计 (THORLABS, PM320E) 探测能量并记录。

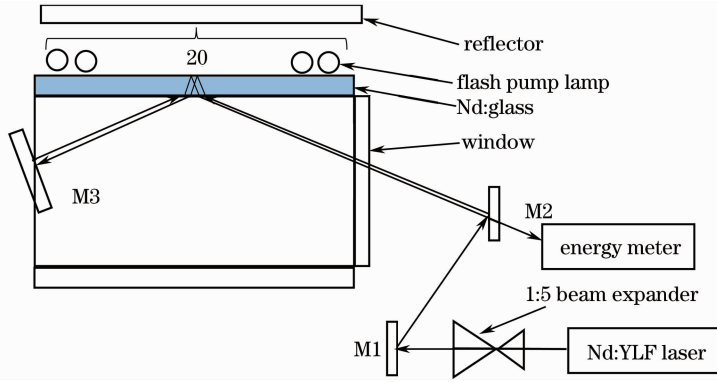


图 7 反射器传输效率实验装置图

Fig. 7 Schematic drawing of the experiment for the reflector efficiency

由于采用单边侧泵,钕玻璃的储能全部来自单侧氙灯的抽运。在不饱和抽运的情况下,钕玻璃的储能密度正比于氙灯泵光到达钕玻璃表面的密度。其有如下关系为

$$E_{\text{glass}} = \eta \cdot E_{\text{lamp}}, \quad (5)$$

$$E_{\text{glass}} = W_{\text{st}} \cdot V_{\text{glass}} \quad (6)$$

$$W_{\text{st}} = \frac{h\nu g}{\sigma}, \quad (7)$$

由(5)~(7)式可得

$$\eta = \frac{h\nu g}{\sigma} \cdot \frac{1}{E_{\text{lamp}}} \cdot V_{\text{glass}}, \quad (8)$$

式中 E_{glass} 为钕玻璃的总储能, E_{lamp} 为氙灯的有效抽运辐射光, η 为传输效率, W_{st} 为钕玻璃的储能密度, V_{glass} 为钕玻璃的体积, h 普朗克常数, σ 为钕玻璃的受激发射截面, g 为小信号增益系数。由(8)式可以看出,在抽运以及其余情况不变的情况下,反射罩传输效率 η 与小信号增益系数 g 为线性关系,因此可通过小信号增益系数来判断总的光传输效率。

表 2 相同抽运条件下不同反射器的小信号增益系数

Table 2 Small signal gain coefficient of different reflectors in the same pump condition

Pump voltage /kV	g_1 for flat reflector	g_2 for short-wing reflector	Relative increase /%
16	2.917	3.360	15.19
18	3.247	3.726	14.74
20	3.539	4.019	13.55

由表 2 可知,在不同抽运条件下,短翼仿渐开线型反射器的光传输效率提高了平均约 14.5%。

4 结 论

研究了基于氙灯抽运的抽运源反射罩优化设

计。在给定的空间分布条件下,优化了最佳的抽运源布置形式,设计并仿真了该结构形式下的抽运氙灯反射器,得到了最高抽运密度的理论设计。通过等比例实验,对理论设计进行了验证。实际效率低于理论值,可能有以下几点原因:1) 由于理论设计工程化后,面型曲线不得不屈从于工艺条件限制,导致部分关键点曲线变化较大,牺牲了部分效率;2) 在仿真中,假设氙灯自吸收为 100%,而实际上应按吸收-再反射后的黑体辐射等效发光亮度进行计算^[10-11],总有一部分吸收光重新发射出来。相对于短翼渐开线反射器,平板反射器直接反射出去的抽运光少而进入氙灯的多,考虑到这个因素,两类反射器的实际性能差距要比仿真情况下的小一些。总体上理论设计与实验结果相符。

参 考 文 献

- Liu Jianjun, Jiang Baocai, Tang Xianzhong, *et al.*. High power xenon flashlamp with relative small-bore and large arc-length[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(3): 326-329.
刘建军, 蒋宝财, 唐贤忠, 等. 细长型高功率脉冲氙灯[J]. 中国激光, 2006, 33(3): 326-329.
- Feng Guoying, Lü Baida. A comparative study of single-stage and multi-stage amplifier pump cavity array[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1998, 10(4): 7-11.
冯国英, 吕百达. 单段与多段阵列式放大器抽运腔的比较研究[J]. 强激光与粒子束, 1998, 10(4): 7-11.
- Huang Shuihua, Tan Jichun, Zhong Qin, *et al.*. Ray-tracing analysis of roof shape reflectors to pump disk laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1999, 11(3): 70-73.
黄水花, 谭吉春, 钟 钦, 等. 片状放大器抽运腔屋脊形反射器性能分析[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(3): 70-73.
- Tan Jichun, Zheng Wanguo, Zhang Hongbing, *et al.*. Reflectors with section shape of incomplete involute and imitation of involute

for Xe flash-lamp array[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2001, 13(2): 147-150.

- 谭吉春, 郑万国, 张红兵, 等. 用于氙灯阵列的渐开线翼面反射器[J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(2): 147-150.
- Liu Jing, Shi Xiangchun, Li Lei, *et al.*. Experimental research on gain characteristic in large aperture active mirror slab amplifiers[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0402007.
刘 晶, 施翔春, 李 磊, 等. 大口径有源反射镜片状放大器增益特性实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402007.
- Wang Chengcheng, Zheng Wanguo, Yu Haiwu, *et al.*. Research of small signal gain character in large aperture square beam slab amplifiers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(11): 155-158.
王成程, 郑万国, 於海武, 等. 大口径方光束片状放大器小信号增益实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(11): 155-158.
- Wang Jianlei, Shi Xiangchun, Zhu Xiaolei. Optimization design and modeling of high power Yb:YAG pulsed laser with high efficiency[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2278-2283.
王建磊, 施翔春, 朱小磊. 高效率大功率脉冲 Yb:YAG 片状激光器优化设计与模拟[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2278-2283.
- Mei Chao, Zhou Sizhong, Zhang Hengjin, *et al.*. Method of first-order ghost-image analysis in imaging system based on Code V and Tracepro[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0411003.
梅 超, 周泗忠, 张恒金, 等. 基于 Code V 和 Tracepro 的成像光学系统一阶鬼像分析方法[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0411003.
- D C Brown. High-Peak-Power Nd:Glass Laser Systems[M]. New York: Springer-Verlag, 1981. 103-1078.
- Zhuo Meizhen, He Mingfang, Zhang Jilin, *et al.*. The study on the UV spectrum and color temperature on high-power pulse Xe-flash-lamp[J]. Chinese J Lasers, 1986, 13(1): 62.
卓美珍, 何明芳, 张基林, 等. 大功率脉冲氙灯紫外光谱及色温[J]. 中国激光, 1986, 13(1): 62.
- Zhang Hua, Gao Yanxia, Fan Dianyuan. Optimal design neodymium glass xenon lamp pumped amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(12): 17-24.
张 华, 高艳霞, 范滇元. 钕玻璃放大器氙灯抽运的优化设计[J]. 光学学报, 1998, 18(12): 17-24.

栏目编辑:何卓铭