

非成像反射腔棒状放大器的增益特性

吴永忠¹, 朱健强²

¹苏州科技大学机械工程学院, 江苏 苏州 215009;

²中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800

摘要 利用边缘光线原理设计了基于非成像反射腔的棒状放大器, 采用相同氙灯放电参数和钨玻璃棒尺寸, 数值模拟了成像和非成像两种不同反射腔作用下放大器钨玻璃棒的储能密度, 并实验研究了小信号增益系数, 模拟和实验结果吻合度较高。非成像反射腔具有特殊光学结构, 能够反射全部抽运光至钨玻璃棒表面, 从而提升光电转换效率, 减少废热产生, 提高抽运效率和放大器增益性能, 使放大器更加高效、经济。

关键词 激光技术; 激光放大器; 抽运反射腔; 增益介质; 小信号增益系数; 非成像

中图分类号 TN722

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.071408

Gain Properties of Rod Amplifier with Non-Imaging Reflector

Wu Yongzhong¹, Zhu Jianqiang²

¹School of Mechanical Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China;

²National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Rod amplifier with non-imaging reflector is designed based on the edge-ray principle. Under the same flashlamp electrical power and rod dimensions, the stored energy density and the small-signal gain coefficient of Nd:glass rod amplifier with non-imaging and imaging reflector are simulated, respectively. The numerical simulated results are consistent with the experimental results. The non-imaging reflector can reflect all the xenon flashlamp rays to the Nd:glass rod surface, which can enhance the photoelectric conversion efficiency, reduce the generation of waste heat, increase the pumping efficiency and the amplifier's gain property. This design can achieve considerable cost savings and improve the efficiency of the amplifier.

Key words laser technique; laser amplifier; pump reflector; gain medium; small-signal gain coefficient; non-imaging

OCIS codes 140.3280; 140.5560; 220.4298

1 引言

高功率激光驱动器中, 钨玻璃作为增益介质一般被设计为两种几何形状: 棒状和片状。棒状放大器能够解决激光能量放大面临的两个主要问题^[1-3]: 增益均匀性差和装置重复频率低。反射腔作为抽运光源和放大器增益介质之间的耦合器, 其反射面结构直接影响抽运均匀性和放大器效率。因此, 研究反射腔结构具有重要意义。现有两种腔的设计方法包括: 成像和非成像^[4-7]。成像腔中, 根据椭圆聚光

特性, 将抽运光源和钨玻璃棒分别置于椭圆的两个焦点处, 使从氙灯发出的光线经过反射腔反射至钨玻璃棒, 传输过程中部分光线被钨玻璃非均匀吸收, 导致棒内形成热温度梯度, 从而产生热致波前畸变等不利影响。

为了克服成像腔的缺点, 结合刘维尔定理, 采用边缘光线原理, 形成以氙灯外表面为基圆的类渐开线(非成像)^[8-12]。氙灯作为朗伯光源, 可以实现其几何外形的 100% 传输, 且抽运均匀。

本文采用对比实验, 比较分析了成像和非成像两

收稿日期: 2018-01-24; 收到修改稿日期: 2018-02-07

作者简介: 吴永忠(1987—), 男, 博士, 讲师, 主要从事激光加工和激光器结构设计方面的研究。

E-mail: wuyongzhongtmac@126.com

种设计方法对棒状放大器的增益和增益均匀性影响。

2 理论分析

2.1 刘维尔定理

若结构完全相同的微观系统均从初态沿着正则方程的轨道运动,则所有系统运动代表点会在相空间中形成一个分布,相空间中任一体积元可表示为

$$d\Omega = dq_1 dq_2 \cdots dq_f dp_1 dp_2 \cdots dp_f, \quad (1)$$

式中: Ω 为体积元对应的空间角; (q_1, q_2, \cdots, q_f) 为各点的广义坐标; (p_1, p_2, \cdots, p_f) 为各点的广义动量。在 t 时刻,系统运动状态在体积元 $d\Omega$ 内的代表点数 N 可表示为

$$N = \rho(q_1, q_2, \cdots, q_f, p_1, p_2, \cdots, p_f; t) d\Omega, \quad (2)$$

式中: ρ 为代表点密度。

代表点在相空间中以确定的轨道运动,其邻域的代表点密度不随时间变化(刘维尔定理^[13])。通

过类比,任何与相空间相同的物理特性都可以通过刘维尔定理进行研究。根据几何光学原理,氙灯发射光线可以用六维向量 $(x, y, z, \cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma)$ 描述,其中, (x, y, z) 为光线的起始位置,类比为广义坐标 (q_1, q_2, \cdots, q_f) ; $(\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma)$ 为光线的方向矢量,类比为广义动量 (p_1, p_2, \cdots, p_f) 。

2.2 非成像设计

设计放大器反射腔时,氙灯作为朗伯光源可简化为绕氙灯表面一周的若干点光源系统。根据刘维尔定理,采用边缘光线原理,设计过程仅考虑与氙灯表面相切光线的传输过程,边缘光线原理如图1所示。边缘光线传输路径如图1(a)所示,取氙灯表面任意一点 A 处的边缘光线经过点 P 反射至钨玻璃棒表面。根据氙灯表面若干边缘光线计算出点 P 的集合,从而形成非成像抽运腔结构,非成像反射腔曲线如图1(b)所示。

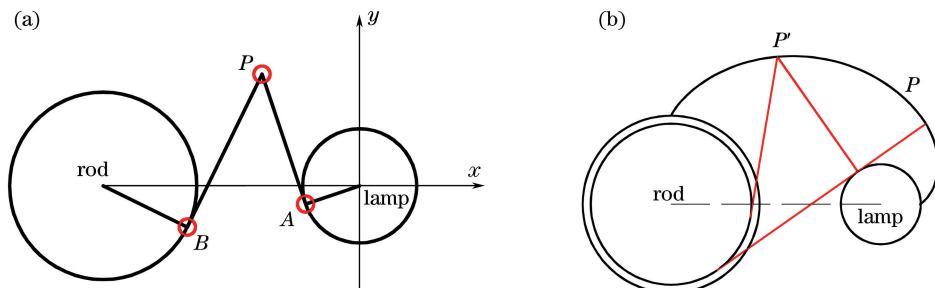


图1 边缘光线原理。(a)边缘光线传输路径;(b)非成像反射腔曲线

Fig. 1 Edge ray principle. (a) Edge ray transfer process; (b) curve of non-imaging reflector

2.3 模拟结果与分析

放大器截面示意图如图2所示。图2(a)、(b)分别为椭圆成像反射腔和非成像反射腔的截面图。在钨玻璃棒直径、氙灯与钨玻璃棒中心距、氙灯数量均相等的情况下,两种腔型中钨玻璃棒表面相对照度值模拟结果如图3所示。非成像腔中的钨玻璃棒表面相对照度值约为椭圆腔的两倍,因两者的辐照面积相等,故两者的光通量亦满足两倍的关系,说明

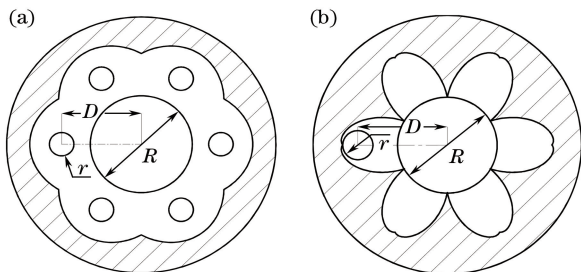


图2 放大器截面示意图。(a)成像腔;(b)非成像腔

Fig. 2 Schematic diagram of amplifier cross section.

(a) Imaging reflector; (b) non-imaging reflector

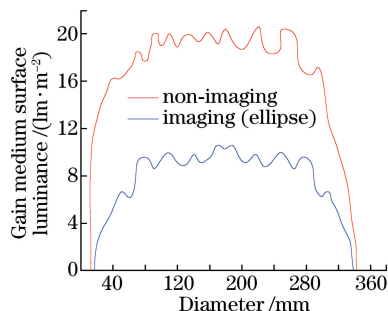


图3 钨玻璃棒表面相对照度值模拟结果

Fig. 3 Simulation results of relative surface luminance of Nd:glass

非成像反射腔的聚光效率优于椭圆成像腔。腔中的光线传输路径如图4所示。图4(a)对应椭圆腔,氙灯中心和椭圆反射腔的一个焦点重合,与氙灯表面法线重合的光线满足椭圆聚光定理,能够会聚到钨玻璃棒中心,与法线存在夹角的光线被氙灯自吸收,导致聚光效率小于非成像反射腔^[14]。图4(b)对应非成像腔,氙灯从表面点 C 位置发射光线,边缘光

线 CP 经过反射腔反射到达钨玻璃棒表面, 内部光线 CP_1 、 CP_2 和 CP_3 直射或经过一次反射到达其表面, 没有光线反射回氙灯本身, 可以忽略氙灯等离子体自吸收问题。抽运光线能够达到钨玻璃棒表面是光电转换的首要前提, 若要判断吸收增益的均匀性, 仍需进一步研究钨玻璃棒横截面内的能量吸收分布。

为了模拟反射腔在钨玻璃棒抽运吸收带内的聚光效率, 以及其横截面内的相对强度分布, 采用 ASAP(advanced system analysis program) 模拟了两种腔型对棒状放大器增益特性的影响。一般光线追迹方法将系统简化为二维平面内的中心点光源, 而氙灯实际发光模型为朗伯光源, 这会造成模拟结

果失真。模拟过程中, 抽运光从氙灯表面与表面法线夹角为 $(-90^\circ \sim 90^\circ)$ 的任意一点发射, 经过 5 次反射后光线失效。棒储能密度模拟结果如图 5 所示。椭圆腔和非成像腔棒横截面储能密度模拟结果如图 5(c) 所示, 由图可见, 非成像腔中钨玻璃棒内增益大于椭圆腔, 在直径 $(-20 \sim 20 \text{ mm})$ 范围内非成像腔的增益均匀性差, 这是因为当光线直射棒表面时, 不受反射腔表面反射率的影响, 且主要辐照钨玻璃棒的中心区域。光线经过一次或两次反射后主要辐照在棒的边缘区域^[15]。根据增益均匀性评价方法, 测试值与钨玻璃棒中心比值范围为 $80\% \sim 120\%$, 因此非成像反射腔满足增益均匀性的使用要求。

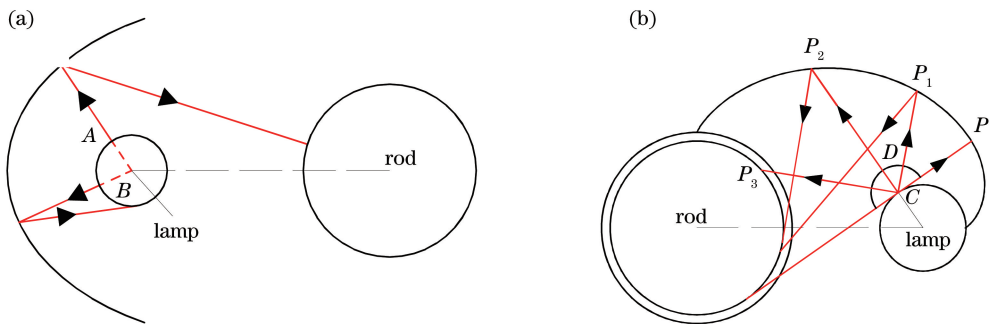


图 4 光线传输。(a)椭圆腔;(b)非成像腔

Fig. 4 Ray transmission. (a) Elliptic reflector; (b) non-imaging reflector

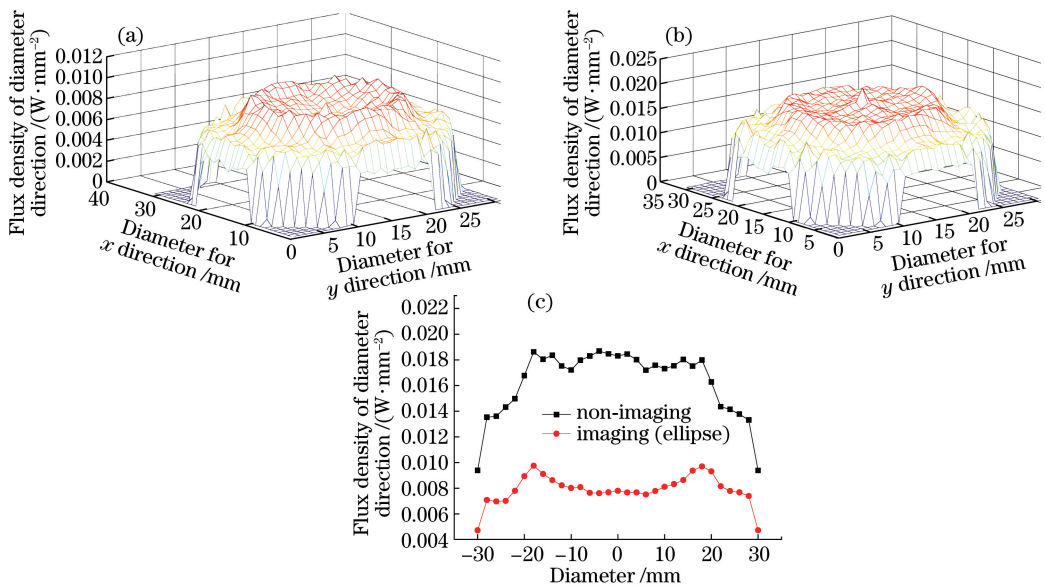


图 5 棒储能密度模拟。(a)椭圆腔;(b)非成像腔;(c)棒横截面储能密度

Fig. 5 Numerical results of rod stored energy density.

(a) Elliptic reflector; (b) non-imaging reflector; (c) stored energy density of rod cross section

3 实验方法

实验采用棒状放大器结构参数为: 6 支氙灯(直

径 $\phi = 20 \text{ mm}$, 长度 $L = 300 \text{ mm}$, 3 灯串联, 电压 15 kV , 放电脉宽 $500 \mu\text{s}$), 钨玻璃棒($\phi = 40 \text{ mm}$, $L = 360 \text{ mm}$, 掺杂离子浓度为 $3.47 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$)、灯

棒中心距为 65 mm。反射腔包括:1) 椭圆成像腔,长轴为 58.5 mm,短轴为 48.6 mm;2) 非成像腔。测试原理如图 6 所示,光源采用脉宽为 10 ns 的方波,经过分束器后,其中一条光线直接进入示波器,另一条光线先经过一个接收器后进入棒内,经同步抽运放大后进入另一接收器,最后达到示波器的端口,两条光线相对强度比值即为增益系数。为了测

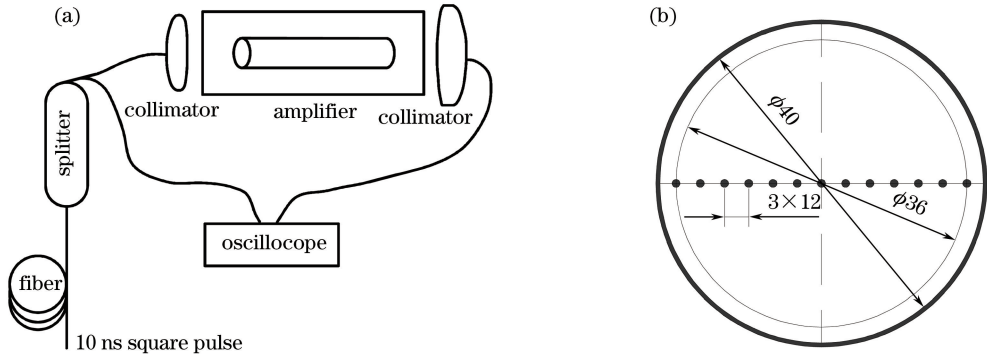


图 6 测试原理图。(a)测试系统;(b)13个测试点

Fig. 6 Schematic diagram of test principle. (a) Test system; (b) 13 test points

4 实验结果

成像和非成像腔对棒状放大器增益和小信号增益系数的影响如图 7 所示。小信号增益系数在 $-10 \sim 10$ mm 之间差异不大。靠近铍玻璃棒外圆柱面时,非成像反射腔增益特性明显优于成像腔。分析铍玻璃棒中心和边缘增益差别时需注意:1) 准确预测放大器增益需要针对放大过程中涉及的所有物理过程(氙灯辐射-棒内抽运能量)建立模型,受限

于模拟软件,本文简化模型和模拟结果只能作为实验之前的参考;2) 放大器具有 4 个可变参数,非成像腔氙灯直径应严格遵循

$$2\pi r N = 2\pi R, \quad (9)$$

式中: r 为氙灯半径; R 为铍玻璃棒半径; N 为氙灯数量。为了确保实验环境一致,选用了相对于非成像腔较大直径的氙灯,直径为 20 mm,导致非成像放大器中部分氙灯光线被氙灯本身吸收^[16-17],从而牺牲了非成像腔的光学特性。

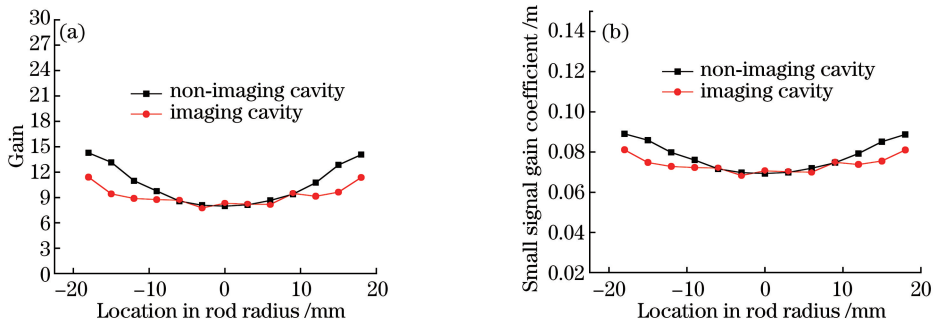


图 7 测试结果。(a)增益;(b)小信号增益系数

Fig. 7 Test results. (a) Gain; (b) small-signal gain coefficient

5 结 论

模拟结果表明,非成像反射腔提供了 100% 的理论几何效率,即没有抽运光线反射回氙灯。因此,光强不受氙灯等离子体二次吸收反射光线的影响,可以获得更高的效率和更好的均匀性。实验初始条

件的设置导致棒状放大器小信号增益系数的模拟数值和测量数据出现差异。分析认为,简化模型并不能完全代表真实抽运物理过程,同时,对比研究方法决定了非成像中的氙灯直径不能按照设计值制造,需牺牲非成像反射腔的光学特性。综上所述,非成像反射腔的增益性能优于成像反射腔。

参 考 文 献

- [1] Touze G L, Cabourdin O, Mengue J F, *et al.* 3D gain modeling of LMJ and NIF amplifiers [J]. Proceeding of SPIE, 1999, 3492: 630-637.
- [2] Wang Y, Zhao C M, Yang S H, *et al.* Solar directly pumped 1064 nm laser amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0301003.
王予, 赵长明, 杨苏辉, 等. 太阳光直接抽运 1064 nm激光放大器[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0301003.
- [3] Wang B Y, Zhang J Y, Wang L, *et al.* Research on calculation of gain spatial distribution for main amplifiers in million joules laser facility [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0214003.
王冰艳, 张军勇, 王利, 等. 万焦耳级激光主放大器增益空间分布计算研究[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0214003.
- [4] Naum F, Chiguera T, Bra'ulio B, *et al.* Analytic solutions for the geometric and optical properties of stationary compound parabolic concentrators with fully illuminated inverted V receiver [J]. Solar Energy, 2008, 82: 132-143.
- [5] Xu J Z, Zhang X C. Circular involute stage [J]. Optics Letters, 2004, 29(17): 2082-2084.
- [6] Tang X X, Qiu J S, Fan Z W, *et al.* Laser diode array side-pumped medium-aperture Nd:glass square rod amplifier[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(2): 021403.
- [7] Wu H, Zhang X M, Ge P. Design method of a light emitting diode front fog lamp based on a freeform reflector[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 72: 125-133
- [8] Fekete D. Effect of multiple reflections on the design of an elliptic cavity for solid state lasers[J]. Applied Optics, 1966, 5(4): 643-646.
- [9] Sup B A, Zainudin M F, Ali T Z S, *et al.* Effect of rim angle to the flux distribution diameter in solar parabolic dish collector[J]. Energy Procedia, 2015, 68: 45-52.
- [10] Arbuzov V I, Fedorov Y K, Kramarev S I, *et al.* How process factors affect the limiting characteristics of neodymium phosphate glasses for large disk- and rod-shaped active elements [J]. Journal of Optical Technology, 2013, 80(5): 321-324.
- [11] Wang Y, Kan H. Improvement on evaluating absorption efficiency of a medium rod for LD side-pumped solid-state lasers [J]. Optics Communications, 2003, 226(1): 303-316.
- [12] Wu Y Z, Zhu J Q, Zhang Z X, *et al.* Radiation model of a xenon flash lamp in a laser amplifier pump cavity [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2015, 3: e31.
- [13] Shaykin A A, Fokin A P, Soloviev A A, *et al.* Laser amplifier based on a neodymium glass rod 150 mm in diameter [J]. Quantum Electronics, 2014, 44(5): 426-430.
- [14] Koshel R J. Non-edge ray reflector design for illumination systems[J]. Proceeding of SPIE, 2000, 4092: 71-81.
- [15] Yew T K, Chong K K, Lim B H. Performance study of crossed compound parabolic concentrator as secondary optics in non-imaging dish concentrator for the application of dense-array concentrator photovoltaic system [J]. Solar Energy, 2015, 120(1): 296-309.
- [16] Thomas N L, Erlandson A C, Farmer J C, *et al.* Protected silver coatings for flashlamp-pumped Nd:glass amplifiers [J]. Proceeding of SPIE, 1998, 3578: 730-736.
- [17] Cui X F, Liu Q X, Li X D. Theory analysis and experiment investigations of an original double-gap cavity[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2001, 13(2): 204-208.
崔学芳, 刘庆想, 李旭东, 等. 一种新型双间隙输出腔的理论和实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(2): 204-208.