

文章编号: 0258-7025(2009)01-0070-07

激光二极管阵列抽运高增益钕玻璃棒状放大器

邓青华^{1,2} 彭翰生³ 高松信⁴ 李明中¹ 丁磊¹ 雷军⁴ 王建军¹
罗亦鸣¹ 唐军¹ 林宏奂¹ 张锐¹ 邓颖¹ 卢振华¹

中国工程物理研究院

(¹ 激光聚变研究中心, ² 研究生部, ³ 院机关, ⁴ 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 宽带高增益钕玻璃放大器在惯性约束聚变(ICF)激光驱动器研究中具有重要意义。对影响激光二极管阵列(LDA)抽运钕玻璃棒状放大器增益的各因素进行分析,确立了放大器的优化参量。建立了模拟环形 LDA 侧面抽运钕玻璃棒状放大器功率沉积过程的光线追迹模型,并开发相关程序。在模拟计算基础上,分别优化了 LDA 直接耦合抽运和 LDA 准直耦合抽运这两种构型的放大器参数。最后引入了指向误差分析,比较了这两种耦合方式的优劣,最终将放大器定为直接耦合抽运方式。按照优化后的结构加工了 8.1 kW 激光二极管抽运的 $\phi 2$ mm 钕玻璃放大器,放大器的荧光分布均匀,当抽运功率为 7.7 kW 时,得到了 40 倍的小信号增益,且放大器后增加偏振片时所测增益稳定性较好。

关键词 激光器;激光二极管抽运固体激光器;侧面抽运;抽运耦合

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093601.0070

Laser Diode Array Pumped High-Gain Nd Glass Rod Amplifier

Deng Qinghua^{1,2} Peng Hansheng³ Gao Songxin⁴ Li Mingzhong¹
Ding Lei¹ Lei Jun⁴ Wang Jianjun¹ Luo Yiming¹ Tang Jun¹
Lin Honghuan¹ Zhang Rui¹ Deng Ying¹ Lu Zhenhua¹

(¹Laser Fusion Research Center, ²Postgraduate Department, ³Headquarter, ⁴Applied Electronics Institute, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Nd³⁺-doped phosphate glass amplifier with high gain and broad band is important in inertial confinement fusion (ICF) laser driver research. After analyzing all the factors which determine gain of a laser diode array (LDA) pumped Nd glass rod amplifier, the optimum parameters are presented. The ray-tracing model is set up to simulate the deposition process of LDA side-pumped Nd glass rod amplifier, and the relative program is developed. Based on the simulation, the structures of amplifiers without and with micro-lens are optimized. From the error analysis of LDA pointing, it is found out that the amplifier without micro-lens is more preferable. A rod amplifier with $\phi 2$ mm Nd glass and 8.1 kW pumping power is manufactured. The fluorescence distribution of the amplifier is uniform. As pumping power is 7.7 kW, the amplifier gain is 40. When a polarizer is added behind the amplifier, gain of the amplifier is very stable.

Key words lasers; diode pumped solid state laser; side pumping; pump power coupling

1 引言

目前运行的惯性约束聚变(ICF)激光驱动器多数采用窄带脉冲,然而这些高功率激光装置在缓解

B 积分限制、抑制大口径光学元件内横向受激布里渊散射(SBS)效应从而提高光束近场质量、结合束匀滑技术改善光束远场分布等几个方面对宽带脉冲

收稿日期:2008-03-03;收到修改稿日期:2008-06-27

作者简介:邓青华(1976—),女,博士研究生,主要从事高功率固体激光技术方面的工作。E-mail:dqhaj@yahoo.com.cn

导师简介:彭翰生(1936—),男,博士生导师,主要从事等离子体物理和超短激光技术方面的研究。

E-mail:penghsh@839.caep

存在需求。美国 NIF 装置已在前端利用几个具有不同技术指标的相位调制器分别满足这些需求^[1]。而我国新一代 ICF 激光驱动器拟采用宽带啁啾脉冲进行时间编码得到所需纳秒脉冲的前端技术方案,从而满足以上几方面对宽带脉冲的需求^[2]。因而新一代 ICF 激光驱动器建造过程中,如何增大整个系统的放大带宽成了非常重要的研究课题。

高功率激光装置中的预放系统是一个重要环节,其功能之一就是対前端输出的种子脉冲进行预放大。当灵活方便的光纤前端纷纷被新一代高功率固体激光驱动器采用后^[3],预放系统的预放大功能显得更为突出。这是因为输出峰值功率的限制,从光纤前端输出的种子光单脉冲能量很低,通常只有纳焦耳~微焦耳水平。这种情况下,预放系统必须提供更高的净增益($10^6 \sim 10^9$)才能使注入主放大器的激光脉冲达到数焦耳水平,从而能被主放大器有效放大。因而预放系统中的宽带高增益放大问题必须加以解决。本文主要就组成预放系统的关键高增益放大器单元进行研究。

由于激光二极管阵列(LDA)抽运的固体激光器具有高效率、高可靠性以及 LD 抽运源的长寿命等优点,因而成为新一代固体激光器的主角^[4~6]。钹玻璃介质具有较好的光学均匀性、高的掺杂浓度、合适的受激发射截面、大的增益带宽(大于 20 nm),是当今用于 ICF 研究高功率激光驱动器的最佳介质。因而 LDA 抽运的钹玻璃放大器是解决预放系统高增益宽带放大问题的首选方案。LDA 侧面抽运放大器具有结构简单、耦合效率高等优点,因而本文将 LDA 侧面抽运钹玻璃放大器作为研究重点。

2 LDA 侧面抽运钹玻璃放大器优化设计

2.1 放大器优化设计参量

由文献^[7]可知,LDA 抽运放大器的小信号增益可确定为

$$G_0 = \exp\left(\frac{KP_{\text{pump}}}{AI_s}\right), \quad (1)$$

式中 K 为由放大器抽运结构、增益介质吸收特性、抽运光与主激光波长比等确定的效率参量; P_{pump} 为激光二极管阵列的抽运功率; A 为增益介质的横截面积; I_s 为增益介质的饱和光强,其值确定为

$$I_s = \frac{h\nu}{\sigma\tau}, \quad (2)$$

式中 $h\nu$ 为激光单光子能量, σ 和 τ 分别为增益材料

的受激发射界面和上能级荧光寿命。由于磷酸盐钹玻璃材料的受激发射截面小($3.9 \times 10^{-20} \sim 4.3 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$),上能级荧光寿命为 330 μs 左右,所以磷酸盐的饱和光强很大,不利于实现高增益。从(1)式可以看出,要在磷酸盐钹玻璃实现高增益,只有尽可能地增大效率参量 K ,抽运功率 P_{pump} 并尽可能地减小增益介质的横截面积 A 。考虑放大器的工程可行性和实际光束传输问题,本文将钹玻璃介质的尺寸定为 $\phi 2 \text{ mm}$;由于激光二极管的价格仍然比较昂贵,所以不能一味地靠增大抽运功率来提高放大器增益,而是应充分地优化放大器的抽运结构来提高效率参量 K 。效率参量 K 可表示为

$$K = \eta_{\text{T}} \eta_{\text{a}} \eta_{\text{u}} \eta_{\text{n}}, \quad (3)$$

式中 η_{T} 为抽运光由 LDA 传输到增益介质的转移效率,称为辐射传输效率; η_{a} 为对进入增益介质内抽运光的吸收效率;上能态效率 η_{u} 为激光跃迁时发射的功率与抽运带吸收的功率之比,也是量子效率和斯托克斯效率的乘积,增益材料确定后, η_{u} 值随之确定; η_{n} 为荧光效率,由于激光上能级粒子具有一定的荧光寿命,上能级粒子会以自发辐射方式回到下能级,由于研究的是脉冲放大器,信号光脉宽远小于抽运脉宽,当信号光注入时,存留在上能级的粒子与总的抽运到上能级的粒子数之比小于 1,该比值即为荧光效率。荧光效率计算式为

$$\eta_{\text{n}} = \tau/t \times [1 - \exp(-t/\tau)], \quad (4)$$

式中 t 为抽运脉冲的宽度。抽运脉冲的宽度确定后,在抽运脉冲结束时(亦为信号光注入时)的荧光效率也随之确定。为了获得荧光效率和抽运总能量乘积的最大值,通常让抽运脉宽略大于激光上能级寿命。由此看来,能通过优化放大器结构来提高放大器增益的是辐射传输效率 η_{T} 和吸收效率 η_{a} ,因此将这两项的乘积(称为抽运储能效率 η_{deposit})作为优化参量之一;另外,放大器的增益均匀性也非常重要。所以本文主要就提高放大器的抽运储能效率和抽运均匀性来优化放大器结构。

2.2 放大器抽运光强沉积模拟过程

激光二极管阵列侧面抽运放大器通常有两种抽运结构:一种是由数个激光二极管(LD bar)组成的抽运环直接对增益介质进行抽运;另一种是准直后的数个激光二极管组成抽运环抽运增益介质。这两种放大器的结构示意图如图 1 所示,(a)为激光二极管阵列直接抽运的钹玻璃放大器,(b)为激光二极管阵列准直后抽运的钹玻璃放大器。一般而言,当单个 LD 的发射功率很大时,会选用第一种抽运结

构,LD 个数较少,能实现小的 LD 抽运环直径,从而实现高的耦合效率;当单个 LD 的发射功率不是很大时,则会选用第二种抽运结构,LD 个数较多,LD 抽运环直径较大,由于 LD 输出的发散光经过微透镜准直,也能实现高的耦合效率。两种结构中激光

二极管阵列慢轴方向与钕玻璃棒长度方向一致,忽略激光二极管阵列慢轴方向的发散,则抽运光沿晶体轴向是均匀的,只需要考虑钕玻璃横截面内的光强分布即可。图 1 显示了两种抽运结构垂直于晶体轴向一个截面内的情况。

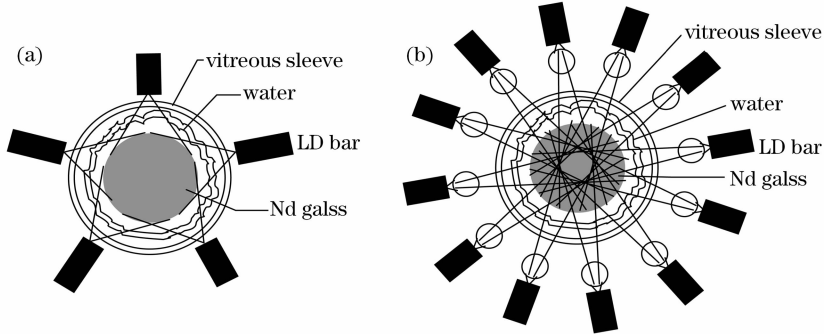


图 1 LDA 直接抽运(a)和准直后抽运(b)钕玻璃放大器示意图

Fig. 1 Scheme of Nd³⁺-doped phosphate glass amplifier without (a) and with micro-lens (b)

只考虑 LD 快轴方向的发散,而抽运光在快轴方向随角度变化呈高斯分布,因而各 LD 输出的抽运功率分布可表示为

$$P(\theta) = a \exp\left[-\left(\frac{\theta}{\theta_{\perp}/2}\right)^2 \ln 2\right], \quad (5)$$

式中 θ_{\perp} 为激光二极管未准直或准直后的发散角, a 为功率归一化常数,有

$$a = P_0 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \exp\left[-\left(\frac{\theta}{\theta_{\perp}/2}\right)^2 \ln 2\right], \quad (6)$$

式中 P_0 为 LD 单位长度上的发射功率。

在计算整个增益介质内的抽运光强沉积分布时,把增益介质的横截面用单元网格离散化,任一光线在各网格内沉积的抽运功率为

$$P_{ab} = P_{in}[1 - \exp(-\alpha l)], \quad (7)$$

式中 P_{in} 为进入单元网格的抽运功率, α 为增益介质对抽运光的吸收系数, l 为光线在网格内经过的路径,可表示为

$$l = \sqrt{(x_{out} - x_{in})^2 + (y_{out} - y_{in})^2}, \quad (8)$$

$(x_{in}, y_{in}), (x_{out}, y_{out})$ 为光线在单元网格上入射点与出射点的坐标。

实际的放大器中,为了对钕玻璃棒进行冷却,钕玻璃棒外有去离子冷却水,水层外面有透明封水管。在计算钕玻璃棒截面内抽运光强沉积分布过程中,忽略了棒表面和封水管表面的反射损耗和水层的吸收损耗,而只考虑它们对抽运光线的折射影响。根据工程经验,水层厚度设计为 1 mm,封水管的内径为 $\phi 4$ mm,外径为 $\phi 5$ mm。

增益介质的吸收系数与掺杂浓度有关,由于所

用钕玻璃棒的口径小,为了提高储能吸收效率,钕玻璃材料的掺杂原子数分数较高,为 3.3%,对 802 nm 抽运光的吸收系数为 6.5 cm^{-1} 。

利用(5),(6)式各 LD 的抽运光按角度离散化,然后追踪每一条光线在介质内的传播路径,再利用(7),(8)式计算各光线在传输过程中沉积在路径上各单元的功率,就可以计算出整个介质内的抽运光强分布。

2.3 放大器抽运结构优化

先分别就图 1 所示的两种抽运结构参数进行优化,然后再对优化好的两种结构进行比较,从中得到最优抽运结构。

LDA 直接抽运构型中,抽运储能效率随着激光二极管阵列组成的抽运环直径增大而减小,如图 2 所示。因而为了获得高的抽运储能效率,激光二极管

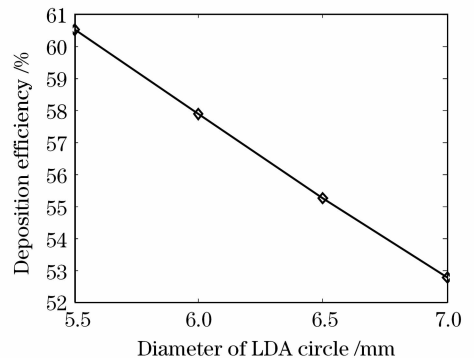


图 2 LDA 直接抽运时抽运沉积效率随抽运环直径的变化曲线

Fig. 2 Deposition efficiency varying with diameter as LDA pumping ring directly

管抽运环的直径应尽可能小。因为封水套管的外径为 $\phi 5\text{ mm}$ ，所以激光二极管抽运环的直径优化为 5.5 mm 。在这种条件下，旋转对称分布的激光二极管个数不同，钹玻璃棒内的抽运光强分布也不同，如图 3 所示。为了不因相对辐照而影响激光二极管寿

命，将 LD 的个数均设计为奇数。由图 3 可知，随着 LD 个数的增加，钹玻璃棒内的抽运光强分布越均匀。当 LD 增至 9 个时，抽运光强分布已很均匀，因而 LD 的个数优化为 9。

激光二极管阵列准直后抽运构型中，由于 LD

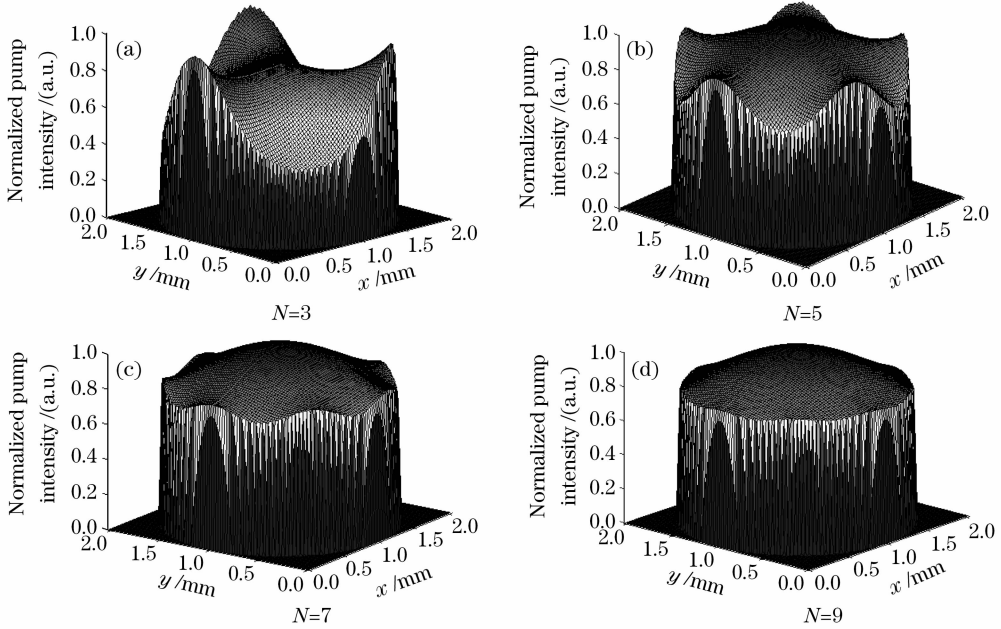


图 3 直接抽运结构中不同 LD bar 个数时钹玻璃棒内的抽运光强分布

Fig. 3 Pumping power distribution varying with number of LD bar changing

准直后的发散角大小控制与抽运环直径设计在提高抽运储能效率和改进增益介质内的抽运光强分布方面具有相同功能，因而在优化过程中，将抽运环直径固定为 14.5 mm 而只优化准直发散角。LD 个数定为 17，准直发散角变化时抽运储能效率和钹玻璃棒内的抽运光强分布分别如图 4，图 5 所示。由图 4，5 可知，随着准直发散角的增大，抽运储能效率降低，钹玻璃棒的光强分布变均匀；当准直发散角为 15° 时，钹玻璃棒内的抽运光强分布已很均匀，此时的抽

运储能效率约为 60% 。因而在第二种抽运构型中，将 LD 的准直发散角优化为 15° 。

比较图 2~5 可知，激光二极管阵列直接对钹玻璃棒进行抽运构型中，当抽运环直径为 5.5 mm ，LD 个数为 9 个时，可在钹玻璃棒内取得均匀的抽运光强分布，抽运储能约为 60% ；而在激光二极管阵列准直后对钹玻璃棒进行抽运构型中，当抽运环直径为 14.5 mm ，LD 个数为 17 个，发散角为 15° 时，也可在钹玻璃棒内取得均匀的抽运光强分布，抽运储能也约为 60% 。其实，在模拟计算过程中，还有两个现实存在的方面没有考虑：其一是用微透镜对 LD 进行准直时均会引入损耗，所以激光二极管阵列准直后抽运这种构型的抽运储能效率会更低；其二是以上所有计算都是在理想情况下进行的，即所有 LD 都理想指向钹玻璃棒的中心，但由于机械加工误差、封装误差等的存在，这种理想情况根本不存在。当 LD 指向偏离钹玻璃棒中心时，两种优化后的抽运结构能实现的抽运储能效率对比结果如图 6 所示。由图 6 可知，激光二极管阵列准直后抽运这种构型对指向误差更敏感。而由于准直过程中微透镜与 LD 线存在精确对准调整环节，这一环节容易

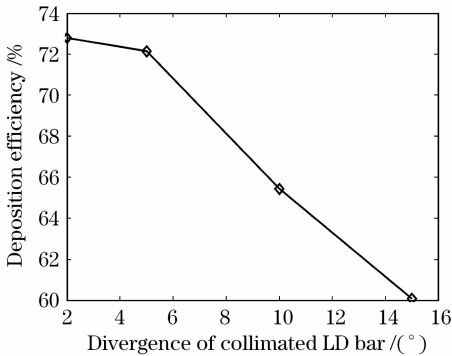


图 4 LD 准直发散角变化时抽运储能效率的变化曲线

Fig. 4 Deposition efficiency of pumping power varying with collimating angle

引起光束指向的偏离,所以实际封装过程中这一种构型中的光束指向偏离误差相对第一种构型会更大,从而可以推断这种构型放大器的抽运储能效率

会比理想计算值有较大降低。基于以上两个现实原因可以得出结论:优化后的激光二极管阵列直接抽运放大器的结构为最佳结构。

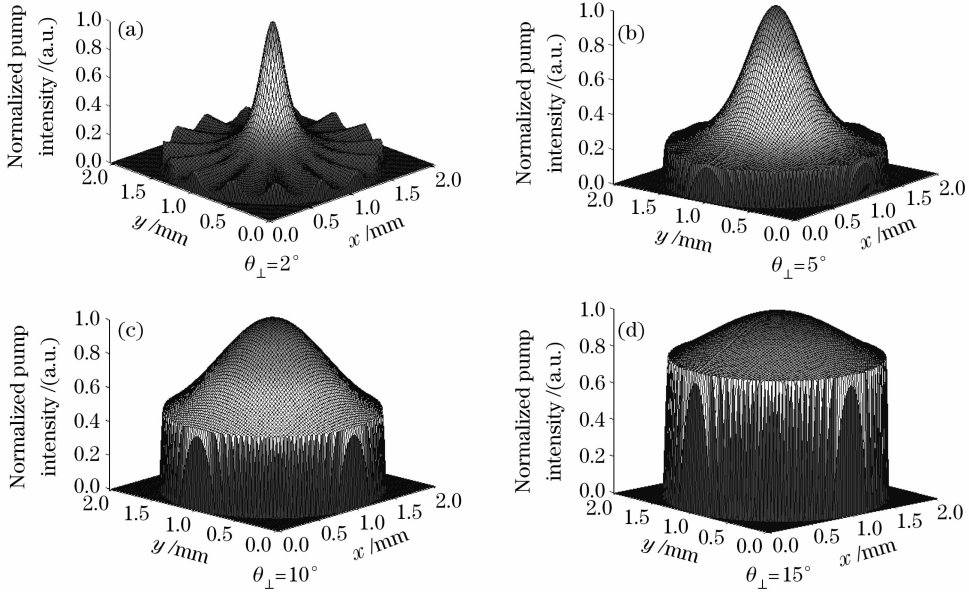


图 5 LD 准直发散角变化时钇玻璃棒内抽运光强的分布图

Fig. 5 Pumping power distribution varying with LD collimating angle

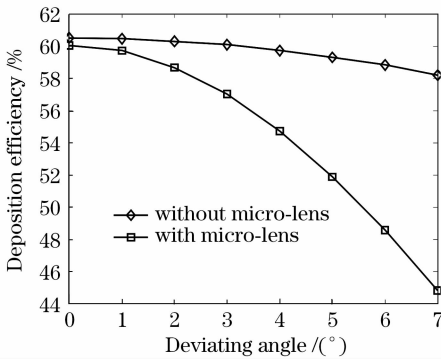


图 6 LD 指向偏离钇玻璃棒中心时两种优化后的抽运结构能实现的抽运储能效率对比

Fig. 6 Deposition efficiency varying with deviating angle of LDA pumped rod amplifier of Nd^{3+} -doped phosphate glass without and with micro-lens

3 高增益钇玻璃放大器实验研究

依据优化结果,设计加工了 9 边抽运的激光二极管抽运钇玻璃放大器。放大器由 6 个抽运环组成,每个抽运环具有正 9 边形结构,由 9 个 LD 和镀金铜块组成,镀金铜块的作用是反射对面透射或从棒侧面漏泄过来的抽运光,进而形成二次或多次反射而增大系统抽运储能效率。抽运环的结构示意图如图 7 所示。每个 LD 长度为 1 cm,抽运功率为 150 W,则放大器总的抽运功率为 8.1 kW。放大器

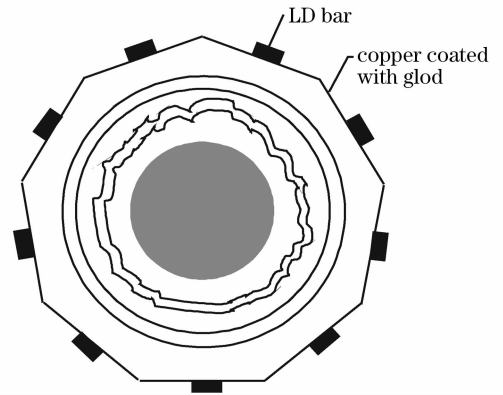


图 7 抽运环结构示意图

Fig. 7 Pumping structure of the amplifier

总长为 85 mm,增益介质为 $\phi 2$ mm,长 85 mm 的 LHG-8 型磷酸盐钇玻璃,荧光寿命为 320 μs ,受激发射截面为 $4.2 \times 10^{-20} \text{ cm}^{-2}$ 。

利用荧光光谱仪测试了放大器的荧光分布,如图 8 所示。由图可知,经过优化设计, $\phi 2$ mm 放大器中的抽运光强分布均匀;所测的抽运光强分布与图 3 中 $N = 9$ 时的模拟计算结果吻合得很好。

将 1 Hz, 30 μJ , 3 ns, 口径为 $\phi 1$ mm 的脉冲光源作为小信号种子光,用行波法测试了放大器的小信号增益。当激光二极管冷却水温为 16 $^{\circ}\text{C}$,信号光相对抽运脉冲上升沿延时 350 μs 时所测到的小信号增益如图 9 所示。图 9 中同时给出了小信号增益理论

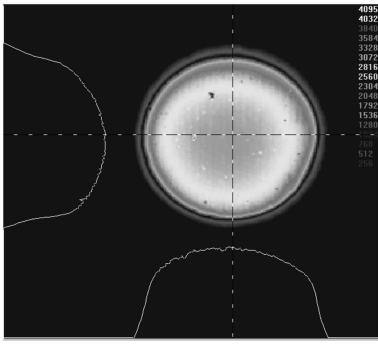
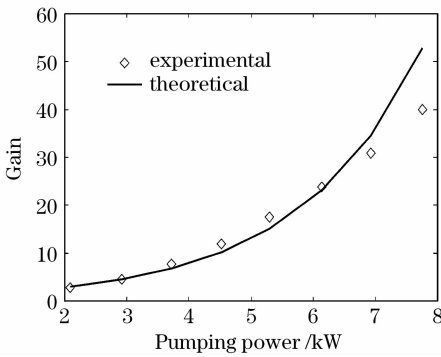
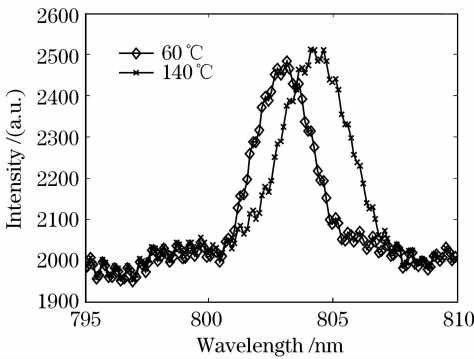
图 8 $\phi 2$ mm钕玻璃放大器的荧光分布图Fig. 8 Fluorescence distribution of $\phi 2$ mm Nd^{3+} -doped phosphate glass amplifier图 9 $\phi 2$ mm钕玻璃放大器的增益曲线Fig. 9 Gian of $\phi 2$ mm Nd^{3+} -doped phosphate glass amplifier

图 10 LDA 发射光谱图

Fig. 10 Emitting spectra of LDA

计算结果,增益理论计算过程中除了考虑光线追迹计算所得的 60%抽运耦合外,还考虑了封水套管和棒侧面对抽运光的反射损耗,取为 8%。由图 9 可知,当抽运功率为 7.7 kW 时,放大器小信号增益可达 40 倍;当抽运功率较小时,实验测试增益与理论计算结果吻合;当抽运功率较大时,放大器的增益增长偏离了理论计算结果。这是由于抽运功率较大时,LD 积温升高,发射频谱中心红移(如图 10 所示),抽运中心波长偏离钕玻璃材料的吸收峰值,吸

收效率降低,抽运储能效率随之下降,最终使得增益偏离指数增长规律。

由图 10 可知,LDA 的发射频谱分布是半峰全宽为 3 nm 的高斯型分布,当电流为 60 A 时,光谱中心为 802.52 nm;随着电流的增加,高斯分布中心红移,中心移动速度约为 0.021625 nm/A。尽管 LDA 的发射谱很窄,但毕竟有一定带宽及一定的分布。为了能准确而快速地求出钕玻璃增益介质对 LDA 抽运光的吸收情况,一种简便方法就是求出钕玻璃增益介质对 LD 发射谱的等效吸收系数。从而将 LDA 抽运光看作单色光,而钕玻璃增益介质对其的吸收系数为该等效吸收系数。图 11 显示了所用钕玻璃材料在 802 nm 附近的吸收曲线。由图可知,吸收曲线以 802 nm 为中心,半峰全宽为 13 nm。假设 LDA 发射谱分布为 $\rho_{\text{diode}}(\lambda)$,而钕玻璃介质的吸收谱分布为 $\alpha(\lambda)$,则钕玻璃增益介质对 LD 发射谱的等效吸收系数为

$$\alpha_{\text{eq}} = \int \rho_{\text{diode}}(\lambda) \times \alpha(\lambda) d\lambda / \int \rho_{\text{diode}}(\lambda) d\lambda. \quad (9)$$

将不同电流下的等效吸收系数与光线追迹过程结合起来,求出不同电流下的抽运储能效率,在此基础上计算不同电流(即不同抽运功率)条件下的理论增益。计算所得的理论增益与实验结果比较如图 12 所示。由图可知,考虑 LD 阵列发射频谱中心随电流变化后计算所得的理论增益与实验结果吻合较好。

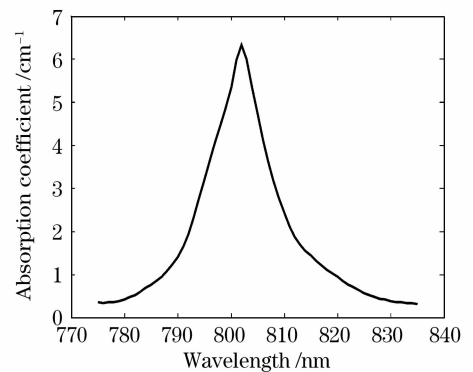


图 11 磷酸盐钕玻璃的吸收曲线

Fig. 11 Absorption curve of Nd^{3+} -doped phosphate glass

在放大器后加偏振片,测试放大器的偏振增益稳定性,测试结果如图 13 所示。由图可知,激光放大器工作 10 min 后进入稳定状态,此后随着工作时间的延长,增益起伏变化很小。这表明由于 $\phi 2$ mm 钕玻璃放大器中的增益介质直径小,且被充分水冷,因热沉积而产生的退偏效应及增益变化不明显。

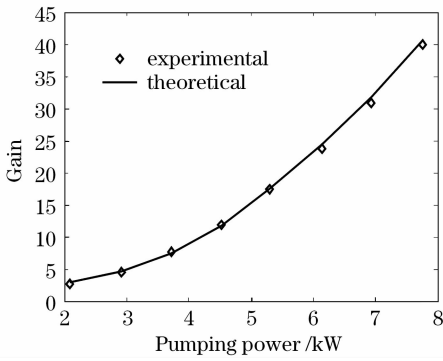


图 12 在不同电流下频谱中心移动时 $\phi 2$ mm钕玻璃放大器的实验增益与理论计算结果对比

Fig. 12 Experimental gain versus theoretical gain of $\phi 2$ mm Nd^{3+} -doped phosphate glass considering LDA emitting peak changing with different currents

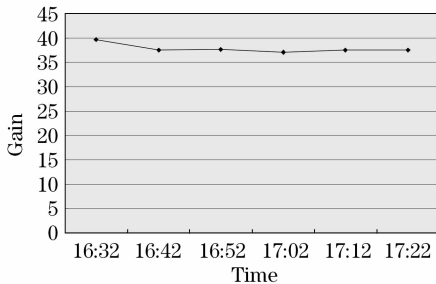


图 13 $\phi 2$ mm钕玻璃放大器的增益稳定性曲线

Fig. 13 Gain of $\phi 2$ mm Nd^{3+} -doped phosphate glass amplifier varying with time

4 结 论

对宽带高增益钕玻璃放大器进行了设计和实验研究。对影响放大器增益的各因素进行了分析,得出能通过结构优化来提高传输效率 η_T 和吸收效率 η_a ,从而提高放大器增益,并将这两项的乘积(称为抽运储能效率 η_{deposit})和增益均匀性作为优化参量。建立了模拟环形激光二极管阵列侧面抽运钕玻璃棒状放大器功率沉积过程的光线追迹模型,并开发了相关程序,在模拟计算基础上,将LDA直接耦合抽运构型的放大器优化为:旋转对称分布的9个LD能实现钕玻璃棒内均匀的抽运光强分布,抽运环直径为5.5 mm时能实现60%的抽运储能效率;而在LDA准直后对钕玻璃棒进行抽运构型中,当抽运环直径为14.5 mm,LD个数为18个,发散角为 15° 时,也可在钕玻璃棒内取得均匀的抽运光强分布,抽运

储能也约为60%。然而由于准直透镜的损耗,后者的抽运储能效率会更低;后者对LD光束指向误差也更敏感,由此将放大器定为直接耦合抽运方式。按照优化后的结构加工了8.1 kW激光二极管抽运的 $\phi 2$ mm钕玻璃放大器,放大器的荧光分布均匀,当抽运功率为7.7 kW时,得到了40倍的小信号增益。然而当抽运功率增大时,由于LDA发射波长红移而影响了抽运储能效率,最终导致增益增长偏离了指数规律。所以应改进LDA的冷却结构,提高制冷效率,抑制LDA发射波长红移而进一步提高增益;加偏振片后所测得的增益曲线表明,10 min后放大器进入稳定工作状态,此后增益稳定。本文设计及加工的钕玻璃放大器具有抽运场均匀、高耦合效率、高增益、增益稳定、能重复频率工作等特点,在新一代惯性约束聚变驱动器中可以通过选取适当的光路构型对光纤前端输出的种子光实现高倍率放大。

参 考 文 献

- 1 J. W. Peter, W. B. Mark, V. E. Gaylen *et al.*. NIF injection laser system [C]. *SPIE*, 2004, **5341**:146~155
- 2 Hu Zhengliang, Hu Yongming, Zhao Minghui *et al.*. Analysis and simulation of optic fiber-pulse stacker [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7):966~969
胡正良,胡永明,赵明辉等. 光纤脉冲堆积器的模拟分析[J]. 光子学报, 2006, **35**(7):966~969
- 3 Lin Honghuan, Wang Jianjun, Sui Zhan *et al.*. Integrated all fiber optical pulse generation system for laser fusion driver [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **57**(3):470~474
林红欢,王建军,隋展等. 用于激光聚变驱动器的全光纤、全固化光脉冲产生系统[J]. 物理学报, 2008, **57**(3):470~474
- 4 Tian Yubing, Tan Huiming, Cao Hongzhong *et al.*. Low power laser diode-pumped solid-state $\text{Yb}:\text{YAG}$ laser at room temperature [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5):633~636
田玉冰,檀慧明,曹洪忠等. 低功率激光二极管抽运的室温运转 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(5):633~636
- 5 Wang Wei, Liu Xingang, Liu Yingtong. Laser diode pumped $\text{Nd}:\text{NYW/LBO}$ green laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5):646~648
王巍,刘妍钢,刘英同. 激光二极管抽运的 $\text{Nd}:\text{NYW/LBO}$ 绿光激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(5):646~648
- 6 Jia Wei, Hu Yongming, Li Mingzhong *et al.*. Simulation and design of hollow lens duct as a new kind of coupling system for high power laser diode arrays [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8):939~942
贾伟,胡永明,李明中等. 空心透镜导管的模拟与设计[J]. 中国激光, 2004, **31**(8):939~942
- 7 W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2002
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京:科学出版社, 2002