

文章编号: 1001-4322(2003)12-1163-04

高功率二极管泵浦激光模块技术研究*

蔡 震^{1,2}, 吕文强¹, 武德勇¹, 庞 毓¹, 唐 淳¹, 张 凯¹

(1. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;
2. 中国工程物理研究院 研究生部, 北京 100088)

摘 要: 开展了二极管泵浦棒状 Nd: YAG 激光模块技术研究, 在数值模拟激光模块增益分布的基础上对耦合结构进行了优化, 初步研制出了高增益振荡级激光模块及高储能放大激光模块。实验结果表明, 振荡级激光模块泵浦均匀且增益较高, TEM₀₀ 模输出情况下单脉冲能量为 11.8 mJ, 光-光效率为 15%; 放大模块在 500 Hz 重复频率下获得了单脉冲 400 mJ 的储能。

关键词: 激光二极管; 激光模块; 泵浦; 增益分布; 储能
中图分类号: TN248 **文献标识码:** A

激光二极管(LD)泵浦的固体激光器是让 LD 的输出转变为固体工作物质激光输出的激光器。由于激光二极管的发射谱线线宽窄且随工作温度的变化可实现波长调谐, 能大大提高激光器的工作效率^[1,2]; 同时由于二极管泵浦固体激光器具有寿命长、热负载小、结构紧凑等优点, 因此在通讯及医学等领域都有着极其广泛的应用前景^[3,4]。而二极管泵浦激光模块就是通过优化设计, 将工作物质与泵浦源固化为一体的模块式结构。因此能否开发出泵浦均匀且储能密度高的激光模块对于进一步研制高平均功率、高光束质量的半导体泵浦固体激光器具有非常重要的意义。

1 激光模块的数值模拟

相对“之”字形光路 Nd: YAG 板条而言, 棒状 Nd: YAG 由于其结构为径向对称, 易于实现泵浦耦合, 且因激光棒的通光面垂直于光轴, 有利于整个激光器光路的调节, 适合于激光器的工程化研制, 因此本文采用了棒状 Nd: YAG 作为激光工作物质。泵浦结构如图 1 所示, 激光头采用环形侧泵浦方式。为了提高激光棒的储能密度, 激光二极管发射的泵浦光经光纤柱透镜准直后耦合到工作物质中, 并使每一个二极管发射的中心光束均通过圆棒的中心。

采用光线追迹法计算了圆棒内的增益分布, 计算条件如下: 峰值泵浦功率为 400 W, 占空比为 10%, 泵浦光快轴方向的发散全角为 40°, 激光棒直径为 2.5 mm, 有效泵浦长度为 10 mm, Nd: YAG 的掺杂浓度为 1%, 折射率为 1.84, 吸收系数为 0.34 cm⁻¹。通过改变二极管出光面距棒中心的距离来比较不同情况下棒的增益分布, 优化得出的最佳距离为 4.25 mm, 增益分布数值模拟的结果如图 2 所示。由数值模拟结果可看出, 经过透镜耦合后, 激光棒内增益分布相对均匀且增益较高的区域位于棒中心周围直径约为 1.2 mm 的区域内。设泵浦耦

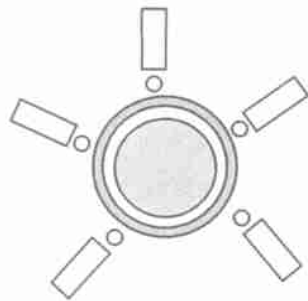


Fig. 1 Schematic diagram of pumping structure
图 1 泵浦结构示意图

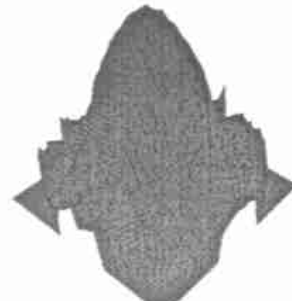


Fig. 2 Numerical calculation result of gain distribution
图 2 增益分布数值模拟结果

* 第七届全国激光科学技术青年学术交流会优秀论文。
收稿日期: 2003-08-19; 修订日期: 2003-09-05
基金项目: 国家 863 计划项目资助课题
作者简介: 蔡 震(1970-), 男, 博士研究生, 从事二极管泵浦固体激光的研究。

效率为 85 % , 储能效率为 35 % , 则棒内储能 $E_s = 27.4 \text{ mJ}$ (泵浦时间为 $230 \mu\text{s}$) , 对应的平均小信号增益 G_0 为^[5]:

$$G_0 = (E_s) / (h\nu V) = 0.9 \text{ cm}^{-1} \quad (1)$$

式中: σ 为 YAG 的受激辐射截面, V 为泵浦体积。考虑到图 2 的模拟结果, 棒中心区域的小信号增益应大于 0.9 cm^{-1} 。

采用一个曲率半径 $R = 1.2 \text{ mm}$, 厚度 $d = 0.9 \text{ mm}$ 的平凸球面柱透镜进行快轴准直。通过几何光线追迹^[6] 计算了两种不同折射率材料透镜的准直效果, 计算结果见图 3。从计算结果可看出, 高折射率材料透镜的准直效果优于低折射率材料的透镜, 另外采用普通球面柱透镜只能将 60° 发散角范围内的光线准直到 2° 以内。考虑到需将 90 % 以上的泵浦能量耦合到激光棒内, 选用了折射率为 1.81 的光纤为准直透镜。光纤中心距二极管出光面的距离为 0.24 mm 。

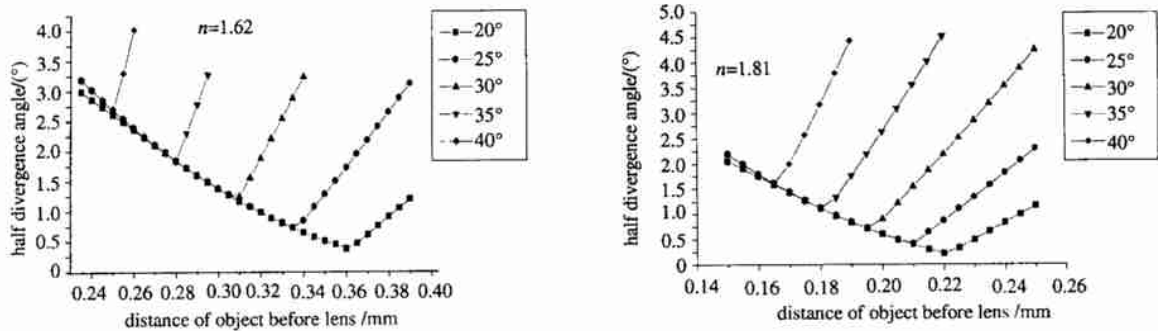


Fig. 3 Relation between the radiation angle and the coupling distance

图 3 物点发出的不同张角(半角)内的光线经微柱透镜准直后, 其发散角(半角)随物点距透镜前表面距离的变化关系

2 激光模块的设计

激光模块主要由分水环、密封压板、铜冷却器、石英玻璃管、O 形密封圈及激光二极管等零部件构成。机械结构如图 4 所示, 每一个激光二极管模块分别焊接在一个铜冷却器上, 5 个激光二极管环绕激光棒均匀放置, 使二极管出光面距棒中心的距离为 4.25 mm , 棒有效泵浦长度为 10 mm , 其泵浦面通水冷却, 冷却水路与二极管冷却水路串联。

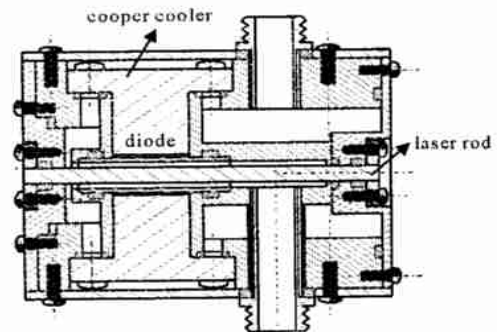


Fig. 4 Mount chart of laser module

图 4 激光模块装配图

3 激光模块性能测试

激光模块中的激光二极管全部由本实验室自行封装, 每一个单元模块由铜微沟道冷却器(亦作为电源正极)、准连续二极管 Bar、绝缘片、上电极片(作为电源负极)、密封垫圈等几部分组成。在冷却水温 20°C , 冷却水流量 0.3 L/min 的工作条件下对封装好的激光二极管性能进行了测试。图 5 为激光二极管的工作电流、电压及输出功率的关系曲线。从曲线可看出, 单个激光二极管的阈值电流为 20 A , 工作电压为 2 V , 最大峰值输出功率可达 80 W 。图 6 为激光二极管的光谱曲线, 从图中曲线可发现, 所封装的激光二极管的光谱半宽较窄, 约为 1.5 nm , 对泵浦过程有利, 但为了使激光二极管的发射波长与 Nd:YAG 的吸收峰相匹配, 需将二极管的工作温度提高到 25°C 左右。实验中测量了激光模块的增益系数, 结果显示在 500 Hz 重复频率下, 当泵浦脉宽为 $200 \mu\text{s}$ 时, 增益系数可达 0.97 cm^{-1} 。图 7 为激光模块增益分布的测试结果, 从图中可看出, 泵浦光基本上是均匀的, 增益分布较高的区域大约位于棒中心周围 $\phi 1.3 \text{ mm}$ 的区域内。根据激光棒增益分布的测试结果, 进行了谐振腔的设计: 确定腔长为 82 cm , 腔内全反镜曲率半径为 3 m , 输出镜曲率半径为 0.7 m , 反射率为 73% 。经实验, 当二极管的驱动电流为 90 A , 泵浦脉冲时间为 $200 \mu\text{s}$ 时, 激光器多模输出情况下的单脉冲输出能量为 18.8 mJ , 加入小孔限模后, 激光器 TEM_{00} 模输出情况下单脉冲的输出能量为 11.8 mJ , 光-光效率为 15% 。

为了评价该激光模块的热效应状况, 实验中还研究了模块的退偏效应及热聚焦效应。结果表明, 500 Hz 重

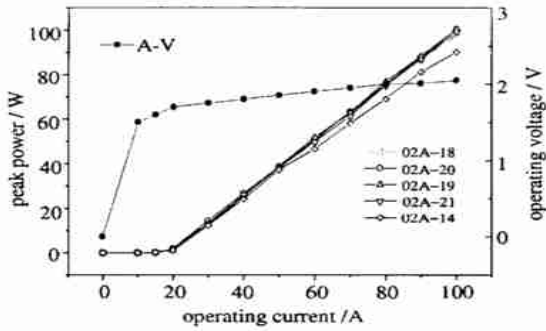


Fig. 5 $P-I-V$ curve of diode
图 5 激光二极管的 $P-I-V$ 曲线

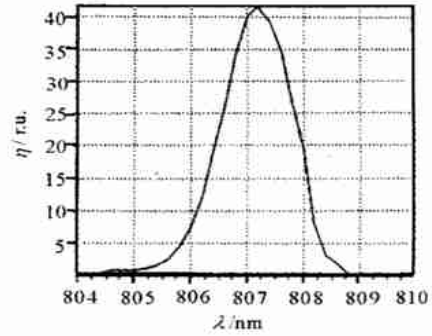


Fig. 6 Spectral curve of diode
图 6 激光二极管的光谱曲线

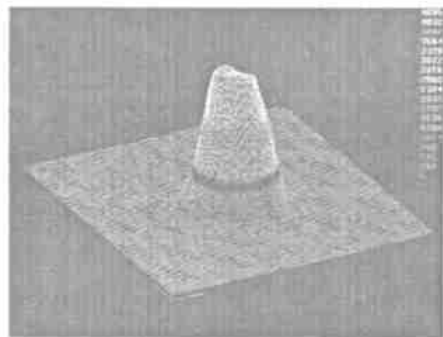
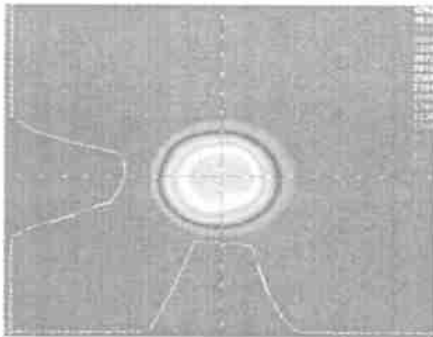


Fig. 7 Test result of gain distribution
图 7 激光模块增益分布的测试结果

复频率下该模块的单通退偏小于 1%,热焦距约为 530mm。

4 激光模块研制的最新进展

在高增益系数激光模块研究的基础上,进一步开展了高储能激光模块技术的研制,该模块采用 81 个激光二极管,每 9 个二极管组成一个线阵,对直径为 6mm 的 Nd:YAG 进行泵浦,平均泵浦功率约为 1 000W。研制中考虑到工程研制的可靠性及物理方案的可行性,采用了直接耦合的工作方式。通过改变二极管出光面距棒中心的距离,比较不同情况下棒的增益分布,采用光线追迹法优化出当二极管出光面距激光介质的中心 6mm 时,激光棒的增益分布最佳,增益分布数值模拟结果如图 8 所示。

针对二极管线阵的高热功率密度(约 $2.5\text{W}/\text{mm}^2$),考虑到尽可能降低激光模块的热阻,确保每一个冷却器能提供足够的散热面积和水流量,以满足 9 个激光二极管的排热需求,我们对冷却结构进行了精心设计,采用了微沟道式的冷却结构。实验中为确定其冷却能力,进行了单个二极管线阵出光实验,测得二极管线阵的光谱半宽约为 1.5nm,这说明微沟道式的冷却结构很好地实现了二极管线阵的散热。

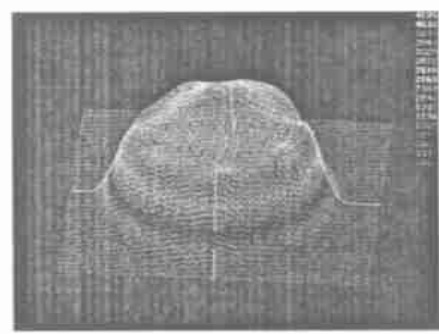
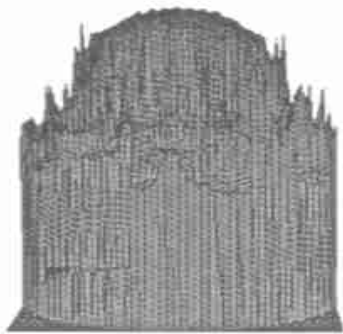


Fig. 8 Numerical result of gain distribution
图 8 增益分布数值模拟结果

Fig. 9 Measurement result of gain distribution
图 9 增益分布测试结果

加工装配好的高储能激光模块,其总体尺寸为 160mm × 110mm × 95mm。实验中测量了激光模块的增益

系数,结果显示,在 500Hz 重复频率下,当泵浦脉宽为 250 μ s 时,增益系数为 0.3cm⁻¹,由此可推算出激光介质的储能约为 400mJ。图 9 为激光模块增益分布的测试结果,从图中可看出,该模块增益分布较均匀,储能主要分布在直径为 4mm 的区域内。

参考文献:

- [1] Newman R. Excitation of the Nd³⁺ fluorescence in CaWO₄ by recombination radiation in GaAs[J]. *J Appl Phys*, 1963, **34**:437.
- [2] Keyes R J, Quist T M. Injection luminescent pumping of CaF₂:U³⁺ with GaAs diode lasers[J]. *J Appl Phys*, 1964, **4**:50.
- [3] Fields R A. Highly efficient diode-pumped Nd:crystal lasers[A]. In Tech Dig Conf Lasers Electro-opt, Opt Soc Amer[C]. Washington, DC, paper FL4, 1987.
- [4] Cross P S. Diode array pumps for solid-state lasers[A]. In Tech Dig Conf Lasers Electro-Opt, Opt Soc Amer[C]. Washington, DC, paper WS1, 1987.
- [5] Crow T G. Techniques for achieving high-power Q-switched operation in Nd:YAG[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1970, QE-18.
- [6] 卢亚雄. 激光束传输与变换技术[M]. 成都:电子科技大学出版社, 1999. (Lu Y X. Technology of laser beams transmission and conversion. Chengdu: Press of UESTC, 1999)

Study on the technique of high power diode-pumped Nd:YAG laser module

CAI Zhen^{1,2}, LI Wen-qiang¹, WU De-yong¹, PANG Yu¹, TANG Chun¹, ZHANG Kai¹

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1013, Mianyang 621900, China;

2. Graduate School of CAEP, P. O. Box 2101, Beijing 100088, China)

Abstract: This paper investigates, theoretically and experimentally, the elements which influence the gain distribution of laser medium. A high gain laser module and a high energy storage laser module have been manufactured. The experiment results approved that the high gain laser module was pumped uniformly and a TEM₀₀ output energy of 11.8mJ was achieved at a light-light efficiency of 15%. In the high energy storage laser module, a 6mm diameter Nd:YAG rod which is 100mm long was pumped by nine diode arrays (the peak pump-power is 6500kW). Numerical calculation was done to optimize the distance between diode and Nd:YAG. The experiment result approved that the gain coefficient of this module is 0.3/cm, and the storage power is 400mJ per pulse.

Key words: Laser diode; Laser module; Pumping; Gain distribution; Energy storage