

文章编号: 1001-4322(2005)S0-0079-04

12 kW 占空比为 15% 的二极管泵浦激光模块*

蔡 震^{1,2}, 吕文强¹, 魏 彬¹, 蒋建锋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: 开展了高储能、高占空比二极管泵浦激光模块的研究工作, 针对影响激光介质增益分布的相关因素进行了理论和实验研究, 研制出了高占空比、高储能二极管泵浦激光模块。该模块采用了 144 个激光二极管对直径为 $\phi 8$ mm 的 Nd:YAG 进行泵浦, 获得了均匀的增益分布和单脉冲能量 700 mJ 的储能。在该研究中, 数值模拟了激光介质的增益分布, 确定了激光模块的耦合结构, 针对二极管线阵的高功率排热需求, 研制了高效率微通道冷却结构, 并完成了激光模块内部结构的模块化设计和激光模块性能参数的测试。

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

二极管泵浦固体激光器(DPL)具有寿命长、热负载小、结构紧凑等特点^[1,2], 在工业加工、军事、通讯等领域都得到了广泛的应用。在高光束质量、高平均功率的 DPL 激光器的研究中, 目前普遍采用 MOPA 结构的光路布局——由谐振腔产生出低功率的单横模激光输出, 经多路放大后达到满足需求的功率水平, 而激光放大模块作为放大光路中的核心部件, 其增益分布特性将直接影响到光束放大过程中的波前变化, 因此如何在提高激光放大模块的储能的同时提高模块增益分布的均匀性, 从而减少光路放大过程的波前畸变, 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 激光模块耦合结构的确定

二极管泵浦激光模块中工作介质的常用几何结构为之字形板条结构和棒状结构, 从改善光束质量的角度上来看, 二者相比板条结构具有明显优势。这一点无论在理论还是在实验中都得到了证实。但考虑到板条结构加工难度较大, 镀膜要求高, 而棒状 Nd:YAG 因其结构径向对称, 易于实现泵浦耦合, 且由于通光面垂直于光轴, 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, 因此在本研究中考考虑采用棒状 Nd:YAG 作为激光工作物质。为了提高激光棒的储能密度, 激光模块采用了环形侧泵浦方式, 泵浦结构如图 1 所示, 利用 144 个激光二极管, 每 12 个二极管组成一个线阵对直径为 $\phi 8$ mm, 长度为 120 mm 的 Nd:YAG 棒进行泵浦, 布局中使二极管的慢轴与激光棒的光轴平行, 从提高激光模块可靠性的角度出发, 泵浦光采用了直接耦合的激励方式, 为了改善激光介质内部增益分布的均匀性和提高耦合效率, 在耦合结构中采用了漫反射腔。

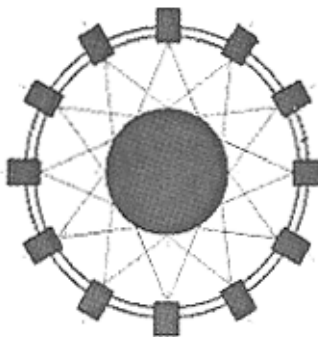


Fig. 1 Schematic diagram of pumping structure

图 1 泵浦耦合结构示意图

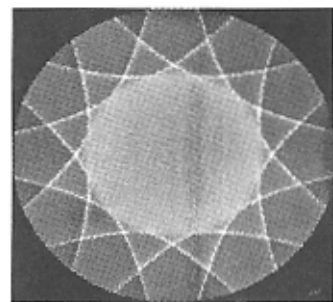


Fig. 2 Numerical calculation result of gain distribution

图 2 增益分布数值模拟结果

采用光线追迹法数值模拟了圆棒内的增益分布, 计算条件如下: 峰值泵浦功率为 12 kW, 占空比为 15%,

* 收稿日期: 2004-11-22; 修订日期: 2005-02-23

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器技术研究; 绵阳 919-1013 信箱。

泵浦光快轴方向的发散半角为 40° , 激光棒的直径为 $\phi 8$ mm, 有效泵浦长度为 120 mm, Nd:YAG 的掺杂浓度为 0.6%, 折射率为 1.84, 吸收系数为 0.2 cm^{-1} , 漫反射腔的反射率为 90%。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, 确定了最佳耦合距离, 增益分布数值模拟的结果如图 2 所示, 此时耦合系统的耦合效率约为 75%。

2 激光模块储能及小信号增益系数估算

被激光介质所吸收的泵浦能量并不能完全转化为激光介质的储能, 由于泵浦光谱与激光光谱存在差别(斯托克斯效率), 且荧光过程的量子效率小于 1, 因此约有 30% 的泵浦能量转化为热被损耗掉。另外当激光模块工作在调 Q 功率放大状态下时, 由于激光上能级寿命有限(约为 $230 \mu\text{s}$), 因此在未出光情况下, 激光上能级的粒子数会由于自发辐射跃迁而减少, 从而造成激光介质储能的减少, 当单脉冲泵浦持续时间为 $250 \mu\text{s}$ 时, 这种由能级寿命造成的能量损耗约占激光介质吸收能量的 40%。因此根据公式(1)可对激光模块的单脉冲储能作出估算。

$$E_s = P_p T \eta_c (1 - \eta_t - \eta_l) \quad (1)$$

式中: P_p 为放大模块的峰值泵浦功率; T 为单脉冲持续泵浦时间; η_c 为放大模块的耦合效率; η_t 为热损耗比例; η_l 为激光能级寿命损耗, 代入相关参数可估算出放大模块的单脉冲储能约为 670 mJ。根据放大模块的储能情况, 可进一步估算出放大模块的小信号增益系数为^[3]

$$g_0 = (E_s \sigma) / (h\nu V) = 0.18 \text{ cm}^{-1} \quad (2)$$

式中: σ 为 YAG 的受激辐射截面; V 为有效泵浦体积。

3 激光介质热应力估算

在泵浦过程中, 激光介质内部会产生温度梯度从而形成热应力, 当热应力大于激光介质的断裂极限时, 激光棒内部会产生应力裂纹甚至断裂从而造成激光器的破坏。激光棒所能承受的最大热应力与激光介质材料特性参数有关, 可以用材料的热冲击参量来描述, 热冲击参量与热功率的关系为^[4]

$$P_a = 8\pi LR \quad (3)$$

式中: P_a 为激光棒吸收的热功率(约为激光介质所吸收泵浦功率的 30%); L 为激光棒的有效泵浦长度; R 为 Nd:YAG 激光棒的热冲击参量(7.9 W/cm)。将相关参数代入公式(3)可知, 激光棒的最短有效泵浦长度为 27 mm。因此当有效泵浦长度为 120 mm 时, 激光棒所承受的最大表面应力约为断裂极限的 23%, 激光棒工作在远离断裂极限区域。

4 二极管线阵冷却结构设计

与灯泵固体激光器相比, 二极管泵浦固体激光器的一个主要优势在于能通过控制二极管的工作温度, 从而控制泵浦光的发射波长使之与工作介质的吸收峰相匹配, 进而提高激光系统的工作效率, 同时可以大大减少由于工作物质的热效应而带来的光学畸变。因此为了保证二极管能在正常温度下工作, 其冷却结构必须满足二极管的高热功率散热需求。为了保证二极管线阵的散热条件, 研究中对其换热条件进行了数值模拟(如图 3 所示), 确定了满足控温条件所需要的对流换热系数。并以此为根据对冷却结构进行了参数设计, 确定了散热面积和冷却水的温度、流量, 采用了微通道式的冷却方式。为了确定微通道式冷却结构的散热能力, 实验中对单个二极管线阵进行了出光实验, 在冷却水的温度 20°C , 冷却水流量 0.5 L/min 的工作条件下对激光二极管线阵的性能进行了测试, 图 4 为激光二极管线阵的光谱曲线, 从曲线图中可看出, 激光二极管线阵的光谱半宽较窄约为 1.8 nm , 这说明冷却器良好的满足了二极管线阵的散热要求。

5 激光模块设计

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、漫反射腔及激光二极管等零部件构成。机械结构如图 5 所示, 每一个激光二极管线阵分别安装在一个铜冷却器上, 12 个激光二极管线阵环绕激光棒均匀布置, 棒有效泵浦长度为 120 mm, 其泵浦面通水冷却, 冷却水路与二极管冷却水路串联。

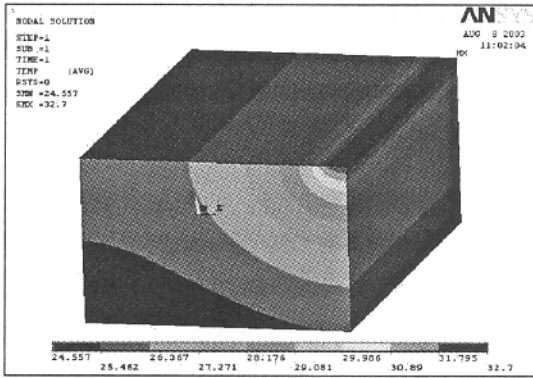


Fig. 3 Numerical simulation result of cooling process

图3 冷却过程数值模拟

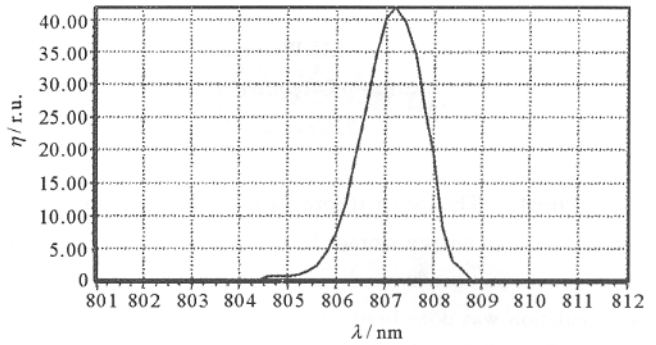


Fig. 4 Spectral curve of diode-array

图4 二极管阵列光谱曲线

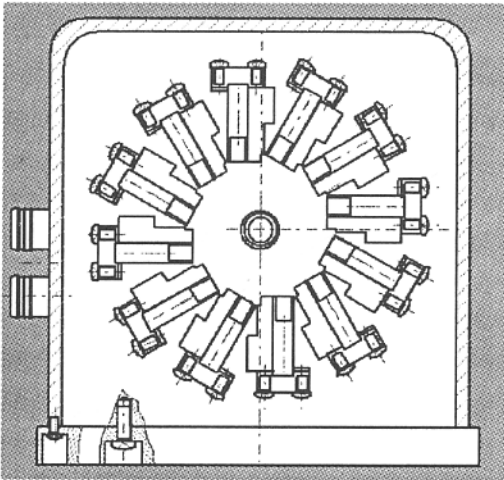


Fig. 5 Mount chart of laser module

图5 激光模块装配图

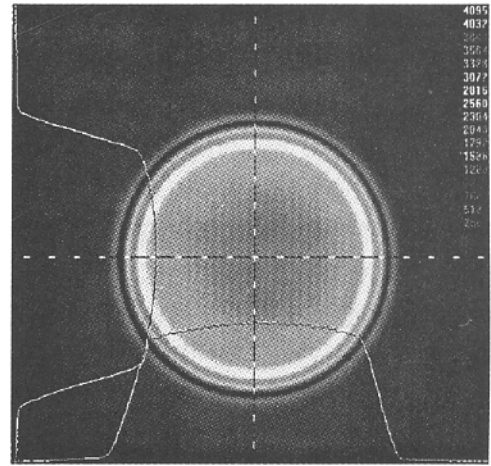


Fig. 6 Metrical result of gain distribution

图6 增益分布测试结果

6 激光模块性能测试

实验中我们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 250 μs 时,增益系数可达 0.186 cm^{-1} 。图 6 为激光模块增益分布的测试结果,从图中可看出,激光介质内部的增益分布非常均匀。根据激光棒增益系数的测试结果,对激光模块的储能情况进行了推算,根据公式(2)代入相关参数可推算出激光模块的单脉冲储能约为 700 mJ。

为了评价该激光模块的热效应状况,实验研究了模块的退偏效应及热聚焦效应。结果表明 500 Hz 重复频率下该模块的单通退偏小于 15%,热焦距约为 270 mm。

7 结论

本文开展了高储能、高占空比激光模块技术研究,数值模拟了激光介质的增益分布,研制出了 12 kW 占空比 15 的 % 二极管泵浦激光模块。实验结果表明,该模块泵浦均匀且增益较高,在尺寸为 $\phi 8 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 的工作介质中获得了 700 mJ 的单脉冲储能。

参考文献:

- [1] Newman R. Excitation of the Nd^{3+} fluorescence in CaWO_4 by recombination radiation in GaAs[J]. *J Appl Phys*, 1963, **34**:437.
- [2] Keyes R J, Quist T M. Injection luminescent pumping of $\text{CaF}_2:\text{U}^{3+}$ with GaAs diode lasers[J]. *Appl Phys*, 1964, **4**:50.
- [3] Crow T G. Techniques for achieving high-power Q-switched operation in Nd:YAG[J]. *IEEE J Quantum Electronics*, 1970, **18**:1215—1220.
- [4] Koehler W. Solid-state laser engineering(4th ed)[M]. Berlin:Springer-verlag, 1996.

12 kW 15% duty cycle diode pumped laser module

CAI Zhen^{1,2}, LÜ Wen-qiang¹, WEI Bin¹, JIANG Jian-feng¹, 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 theoretically and experimentally investigated the elements which influence the gain distribution of laser medium. A high energy storage laser module was manufactured. In this module an 8 mm diameter Nd:YAG rod which was 120 mm long was pumped by twelve diodes-arrays (the peak pump-power was 12 kW). Each array consisted of twelve diodes. Numerical calculation was done to optimize the coupling structure. In order to satisfy the condition of reducing heat, a microchannel cooling structure was adopted. The experiment result shows that the gain coefficient of this module is 0.186/cm and the storage power is about 700 mJ per pulse.

Key words: Diode laser; Laser module; Pump; Gain distribution; Energy storage