

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0055-03

二极管横向抽运 Nd:YAG 大功率 1.319 μm 单模激光器

孙晓洁, 于颖璞, 裴博

(镭宝光电技术有限公司, 北京 100015)

摘要 对二极管横向抽运 1.319 μm 大功率 Nd:YAG 激光器进行实验研究。采用横向抽运方式(CEO 公司 RD module), 以 $\phi 4 \times 115$ (单位 mm) Nd:YAG 晶体为激光工作物质, 通过谐振腔设计和小孔光阑相结合的手段抑制高阶模的振荡, 选取单横模, 并且达到补偿晶体的较大热效应、提高单模的模式竞争能力的目的。在抽运光功率为 343 W 的条件下, 得到功率大于 6 W 的 TEM₀₀ 模 1.319 μm 连续激光输出, 光束质量因子 $M^2 < 2$, 激光功率不稳定性低于 2%, 最大光-光转换效率约为 1.74%。

关键词 全固态激光器; 二极管抽运; TEM₀₀ 模

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

High Power Diode-Pumped Nd:YAG 1.319 μm TEM₀₀ Laser

SUN Xiao-jie, YU Ying-pu, PEI Bo

(LABest Optronics Co., Ltd, Beijing 100015, China)

Abstract A diode-pumped Nd:YAG 1.319 μm TEM₀₀ laser with high power is presented. Through optimizing the stable resonator and inserting a diaphragm to get large fundamental mode volume and reduce the rod thermal lensing, when pumping power is 343 W, an output of 6 W TEM₀₀ 1.319 μm laser with an optical-to-optical efficiency of 1.74% and beam quality $M^2 < 2$ has been demonstrated.

Key words all-solid-state laser; diode-pumped; TEM₀₀

1 引言

光近年来, 1.3 μm 波长激光在光通信、医疗及科学研究等领域获得了广泛应用。以 Nd:YAG 为工作物质的固体激光器是实现 1.3 μm 激光输出的一种简便而有效的手段, 它已经被越来越多的激光应用所重视^[1-3]。但是由于 Nd:YAG 晶体的 1.319 μm 谱线的增益远低于 1.064 μm 谱线的增益, 因此, 在设计 1.319 μm 激光器时, 不但要有效抑制 1.064 μm 激光的振荡, 还要处理更严重的热效应的影响。另外, 大部分用户都对激光横模有较为苛刻的要求, 因此, 要通过 Nd:YAG 获得高光束质量的 1.3 μm 激光输出意味着更多更细致的工作。本文采用激光二极管横向激励方式, 通过特殊的谐振腔设计, 对 Nd:YAG 1.319 μm 激光特性进行了较为深入的研究, 获得了大于 6 W 的 TEM₀₀ 模连续激光输出。

2 二极管横向抽运 1.319 μm 激光器的原理

Nd:YAG(掺钕钇铝石榴石)晶体是目前最常用的一种固体激光工作物质, 它具有非常优越的光谱和激光特性, 属于四能级系统。Nd:YAG 在 300 K 温度时 0.3-0.9 μm 范围中的吸收谱如图 1^[4], 共有 5 条主要的吸收带。在主要的吸收带中, 0.75 μm 带和 0.81 μm 带较强。

室温下, 从 Nd:YAG 晶体的荧光特性谱线中可以看出, 它有三条明显的荧光谱线, 其中心波长和对应的能级跃迁为: 0.946 μm ($^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{3/2}$), 1.06 μm ($^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$), 1.319 μm ($^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$)。 $^4F_{3/2}$ 向 $^4I_{9/2}$ 跃迁属三能级系统, 阈值高, 只有在低温下才能实现激光振荡。 $^4F_{3/2}$ 向 $^4I_{11/2}$ 和 $^4I_{13/2}$ 跃迁为四能级系统, 阈值低, 易实现激光振荡。1.064 μm 谱线的受激发射截面为 $4.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, 而 1.319 μm 谱线的受激发射截

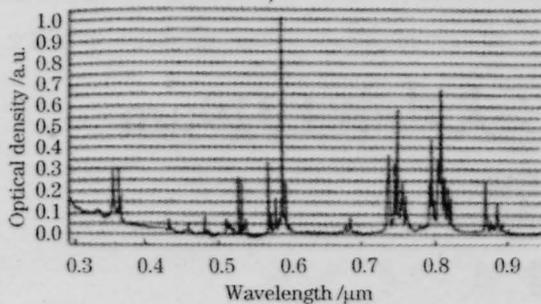


图1 Nd:YAG在300 K温度时的吸收光谱

Fig.1 Absorption spectrum of Nd:YAG at 300 K

面为 $(0.8 \pm 0.2) \times 10^{-10} \text{cm}^2$, 约为 $1.064 \mu\text{m}$ 谱线发射截面的 20%^[6]。若不采取相应的抑制手段, $1.064 \mu\text{m}$ 的谱线势必在竞争中占据优势地位, 因此, 为了获得 $1.319 \mu\text{m}$ 激光振荡, 必须采取有效的选频措施, 抑制从 $1.020 \mu\text{m}$ 到 $1.150 \mu\text{m}$ 范围内的激光形成振荡, 才能实现在 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 跃迁中具有最大受激辐射截面的 $1.319 \mu\text{m}$ 的激光振荡。

实验中采用了 CEO 公司 RD 型号模块, 其剖

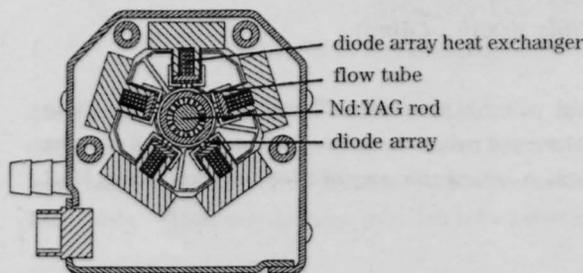


图2 二极管模块的剖面图

Fig.2 Sectional drawing of the module

面如图2。从其剖面图中可以看出, 模块内部采用了五维环绕抽运结构。使用五个连续的 LD bar 作为抽运源, 单 bar 的最大输出功率为 20 W, 输出波长为 808nm , 线宽大约为 4nm , 其中每六个 bar 线行排列, 装在一个热沉上, 组成一个模块。五个这样的模块从侧面五向呈 72° 对准晶体棒的中心, 进行抽运。这种结构可使工作物质内的增益分布更为均匀, 这对于提高输出激光的光束质量非常有利。

3 实验

3.1 激光器的构成

二极管横向抽运 Nd:YAG $1.319 \mu\text{m}$ 激光器的光路设计如图3所示。

我们选用的模块是 CEO 公司 RD 型号的二极管模块, 模块是五维抽运结构, 最大抽运功率为 600 W。激光工作物质为 Nd:YAG 晶体, 尺寸为 $\phi 4 \times 115$ (单位 mm)。在晶体的两个表面镀有对

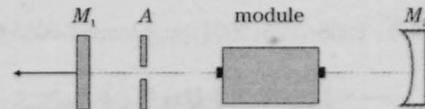


图3 激光器结构图

Fig.3 Layout of the laser

$1.064 \mu\text{m}$ 激光和 $1.319 \mu\text{m}$ 激光的双减反膜。 M_1 镜片与 M_2 镜片构成一个光学谐振腔, 其中 M_1 为输出镜, M_2 为全反镜。 M_1, M_2 镜片在 $0.900 \mu\text{m}$ 到 $1.250 \mu\text{m}$ 的波长范围均具有大于 90% 的透过率, 在 $1.328 \mu\text{m}$ 到 $1.450 \mu\text{m}$ 的波长范围内均具有大于 70% 的透过率。 M_2 镜片具有对 $1.319 \mu\text{m}$ 波长激光大于 99.5% 的反射率。图3中的 A 为小孔光阑, 作用是抑制高阶模振荡, 选 TEM_{00} 模。

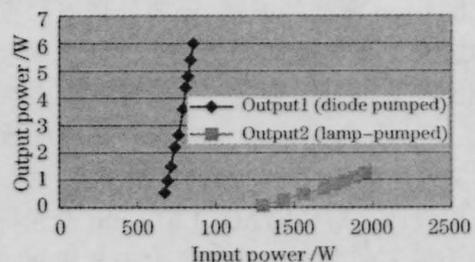
作为对比, 我们在谐振腔形式不变的情况下做了灯抽运的实验研究。聚光腔为单椭圆镀银镜面反射方式, 氦灯放电部分尺寸为 $\phi 4 \text{mm} \times 100 \text{mm}$ 。

3.2 实验结果及讨论

实验中, 由于半导体激光器的输出波长随着温度的升高将出现频移, 所以我们通过控制冷却水的温度, 使其输出波长中心与 Nd:YAG 晶体的最强吸收峰 808nm 相匹配。我们对二极管模块的运转性能做了测试, 测出了冷却水的最佳温度在 26.0°C , 冷却水的控温精度可以达到 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

实验中采用了光栅单色仪(WDG30)对输出激光波长进行测定。在全部的光谱范围内, 只观察到 $1.319 \mu\text{m}$ 的谱线, 在 $0.900 \mu\text{m}$ 到 $1.444 \mu\text{m}$ 的光谱范围内(Nd:YAG 晶体的主要荧光谱线范围)没有观察到其他波长的激光输出, 由此可以确定, 输出激光的波长为 $1.319 \mu\text{m}$ 。

图4为 TEM_{00} 模 $1.319 \mu\text{m}$ 激光输出功率特性曲线。其中, 曲线1为二极管抽运激光器的功率特性曲线, 曲线2为在谐振腔条件不变的情况下闪光灯抽运的激光器的功率特性曲线。二极管抽运的激光器的斜效率为 3%, 在注入电功率 858 W 时获得最大输出功率为 6W, 此时点效率为 0.7%。闪光灯抽

图4 TEM_{00} 模 $1.319 \mu\text{m}$ 激光输出功率特性曲线Fig.4 Output power of TEM_{00} $1.319 \mu\text{m}$ at different input power

运的激光器的斜效率为 0.19%, 在注入电功率 1950W 时获得最大输出功率为 1.2 W, 点效率为 0.07%。当继续增大注入时, 激光模式已退变为高阶模。由该曲线明显看出: 二极管抽运 Nd:YAG 激光器的 1.319 μm 激光在功率特性和光束质量方面要明显优于闪光灯抽运的 Nd:YAG 激光器。

图 5 是二极管抽运激光器的抽运光 (二极管 808 nm 激光) 与输出 1.319 μm 激光的转换效率曲线。最大光-光转换效率约为 1.74%, 此时输出的 1.319 μm TEM₀₀ 模激光功率为 6 W, 抽运的 808 nm 光功率为 343W。

为比较在相同实验条件下 Nd:YAG 晶体的

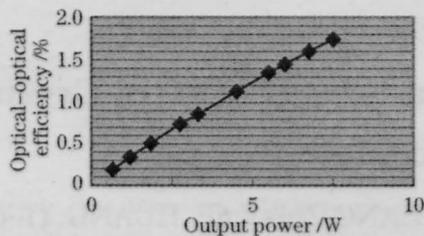


图 5 抽运光与输出光的转换效率图

Fig.5 Optical-to-optical efficiency

1.064 μm 谱线与 1.319 μm 谱线的增益情况, 在得到了 1.319 μm 波长激光的实验数据后, 将实验用的 Nd:YAG 晶体端面重新镀膜, 优化了输出耦合度, 得到了 1.064 μm 波长单模激光的实验数据。图 6 的两条曲线分别表示冷却水温度在 26 $^{\circ}\text{C}$ 时 1.064 μm 激光与 1.319 μm 激光的输入电功率与输出功率的关系, 其中曲线 1 为输出功率曲线, 曲线 2 为 1.319 μm 1.064 μm 输出功率曲线。由该图可见 1.319 μm 的激光效率约为 1.064 μm 激光的 30%。

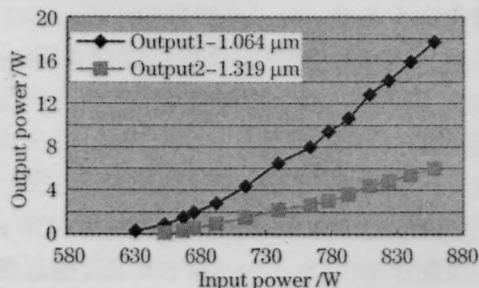


图 6 输入电功率与输出功率的转换效率图

Fig.6 Output power of 1.064 μm and 1.319 μm at different input power

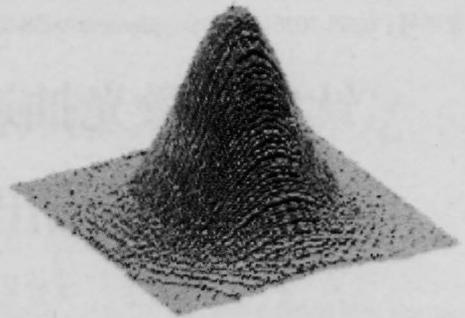


图 7 输出功率为 6 W 时的三维空间分布图

Fig.7 3D distribution at output 6 W

在实验中, 对输出激光模式的检测采用 Coherent 公司的 Laser Cam 3D 型光束质量分析仪。光束质量分析仪与计算机连接, 输出激光经过衰减后, 再经聚焦入射到光束质量分析仪的窗口中。通过计算机内的专业分析软件对采集到的信号进行分析, 得到激光的三维空间分布图。在输出光功率为 6 W 时得到的三维空间分布图如图 7 所示。由该图可见, 输出光束为一个极好的高斯分布, 模式为 TEM₀₀ 模。

在输出 1.319 μm 单模激光 6 W 时, 用 EPM1000 型功率计对其输出稳定性进行测定。在激光连续输出的四个小时时间里, 冷却水的水温恒定在 26.0 $^{\circ}\text{C}$, 激光电源的电压值(55 V)与电流值(15.6 A)均不变, 每隔五分钟记录输出激光的功率值。对所记录的 48 个数进行均方根差的计算, 得到输出激光的不稳定性约为 1.67%。

参 考 文 献

- 1 R. G. Smith. New room temperature CW laser transitions in YAlG:Nd [J]. *IEEE J. Quantum Electron.* (Corresp.), 1968, **QE-4** (8):505-506
- 2 Jack Marling. 1.05-1.44 μm tenability and performance of the CW Nd³⁺:YAG laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1978, **QE-14**:56-62
- 3 R. W. Wallace, S.E.Harris, Oscillation and doubling of the 0.946 μm line in Nd³⁺:YAG[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1969, **15**:111-112
- 4 Walter Koechner. *Solid-State Laser Engineering*
- 5 Lu Junhua, Lu Jianren, Tomoyo Murai et al.. 36-W diode-pumped continuous-wave 1319-nm Nd:YAG ceramic laser [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(13):1120-1122