

文章编号: 0258-7025(2003)07-0577-04

侧面抽运 Nd:YAG 连续激光器

刘媛媛, 方高瞻, 刘 斌, 王晓薇, 马骁宇, 肖建伟

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要 介绍了一种二极管侧面抽运的 Nd:YAG 连续激光器, 获得了 37.9 W 的连续 1064 nm 的激光输出, 光-光转换效率为 23.7%。用光线追迹法对实验中的具体参数进行了数值模拟, 指出了实验中的不足之处, 对侧面抽运结构的设计作了分析讨论。

关键词 激光技术; Nd:YAG 连续激光器; 侧面抽运; 聚焦柱透镜; 抽运腔; 光线追迹

中图分类号 TN 248.1+3 **文献标识码** A

Laser Diode Side-pumped CW Nd:YAG Lasers

LIU Yuan-yuan, FANG Gao-zhan, LIU Bin,

WANG Xiao-wei, MA Xiao-yu, XIAO Jian-wei

(Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100083, China)

Abstract This paper introduces a LD side-pumped CW Nd:YAG laser with the output of 37.9 W in 1064 nm and the optical efficiency of 23.7%. The pumped system is analyzed by ray tracing. The disadvantage of experimental pump structure and the side-pumped laser design are discussed.

Key words laser technique; CW Nd:YAG laser; side-pumped; focal lens; pump cavity; ray tracing

1 引 言

20 世纪 90 年代以来, 随着大功率半导体激光器(LD)的制作工艺进一步成熟, 大功率半导体抽运的固体激光器得到了蓬勃的发展。与传统的灯抽运固体激光器相比, 二极管抽运的固体激光器的体积减小, 重量减轻, 寿命也从原来的 500 h 增加到 10, 000 h, 总体效率由原来的 3% 提高到 10% 以上^[1], 再加上半导体激光器的价格逐年下降, 用半导体激光器抽运的固体激光器代替灯抽运的固体激光器已经成了一种必然的趋势。

目前, 国内外对二极管抽运头的设计多种多样^[2~4], 对于圆柱状的激光晶体来说, 国内主要采用在晶体冷却管外表面镀增透膜、全反膜来提高抽运效率^[5]。本文设计了一种简单的抽运头结构, 用 9 个最大输出功率为 20 W 的连续半导体阵列激光器作为抽运源, 在输入抽运功率为 180 W 时, 得到了

37.9 W 的基频光输出, 光-光转换效率为 23.7%。

2 激光头装置及输入-输出性能

使用 9 个发光面积为 $1 \mu\text{m} \times 10 \text{ mm}$ 的连续 LD bar 作为抽运源, 单 bar 的最大输出功率为 20 W, 输出波长为 808 nm, 线宽大约为 4 nm, 其中三个 bar 线形排列, 装在同一个热沉上, 组成一个模块。Bar 和 bar 之间的间隔为 0.5 mm, 总的发光区域面积为 $34 \text{ mm} \times 1 \mu\text{m}$ 。三个这样的模块从侧面三向呈 120° 对准晶体棒的中心, 进行抽运。半导体激光器采用集体制冷, 产生的热量靠热沉中流动的去离子水迅速带走。由于半导体激光器的输出波长随着温度的升高将出现红移, 所以通过控制去离子水的温度, 使其输出波长中心与 Nd:YAG 晶体的最强吸收峰 808 nm 相匹配, 控温精度可达 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。增益介质的尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 56 \text{ mm}$, 掺杂浓度为 1.0 at.-%,

收稿日期: 2002-04-09; 收到修改稿日期: 2002-05-24

作者简介: 刘媛媛(1976—), 女, 山西人, 博士, 目前从事大功率 LD 抽运固体激光器方面的研究。E-mail: liuyy@red.semi.ac.cn

晶体两端面镀有 1064 nm 的增透膜。晶体棒装在一个内径为 4.6 mm 的玻璃管中,靠玻璃管中流动着的去离子水进行冷却。由于晶体棒和玻璃管两端需要机械固定,所以,晶体棒得到抽运的有效长度为 34 mm。抽运头的横截面如图 1 所示。由于晶体的横向尺寸比较小,抽运光单程通过晶体,不能被完全吸收。为了有效地利用抽运功率,在玻璃管的外部安装了一个铜管,将铜管的内表面作为反射面,构成了一个抽运腔,使得抽运光在晶体中可以得到二次吸收。此外,由于实验中使用的 LD bars 的发散角很大,以半高全宽计算,垂直于半导体结面方向的快轴发射角与平行于半导体结面方向的慢轴发散角分别为 40°和 10°。为了使大部分抽运光能量最终入射到晶体,选取三根直径为 2.2 mm 的石英玻璃棒作为聚焦柱透镜来压缩快轴方向发散的抽运光,提高抽运效率。聚焦柱透镜与二极管线阵的发光区的距离控制在 0.4 mm,耦合效率可以达到 89%。

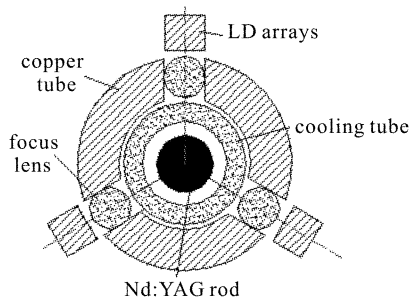


图1 二极管激光抽运头的横截面示意图

Fig. 1 Sketch map of diode-laser-pumped head

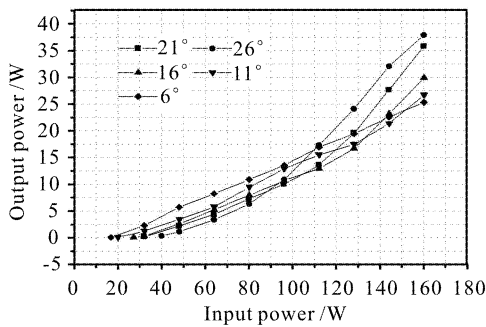


图2 不同温度下激光抽运头的输入-输出性能

Fig. 2 Output-input power in different temperature of cooling water

采用直线型平-平腔结构,腔长为 310 mm,输出耦合镜的透过率为 7%,由于半导体激光器对温度的改变很敏感,所以首先在不同的冷却水温度下,对激光抽运头的输入-输出性能进行了测试。如图 2 所示,随着温度的升高,激光头的斜效率和最大输出

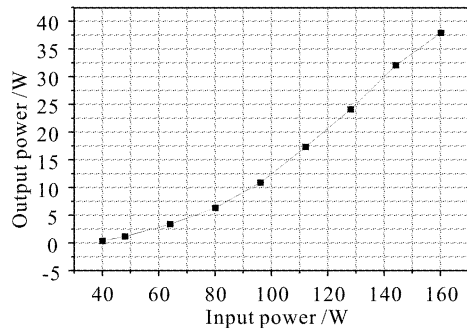


图3 温度为 26°C 时激光抽运头的输出性能

Fig. 3 Optical output power from the CW diode-laser-pumped Nd:YAG laser

功率也在升高,冷却水的温度从 6°C 升高到 26°C 的过程中,最大输出功率从 25 W 升高到了 37.9 W,所以,温度的控制对 LD 抽运固体激光器的功率输出的影响是很大的。为了得到稳定的激光功率输出,将半导体列阵模块的温度统一控制在 26°C ± 1°C,再对抽运头的输入-输出性能进行了测试,如图 3 所示。在输入抽运功率为 180 W 时,透过聚焦柱透镜的抽运光为 160 W,输出 37.9 W 的基频光,激光输出比较稳定,最大输出功率波动小于 ±2 W,即约 ±5%,光-光转换效率为 23.7%,对于 LD 抽运的固体激光器来说,光-光转换效率还有待进一步提高。

3 光线追迹模拟

3.1 光线追迹

实验中获得的光-光转换效率,对于 LD 抽运的固体激光器来说,并不理想,与国际水平还有一定的差距。为了改进抽运头的结构,获得更高的光-光转换效率,从分析光线的传输过程以及它在激光晶体中的分布是否均匀着手,采用传统的光线追迹法,对不同的抽运结构进行了数值模拟。在模拟过程中,考虑了在一个方向上,光线如何透过聚焦柱透镜、冷却管、去离子水、然后到达晶体,在晶体中又是如何分布的。在侧面抽运系统中,由于抽运源、冷却管、去离子水以及晶体之间的距离靠得很近,尤其是 LD 与聚焦柱透镜之间的距离大约与聚焦柱透镜的半径相当,所以,近轴单色光线的成像规律将不再适用。我们利用光学系统中非傍轴光线的平移和折射矩阵^[6,7],并在这两个矩阵的基础上,对侧面抽运结构进行光线追迹。图 4 为利用实验中所采取的参数进行光线追迹模拟的结果。所用的参数分别是:晶

体棒的半径 $R = 1.5 \text{ mm}$, 聚焦柱透镜的半径 $r = 1.1 \text{ mm}$, 冷却管的内径 $R_1 = 2.3 \text{ mm}$, 外径 $R_2 = 3.5 \text{ mm}$, LD 与聚焦柱透镜的距离 $d_1 = 0.4 \text{ mm}$, 聚焦柱透镜与冷却管外壁的距离 $d_2 = 1 \text{ mm}$ 。由于聚焦柱透镜及冷却管采用的材料均为石英, 所以折射率 $n_1 = 1.53$, 去离子水的折射率 $n_2 = 1.33$, 晶体的折射率 $n_3 = 1.82$, LD 的快轴发散角为 40° 。由图 4 可看出, LD 发出的光经过聚焦柱透镜以后, 变为近似平行光, 而由于冷却管和晶体的会聚作用远远大于去离子水的发散作用, 所以使得光线在晶体中的分布区域较小。抽运光在晶体中的这种分布, 对于提高抽运效率, 获得好的光束质量都是极为不利的。

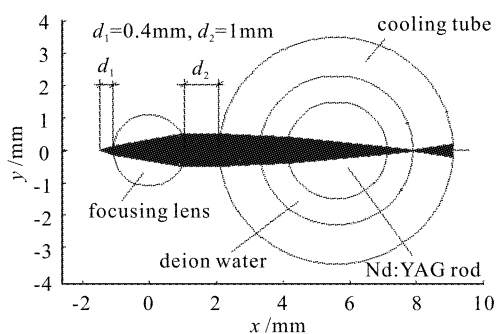


图 4 对实验中的激光抽运头进行光线追迹模拟的结果
Fig. 4 Result of numerical simulation using the method of ray tracing with the experimental parameters

3.2 有聚焦柱透镜情况下的光线追迹

为了获得更高的抽运效率和光-光转换效率, 在给定聚焦柱透镜、冷却管及晶体的前提下, 通过改变图 4 中 d_1, d_2 , 进行了大量的光线追迹模拟, 最终发现, 抽运光线经过聚焦柱透镜后, 会出现三种情况: 1) 光线的发散角被压缩, 但仍为发散光; 2) 光线的发散角被压缩到近似为零, 也就是说, 抽运光线经过柱透镜后, 近似平行射出; 3) 光线真正被压缩, 而且在光线传输方向会有一个束腰最小的位置, 也就是明晰圆所处的位置。这主要是由于非傍轴光线经过透镜后, 会产生一定的球差, 使得一个点物发出的光线经过透镜后, 不会会聚为一点, 而且离轴越远的光线会聚的焦点离透镜越近而造成的。无论聚焦柱透镜的半径如何, 这三种情况是普遍存在的, 而且是随着距离 d_1 逐渐增大而依次出现的现象。其中, 第二种情况便是图 4 体现的情况。在这种情况下, 设计出来的抽运头带来的缺点是抽运光在晶体中的分布不均匀, 而且这种不均匀的分布, 不会随着距离 d_2 的变化而变化, 从而导致抽运头的总体效率不会太高。正如实验中所看到的一样。

另外两种情况如图 5(a), (b) 所示。图 5(a) 为第一种情况下, 通过光线追迹模拟得到较为理想的结果。所谓理想, 主要是指抽运光在晶体中分布的区域较大。由图 5(a) 可知发散光经过一定距离的发散之后, 依次入射到冷却管、去离子水和晶体中。

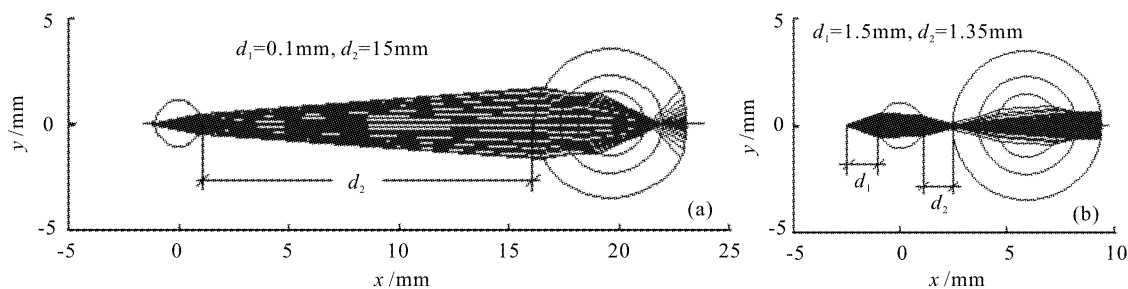


图 5 第一种(a)和第三种(b)情况下光线追迹的结果

Fig. 5 In first condition (a), and in third condition (b), the results of ray tracing calculation

由图中可以看到, 只要 d_2 选择合适, 从任一方向来的抽运光将覆盖整个晶体的大部分区域, 以至于三个方向都有 LD 抽运时晶体中的抽运光都会均匀分布, 而且中心强度最大, 这对于提高抽运效率, 改善激光光束质量是很重要的。第三种情况下, 最佳的光线追迹模拟结果如图 5(b) 所示, 光线透过聚焦透镜后, 真正会聚, 而且在距透镜中心大约 1.35 mm 处, 光束束腰最小, 然后又开始更大的发散, 再经过

冷却管中的会聚, 去离子水中的发散, 最终入射到晶体中。由于光线经过会聚后, 第二次发散的角度较大, 所以最终抽运光在晶体中分布的区域也相应增大。由图还可以看出, 若是三个方向同时抽运, 晶体中抽运光的分布也会变得均匀。而且, 在这种情况下, 由于有最小束腰位置的存在, 可以在冷却管外围设计抽运腔, 将透光窗口开在束腰位置处, 其余部分全为抽运光的反射面, 这样可以将抽运光最大可能

地限制在抽运腔内,使晶体对抽运光进行二次吸收,进一步提高抽运效率。

以上的数值模拟结果表明,第一、三种情况下,晶体中抽运光的分布要比第二种情况下抽运光的分布理想,尤其是在第三种情况下,更有可能获得较高的抽运效率及光-光转换效率。

3.3 直接抽运情况下的光线追迹

由前面带聚焦柱透镜的光线追迹模拟可以看出,抽运光在晶体中的均匀分布要依赖于 d_1, d_2 之间的相互配合,这必然会使具体的机械结构比较复杂,而且柱透镜的引入也必将会带来一定的损耗。最简单、最省力的方法就是对晶体直接进行抽运。图 6 是采用实验中的参数对直接抽运情况用光线追迹法做的数值模拟。由图中可以看到,当 LD 与冷却管之间的距离靠得非常近时,抽运光在晶体中的分布非常理想,但是,随着 LD 与冷却管之间的距离逐渐增加,LD 发出的边缘光线将越来越多地不会

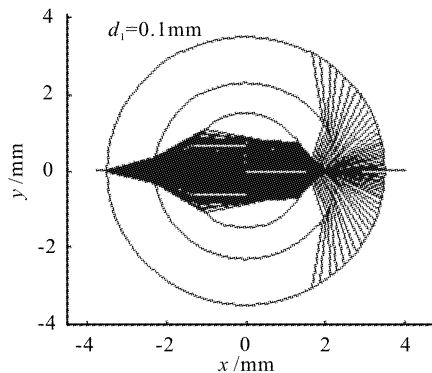


图 6 直接抽运下的光线追迹结果

Fig. 6 In directly pumped condition, the result of ray tracing calculation

进入晶体。所以,在直接抽运的情况下,要得到最佳的抽运效率,LD 的位置应尽可能地靠近冷却管。

4 结 论

用三个 LD 列阵模块,从呈 120° 的三个方向对 Nd:YAG 晶体进行抽运,获得了 37.9 W 的基频光输出,光-光转换效率为 23.7%。然后,用光线追迹法对抽运结构进行了数值模拟,并对模拟结果进行了分析、讨论。最后,对直接抽运结构进行了光线追迹模拟,指出了这种结构与带有聚焦柱透镜的结构相比所具有的优缺点。

参 考 文 献

- 1 H. Weber. Diode pumped solid state lasers; from 10 W to 10 kW [C]. *SPIE*, 1999, **3862**:2~10
- 2 W. F. Krupke. Advanced diode pumped solid state lasers (DPSSLs): near term trends and future prospects [C]. *SPIE*, 2000, **3889**:21~32
- 3 D. Golla, S. Knoke, W. Schöne *et al.*. 300-W CW diode-laser side-pumped Nd:YAG rod laser [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(10):1148~1150
- 4 Y. Hirano, Y. Koyatam, S. Yamamoto *et al.*. 208-W TEM₀₀ operation of a diode-pumped Nd:YAG rod laser [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(10):679~681
- 5 Wang Jian-jun, Jiang Dong-sheng, Zhao Hong *et al.*. Research on diode side-pumped TEM₀₀-mode lasers [J]. *Laser & Infrared (激光与红外)*, 2000, **30**(5):286~288 (in Chinese)
- 6 Wang Shi-fan, Zhu Zi-qiang. Theory of Modern Optics [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 2000. 3~44 (in Chinese)
- 7 Hua Tan, Weiling Huang, Zhuoyou Zhou *et al.*. Nd:YAG laser side-pumped by diode laser arrays [C]. *SPIE*, 1999, **3862**:223~226