

文章编号: 0258-7025(2004)08-0907-04

抽运腔在 LD 侧面抽运激光头中的应用

刘媛媛, 方高瞻, 马骁宇, 肖建伟
(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要 介绍了抽运腔在半导体侧面抽运固体激光头中的应用。运用光线追迹的方法, 从理论上分析了抽运腔对抽运光在晶体中的吸收效率和相对强度分布的影响, 然后对无抽运腔、有抽运腔、抽运腔内表面经过镀金处理、抽运腔内表面经过抛光和镀金处理四种情况进行了实验研究。从理论模拟和实验结果中可以看出, 抽运腔及其内表面的处理质量对激光头输入输出性能有很大的影响。

关键词 激光技术; 侧面抽运; 抽运腔; 光线追迹

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Application of Pump Cavity in LD Side-Pumped Laser Head

LIU Yuan-yuan, FANG Gao-zhan, MA Xiao-yu, XIAO Jian-wei

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

Abstract The application of pump cavity in laser diode (LD) side-pumped laser head is introduced. By using ray tracing calculation, the effects of the pump cavity on the absorption efficiency and the intensity distribution of the pump light in the crystal were analyzed. The experiments were carried out respectively under the conditions of with and without pump cavity, with gold-plating pump cavity and with polished gold-plating pump cavity. The result showed that a gold-plating pump cavity greatly improved the output character of the pump head.

Key words laser technique; side-pumped; pump cavity; ray tracing

1 引 言

进入 20 世纪 90 年代以来, 随着二极管激光器 (LD), 尤其是大功率二极管激光器及其列阵的研究工作的飞速发展, 以及固体激光器在医疗、国防、机械加工等各个领域内的应用与日俱增, 大功率半导体抽运的固体激光器 (DPSSL) 引起了人们越来越多的关注^[1~4]。众所周知, 在闪光灯抽运的固体激光器中, 激光抽运腔设计的好坏对激光器的性能有着重要的影响。而在半导体抽运的固体激光器中, 由于半导体激光器的空间特性较好, 所以一般不采用抽运腔, 而是直接将其对准激光工作物质进行激励。本文用光线追迹的方法, 分析了在侧面抽运激光头中, 抽运腔对抽运光在晶体中的吸收效率和相对强度分布的影响。实验证明, 抽运腔的镀金对激光头输入输出性能有极大的改善作用。

2 光线追迹模拟

在讨论半导体激光器发出的抽运光与晶体相耦合的过程中, 传统的方法有两种, 一种是光线追迹^[5~7], 一种是概率理论的蒙特卡罗算法。本文选用光线追迹法, 利用非傍轴光线的矩阵运算方法并用计算机进行追迹大量的实际光线, 最终可以计算出晶体对抽运光的吸收效率以及抽运光在晶体中的相对强度分布情况^[6]。图 1 描述的是理论模拟中使用的模型, 其中 D_0 为晶体的半径, 反射腔面与晶体是共心的, d_f 表示抽运反射腔的顶点与晶体中心之间的距离, 也可以看成是反射腔面的半径, d 表示抽运光源与晶体表面之间的距离。需要指出的是, 在数值模拟过程中, 忽略了晶体侧表面粗糙所带来的散射损耗。

表 1 列出了当晶体的直径为 3 mm, d 和 d_f 取

收稿日期: 2003-03-21; 收到修改稿日期: 2003-06-27

作者简介: 刘媛媛 (1976—), 女, 山西临县人, 中国科学院半导体研究所工程中心博士研究生, 主要从事大功率半导体抽运的固体激光器的研究。E-mail: liuyy@red.semi.ac.cn

表 1 抽运光经过 n 次反射后,晶体吸收效率的变化Table 1 Absorption efficiency in crystal when pump light has been reflected for n times

n	1	2	3	4	5	6	7	8
$d=0.1\text{ mm}; d_f=1.6\text{ mm}$	63.02	76.88	79.49	79.97	80.06	80.08	80.08	80.08
$d=1\text{ mm}; d_f=2.5\text{ mm}$	60.42	75.02	78.56	79.39	79.58	79.62	79.63	79.63
$d=1.5\text{ mm}; d_f=3\text{ mm}$	57.56	71.32	74.63	75.43	75.62	75.67	75.68	75.68
$d=2\text{ mm}; d_f=3.5\text{ mm}$	54.18	66.98	70.00	70.71	70.88	70.92	70.93	70.93
$d=3.5\text{ mm}; d_f=5\text{ mm}$	44.15	53.86	55.84	56.24	56.32	56.34	56.34	56.34

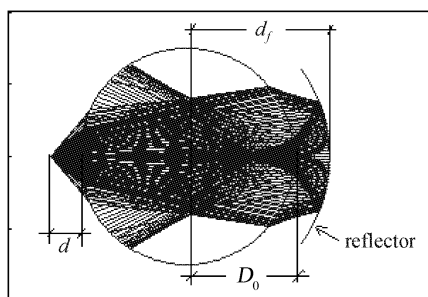


图 1 考虑抽运腔时,单侧面抽运的理论模型
Fig. 1 Model of single side pumped laser head with pumped cavity around the crystal rod

不同值时,晶体的吸收效率与抽运光在晶体中经过的次数 n 之间的关系。从表中可以看出,反射腔所起的作用是很大的,比如,当晶体与抽运源之间的距离 d 等于 0.1 mm ,反射腔的半径为 1.6 mm 时,抽运光第一次通过晶体后,晶体的吸收效率为 63.02% ,而第二次通过晶体后,吸收效率增加到了 76.88% ,当第三次通过晶体后,吸收效率增加到了 79.49% ,经过六次反射以后,达到最大的吸收效率为 80.08% 。也就是说,总的抽运光中大约有 20% 的抽运光由于菲涅耳损耗和溢出损耗被消耗掉,而其余的光由于抽运腔的反射,最终将被晶体有效地吸收。从表中还可以看出,抽运光能否被晶体充分吸收主要集中在抽运光的前两次吸收过程中。

图 2 所示为抽运光经过反射腔面的反射后,在晶体中被二次吸收以后,吸收效率与 d 和 d_f 的关系。可以看出,随着 d 的增加,吸收效率仍然不断下降;随着 d_f 的增加,吸收效率逐渐增加,而且当抽运源与晶体离得较远时,吸收效率增加到一定的程度便不再增加了。最大的吸收效率发生在抽运源离晶体最近,反射腔内表面离晶体最远的情况下。但在实际的激光头设计中,抽运源的发光面所在的圆面和反射腔面所在的圆面均与晶体的外圆是共心的,而且前两个圆面是统一的,也就是说,抽运源与晶体之间的距离等于反射面所在的圆的半径与晶体的半径

之差。正如图 2 中的小黑圆点所示,则最高的吸收效率发生在当 $d=0.4, d_f=1.9$ 时,其值为 77.18% 。

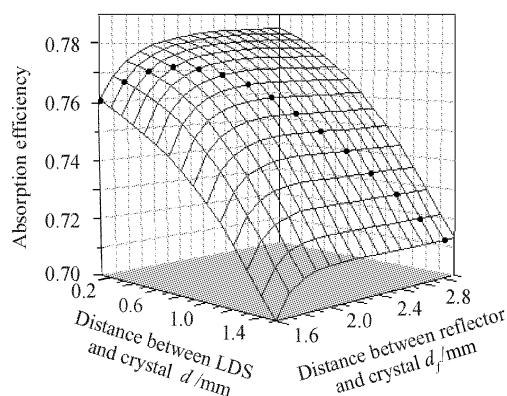


图 2 抽运光被二次吸收后,吸收效率与 d 及 d_f 之间的关系

Fig. 2 Relationship between absorption efficiency and d, d_f after pump light has been absorbed for two times

图 3 和图 4 分别描述了当抽运光与晶体之间的距离为 1.5 mm 和 0.5 mm 时,抽运光经过晶体次数分别为 1 次,2 次和 4 次,也就是被抽运腔反射的次数为零次、1 次和 3 次时,晶体中抽运光强度的分布变化情况。可以看出,由于晶体对抽运光的二次吸收,在晶体中与抽运光入射相对的一侧的强度增强,而且当距离 d 较小时,容易形成两边高、中间低的相对强度分布。这种分布有利于实现光抽运均匀性,因为当晶体被多围抽运(即在晶体的周围均匀分布若干 LD 列阵)时,晶体中抽运光最终的相对强度分布是将单向抽运时的结果进行空间旋转、叠加得到的,所以在晶体中将会出现中间高、边缘低的分布,但在抽运光入射的一端将会出现侧峰,而从图中可以看到,抽运腔的存在,使得在抽运光入射的相对一端也出现了对称的强度分布,这样便可真正实现抽运光相对强度的类高斯分布,使光抽运均匀性增强。此外,还可以看出,当抽运光被反射一次,即在晶体中进行二次吸收以后,其相对强度分布情况就已经稳定下来,不再会有明显的变化了。

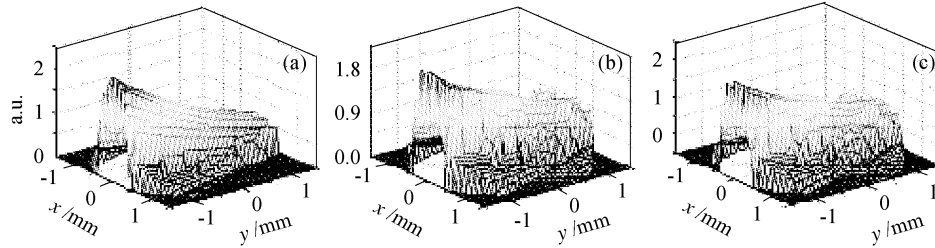


图 3 当 $d = 1.5 \text{ mm}$, $d_f = 3 \text{ mm}$ 时,抽运光在晶体中的分布
抽运光经过晶体的次数:(a) 1 次;(b) 2 次;(c) 4 次

Fig. 3 Distribution of pump light in crystal with $d = 1.5 \text{ mm}$ and $d_f = 3 \text{ mm}$

The time of pump light passing through is: (a) one time; (b) two times; (c) four times, respectively

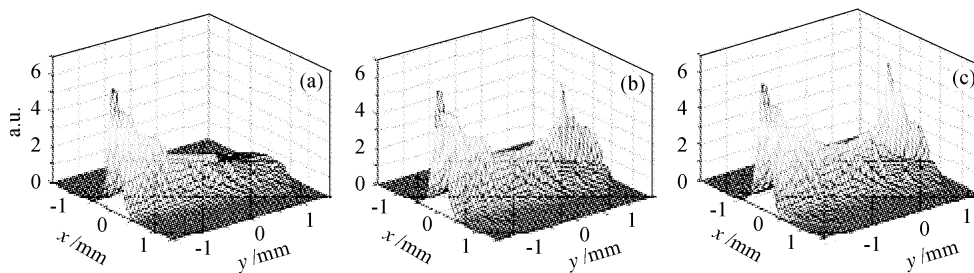


图 4 当 $d = 0.5 \text{ mm}$, $d_f = 2 \text{ mm}$ 时,抽运光在晶体中的分布
抽运光经过晶体的次数:(a) 1 次;(b) 2 次;(c) 4 次

Fig. 4 Distribution of pump light in crystal with $d = 0.5 \text{ mm}$ and $d_f = 2 \text{ mm}$

The time of pump light passing through is: (a) one time; (b) two times; (c) four times, respectively

3 实验研究

在实验中,对以下四种情况进行了测试,一是不使用抽运腔,对晶体进行激励(A);二是在晶体周围安装一个铜管,但铜管的内表面没有经过处理(B);三是对铜管的内表面进行镀金处理(C);四是对铜管的内表面先进行抛光,然后再进行镀金处理(D)。使用的抽运源为 9 个发光面积为 $1 \mu\text{m} \times 10 \text{ mm}$ 的连续 LD bar,单 bar 的最大输出功率为 20 W,输出中心波长并不相同,但室温下均在 808 nm 附近,线宽约为 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。靠温度的调节,使其发射谱的中心波长对准晶体的吸收峰值处的中心波长。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。使用的晶体为 Nd:YAG,尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$,掺杂浓度为 1.0 at.-%,晶体两端面镀有 1.064 nm 的增透膜,晶体棒装在一个内径为 4.6 mm,外径为 6.3 mm 的玻璃管中。铜管将被安装在玻璃管的外面,抽运腔反射面的直径约为 7 mm。采用的谐振腔为直线型平

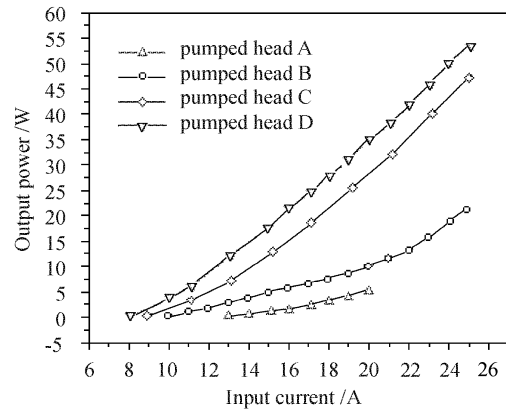


图 5 四种情况下,激光头的输入输出性能

Fig. 5 Output character for the four pumped heads

腔结构,腔长为 310 mm,输出耦合镜的透过率为 7%。这四种情况下,激光头的输入输出特性如图 5 所示。需要指出的是,由于半导体激光器阵列的输出波长随着温度的升高将会产生红移,所以在对各激光头的性能进行测试之前,首先要确定激光头工作的最佳温度。采用的方法是,将半导体激光器阵列的输入电流调到最大 25 A,然后使冷水机的温度

从 5℃ 上升到 35℃, 记录下激光头输出功率最大时的冷水机显示温度, 将其作为最佳温度, 在该温度附近, 对激光头的输入输出性能进行重新测试。另外, 在激光头 A 中, 没有使用黄铜制成的抽运腔, 且晶体外面的玻璃管的内径为 8 mm, 外径为 10 mm。从图中可以看出, 没有使用抽运腔的激光头的输入输出性能较差, 加入抽运腔以后, 效率提高了将近一倍。在激光头 B, C 和 D 的设计中, 都使用了相同尺寸的石英玻璃冷却管, 并且在冷却管外都是用了铜管作为抽运反射腔, 它们之间的差别在于对抽运腔内表面的光洁度的要求不同。在激光头 D 中, 对抽运腔的内表面进行了仔细的研磨、抛光, 使其达到镜面水平, 然后再进行镀金处理, 使得抽运光在晶体中可以得到更好的吸收, 从而获得了最好的实验结果, 当输入光功率为 180 W 时, 输出 1064 nm 的基频光 53.5 W, 光-光转换效率为 29.7%。激光头 C 与激光头 D 相比, 抽运腔的反射面在镀金之前没有经过抛光处理, 所以其最大输出功率比激光头 D 的最大输出功率低了 6.1 W, 光-光转换效率也降低了 3.5%。激光头 B 和 C 的差别在于抽运腔内表面是否镀金, 镀金前, 最大输出功率仅为 21 W, 光-光转换效率为 11.7%, 镀金后, 最大输出功率增加到 47.4 W, 光-光转换效率为 26.2%, 输出功率提高了 1.25 倍, 可见抽运腔反射面是否镀金对激光头的输入输出特性的影响是很大的。

4 结 论

讨论了抽运腔在 LD 三向侧面抽运的固体激光头中的应用。从理论上, 用光线追迹的方法分析了抽运腔对晶体的吸收效率以及抽运光在晶体中的分布的影响; 从实验上, 证明了具有镜面反射面的抽运腔体将会极大地改善激光头的输入输出特性, 最终获得了 53.5 W 的基频光输出, 光光转换效率为 29.7%。

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 Hailin Wang, Weiling Huang, Zhuoyou Zhou *et al.*. High power CW diode-side-pumped Nd: YAG rod laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(9):541~543
- 4 Wang Jian-jun, Jiang Dongsheng, Zhao Hong. Research on diode side-pumped TEM₀₀-mode lasers [J]. *Laser & Infrared*, 2000, **30**(5):286~288
王建军, 姜东生, 赵 鸿. 二极管侧面抽运固体激光器 TEM₀₀ 模输出研究[J]. *激光与红外*, 2000, **30**(5):286~288
- 5 Liu Yuanyuan, Fang Gaozhan, Liu Bin *et al.*. Laser diode side-pumped cw Nd: YAG lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7):577~580
刘媛媛, 方高瞻, 刘 斌等. 侧面抽运 Nd: YAG 连续激光器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(7):577~580
- 6 Hua Tan, Weiling Huang, Zhuoyou Zhou *et al.*. Nd: YAG laser side-pumped by diode laser arrays [C]. *SPIE*, 1999, **3862**:223~226
- 7 Yuanyuan Liu, Gaozhan Fang, Xiaoyu Ma *et al.*. Design of side-pumped Nd: YAG lasers [C]. *SPIE*, 2003, **4914**:481~484