

文章编号: 1001-3806(2009)01-0001-04

二极管角部抽运 Nd:YAG 基模激光器

巩马理, 张志攀, 高松, 张海涛

(清华大学精密仪器与机械学系光子与电子技术研究中心摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为了分析角部抽运方式在中小功率激光器设计中的可行性, 基于光线追迹法, 计算了不同的激光介质几何结构参量和不同的二极管温度条件下角部抽运复合板条激光器的抽运效率和抽运均匀性。从模拟计算结果可知, 只要选择合理的激光介质结构参量, 角抽运方式能得到高的抽运效率和较好的抽运均匀性。设计了一种角部抽运 Nd:YAG 复合板条激光器, 在 45W 的抽运功率下获得了 12W 的激光输出, 光光转换效率约为 26.7%, 在 40W 抽运时光束质量 $M_x^2 = 1.47$, $M_y^2 = 1.36$ 。理论分析和实验设计表明, 角抽运方式在小功率激光器设计中是可行的。

关键词: 激光器; 角部抽运; 光线追迹法; 抽运效率; 抽运均匀性

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

Diode corner-pumped TEM₀₀ Nd:YAG lasers

GONG Ma-li, ZHANG Zhi-pan, GAO Song, ZHANG Hai-tao

(State Key Laboratory of Tribology, Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to analyze the feasibility of corner-pumped method in medium and small power lasers design, ray-tracing algorithm was used to simulate the pumping efficiency and absorbed energy distribution of diode corner-pumped lasers for different laser medium parameters and different diode temperatures. It is concluded that high pumping efficiency and good pump uniformity can be obtained for corner-pumped composite slab lasers with appropriate choice of laser medium parameters. A diode corner-pumped composite Nd:YAG slab laser was designed, whose output power was up to 12W under the pump power 45W at optical-optical efficiency of about 26.7%, and whose M^2 factors of beam quality at width and thickness direction were 1.47 and 1.36 respectively at 40W pumping energy. Theoretic analysis and experimental design show that corner-pumped method is useful in medium and small power lasers design.

Key words: lasers; corner-pumped; ray-tracing algorithm; pumping efficiency; pump uniformity

引言

角部抽运方式是二极管抽运固体激光器的一种新型抽运方式, 抽运光从板条激光介质的角面入射, 利用抽运光在激光介质内的全内反射来实现多程吸收, 获得高的抽运效率和较好的抽运均匀性^[1]。角部抽运的抽运效率和端面抽运相当, 但是抽运均匀性比端面抽运好, 而且更容易实现大功率抽运和大功率输出, 目前已经有用角部抽运方式实现了数百瓦到千瓦级 Yb:YAG 激光器的报道^[2-3]。

角部抽运方式抽运光在激光介质内多程吸收, 而其它抽运方式都只考虑到抽运光在激光介质内的一次性吸收^[4-8], 并且角部抽运方式需要对抽运光在快轴和

慢轴方向都进行整形, 不能把抽运光功率分布在慢轴方向简化为均匀分布来处理, 因此, 计算角部抽运方式抽运光在激光介质内的吸收和分布情况比其它抽运方式更复杂, 目前还得不到近似的解析解。本文中针对角部抽运的复合板条激光介质, 基于光线追迹法, 模拟计算了不同的激光介质参量和 LD 温度漂移对抽运效率和抽运均匀性的影响, 给出了各个参量的最佳范围。同时还进行了角部抽运 Nd:YAG 复合板条激光器的实验研究, 得到了 12W 的激光输出, 光光转换效率约为 26.7%, 在 40W 抽运功率下, 光束质量 $M_x^2 = 1.47$, $M_y^2 = 1.36$ 。模拟计算和实验结果都验证了角部抽运方式在小功率激光器应用中的合理性。

1 数值计算模型

单个 LD 条通常是由 19 个 ~ 50 个管芯组成的线性阵列^[9], 每个管芯的数学模型描述有双峰远场模型^[10]和椭圆高斯光束模型^[11], 而 LD 条还没有准确的数学模型来描述其发光特性, 一般思路是在单管芯模

作者简介: 巩马理 (1959-), 男, 教授, 主要从事激光与光电子技术方面的研究工作。

E-mail: gongml@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2007-10-15; 收到修改稿日期: 2007-11-01

型的基础上认为各个管芯光强非相干叠加得到 LD 条的光场分布。在此假设每个管芯在近轴条件下的数学模型为椭圆高斯光束模型,光轴方向与 z 轴平行,各个管芯沿着 x 轴方向线性排列,则 LD 发出的沿 z 轴方向传播的抽运光强度分布为:

$$I(x, y, z) = \sum_{-\frac{N}{2} \leq i \leq \frac{N}{2}} I_0(z) \times \exp \left\{ \frac{-2(x-id)^2}{w_{0x}^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_{0x}^2} \right)^2 \right]} + \frac{-2y^2}{w_{0y}^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_{0y}^2} \right)^2 \right]} \right\} \quad (1)$$

式中, N 为管芯的个数, d 为管芯的间距, w_{0x} 和 w_{0y} 分别为 x 和 y 方向束腰处的光斑半径, $I_0(z)$ 为归一化的功率分布因子,这些参量的大小可以从 LD 条的数据手册获得。

为了把 LD 发出的抽运光从激光介质的倒角面耦合到激光介质中,需要使用由柱面透镜组成的耦合系统对抽运光进行压缩,耦合系统如图 1 所示。在快轴

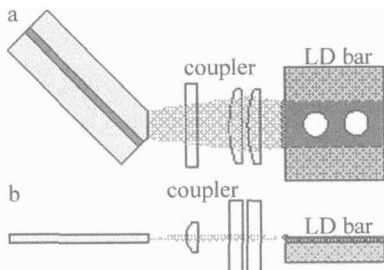


Fig.1 Schematic of coupler
a—top view b—side view

方向使用一个焦距为 12.7mm 的柱面透镜,在慢轴方向使用两个焦距为 30mm 的柱面透镜,可把抽运光完全耦合到激光介质中,通过调整各个柱面透镜的位置,可以把耦合光斑的尺寸限制在 $3.0\text{mm} \times 0.8\text{mm}$ 以内。

复合板条状激光介质的几何结构如图 2 所示,中

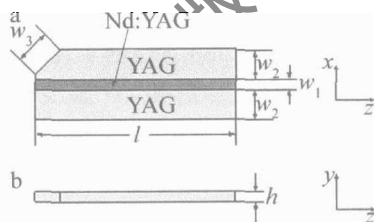


Fig.2 Schematic of composite slab
a—top view b—side view

间为掺杂的 YAG 板条,如 Nd:YAG, Yb:YAG, 两侧为非掺杂的 YAG 板条。只有中间的掺杂区吸收抽运光,两侧的非掺杂区通过全内反射把抽运光限制在激光介质内部,从而有利于激光介质的散热和抽运能量的提取。把激光介质中间的掺杂区划分为长、宽、高分别为 $l/N_1, w_1/N_2, h/N_3$ 的立方体小格,构造维数为 $N_1 \times N_2 \times N_3$ 的功率矩阵, N_1, N_2, N_3 的大小根据计算精度的需要设定,在实际计算中可取为 100 以上。对任意

通过立方体小格的光线,按照指数吸收方程,立方体小格吸收的光线功率为:

$$P = P_{in} [1 - \exp(-\alpha L)] \quad (2)$$

式中, P_{in} 是入射到立方体小格的光线所带的功率大小, α 为掺杂区对抽运光的吸收系数,在中小功率抽运时可近似假设为一个常数, L 为光线通过立方体小格前后的光程差。对入射的每一条光线,追迹计算所有的立方体小格对它的吸收情况,一直到该光线逸出激光介质或者功率衰减到入射前的 1/1000 为止。把所有的立方体小格吸收的抽运功率加起来与抽运光总功率相除,即可得到抽运效率。综合考虑每个小格吸收抽运光功率的大小,可定性地得到抽运均匀性的好坏。

2 模拟计算结果及其分析

2.1 激光介质对抽运光的吸收系数、抽运效率和抽运均匀性的影响

设激光介质的尺寸为: $l = 20\text{mm}, h = 1\text{mm}, w_1 = 1\text{mm}, w_2 = 3.5\text{mm}, w_3 = 3\text{mm}$ 。 w_3 足够大,以保证抽运光能耦合到激光介质内; w_1 和 h 的大小相当,有利于得到近似对称的输出光斑; l 的长度保证抽运光在介质内往返 1 周能通过掺杂区 5 次^[1]。

假设抽运光能量恒定,从图 3 可以看出,随着掺杂区对抽运光吸收系数的增加,抽运效率也明显增加。

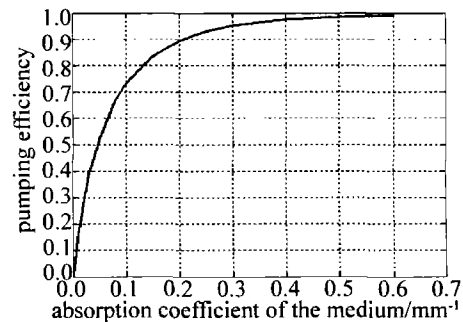


Fig.3 Pumping efficiency for different absorption coefficients

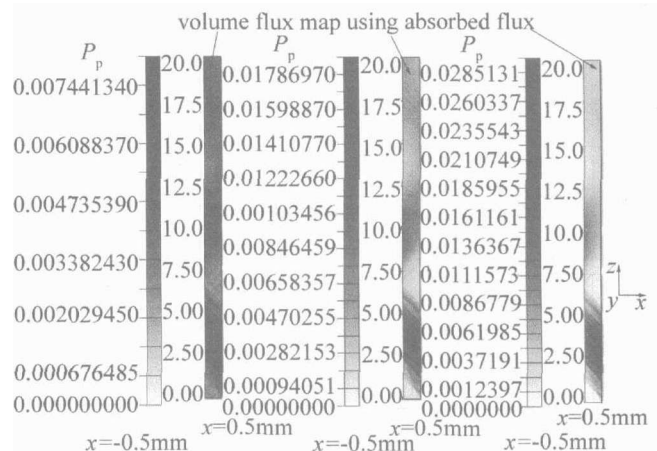


Fig.4 Absorbed relative power density distributions for three absorption coefficients, left—0.1 mm⁻¹; middle—0.3 mm⁻¹; right—0.5 mm⁻¹

当吸收系数大于 0.2mm^{-1} 时,抽运效率在 90% 以上,继续增大吸收系数,抽运效率出现饱和的现象,理论上接近完全吸收。如图 4 所示,随着吸收系数的提高,抽运均匀性变差,抽运光主要在前几次通过激光介质掺杂区时被吸收。由模拟计算的结果可知,95% 以上的未被掺杂区吸收的抽运光能量在激光介质的导角面逸出。综合考虑抽运效率和抽运均匀性,激光介质对抽运光的吸收系数在 $0.2\text{mm}^{-1} \sim 0.4\text{mm}^{-1}$ 之间比较合适。

2.2 激光介质掺杂区的宽度对抽运效率和抽运均匀性的影响

设激光介质对抽运光的吸收系数为 0.3mm^{-1} ,激光介质掺杂区的宽度可变,其它几何参量与 2.1 节中相同。

如图 5 所示,抽运效率随着掺杂区宽度的增大而

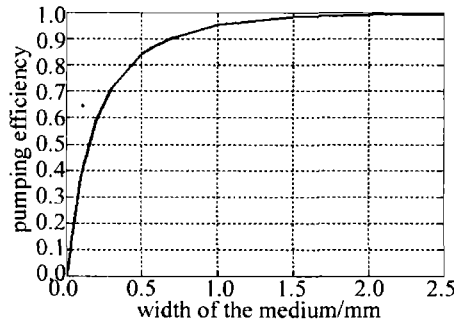


Fig. 5 Absorb rate of pumping energy for different width of the medium. 增大,当掺杂区宽度大于 0.8mm 时,抽运效率出现饱和现象,在理论上接近完全吸收。然而,抽运均匀性却随着掺杂区宽度的增大而变差,相应的分布如图 6 所示。实际上掺杂区的宽度和激光介质的长度共同决定

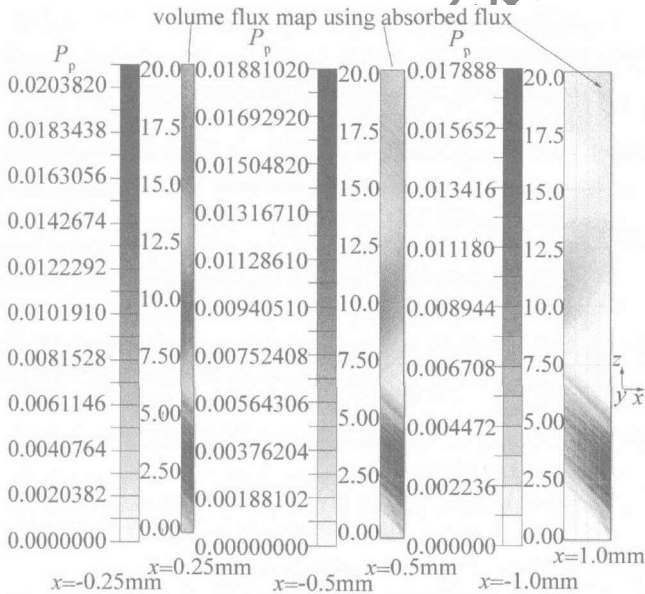


Fig. 6 Absorbed relative power density distributions for three doping laser medium widths, left— 0.5mm ; middle— 1.0mm ; right— 2.0mm

了抽运光经过吸收区的光程,该光程和激光介质对抽运光的吸收系数的乘积决定了抽运效率。在前面假设

的条件下,掺杂区宽度取 $0.7\text{mm} \sim 1.5\text{mm}$ 比较合适。

2.3 LD 温度漂移对抽运效率的影响

LD 温度变化会导致抽运光的中心波长发生漂移,由于激光介质对不同波长抽运光的吸收系数不同,从而影响到抽运效率。

设激光介质的尺寸和 2.1 节中相同,对掺杂区质量分数为 0.005 的 Nd:YAG,可以测量得到其吸收光谱,如图 7 所示。LD 的温漂系数为 $0.28\text{nm} \cdot \text{K}^{-1}$,在

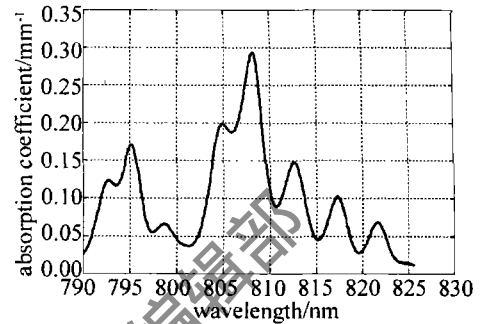


Fig. 7 Absorption coefficient of 0.005 atomicity fraction Nd:YAG for different wavelength

室温 (25°C) 时的中心波长为 808.1nm ,则在温度 T 处 LD 输出光的中心波长为:

$$\lambda = 808.1 + 0.28(T - 25) \quad (3)$$

单位为 nm 。根据温度漂移的 (3) 式和图 7,可以得到 LD 在不同的温度条件下,掺杂区对抽运光的吸收系数,如图 8a 所示,再结合图 3,可以得到 LD 在不同的

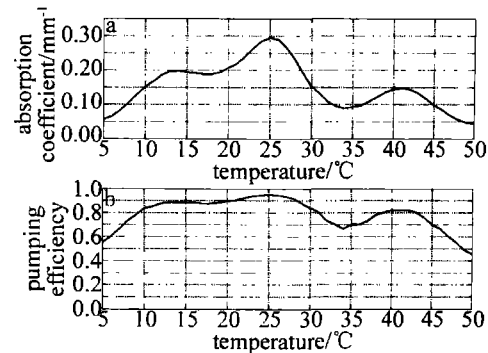


Fig. 8 Absorption coefficient and pumping efficiency for different temperatures of LD

a—absorption coefficient b—pumping efficiency

温度条件下的抽运效率,如图 8b 所示。从图 8b 可以看出,当 LD 的温度在 $10^\circ\text{C} \sim 26^\circ\text{C}$ 之间时,抽运效率的变化范围为 $83\% \sim 94\%$ 。

3 实验

实验装置如图 9 所示,复合板条状激光介质尺寸为: $l = 14\text{mm}$, $h = 1\text{mm}$, $w_1 = 1\text{mm}$, $w_2 = 3.5\text{mm}$, $w_3 = 3\text{mm}$,中间的掺杂区是质量分数为 0.01 的 Nd:YAG,两侧为非掺杂的 YAG 板条,经测量得到掺杂区对 808.1nm 抽运光的吸收系数为 0.6mm^{-1} 。腔型为平平腔,长腔长

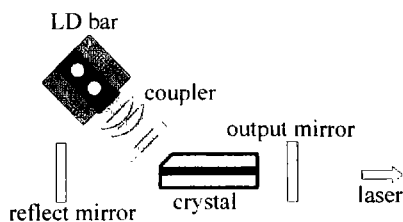


Fig. 9 Experimental setup for a corner-pumped composite Nd:YAG slab laser

100mm,短腔长60mm,输出镜透过率为45%。

稳态条件下的功率输出特性如图10所示,整个抽运过程中激光器基横模运转,光束质量因子 M^2 均小

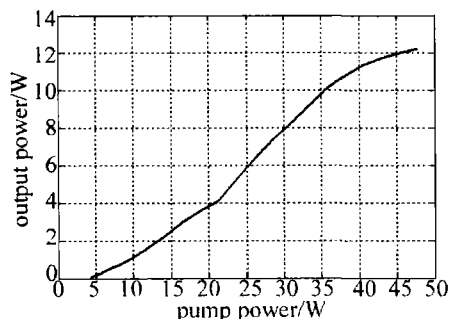


Fig. 10 Output power as a function of pump power

于2,在抽运功率为45W时输出功率为12W,光光转换效率约为26.7%。40W抽运时光束质量为 $M_x^2 = 1.47$, $M_y^2 = 1.36$,其输出光斑如图11所示。

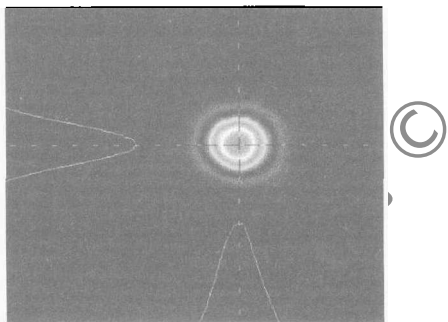


Fig. 11 Output beam with a pumping energy of 40W

把复合激光介质的参量代入到数值计算模型中可以得到抽运效率为92.2%,45W抽运时抽运光的吸收分布情况如图12所示,在激光介质的宽度方向,抽运

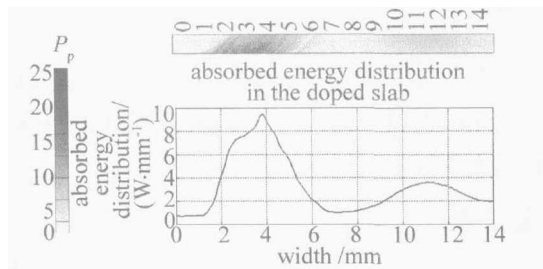


Fig. 12 Absorbed energy distribution in the doped slab

光的分布比较均匀;在激光介质的长度方向,抽运光的分布如图12中的曲线所示,抽运光第1次通过掺杂区时的吸收最强,占了总能量的60%以上。为了提高抽

运均匀性,应使用掺杂浓度更低的Nd:YAG,减低掺杂区对抽运光的吸收系数。同时,吸收系数的减小将导致抽运效率降低,根据前面的分析综合考虑,掺杂区吸收系数可在 $0.2\text{mm}^{-1} \sim 0.4\text{mm}^{-1}$ 之间选取。为了提高抽运效率,应该增加激光介质的长度到20mm,以增加抽运光在激光介质内往返1周通过掺杂区的次数。通过对这些参量进行优化,将得到更好的激光输出效果。

4 结论

作者对二极管角部抽运复合板条状激光介质抽运光的吸收和分布特性进行了计算机模拟,分析了激光介质对抽运光的吸收系数、激光介质掺杂区宽度和LD温度漂移等参量对抽运效率和抽运均匀性的影响,给出了各个参量的合理范围。同时,还进行了角部抽运Nd:YAG激光器的实验研究,在45W抽运光时得到了12W的基横模输出,光光转换效率约为26.7%。模拟计算和实验研究的结果表明,只要选取合理的激光介质参量,角部抽运方式能获得高的抽运效率以及较好的抽运均匀性和激光输出。

参考文献

- [1] GONG M L, LU F Y, LIU Q, *et al.* Efficient corner-pumped Yb:YAG/YAG composite slab laser [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(16): 3806-3810.
- [2] LIU Q, GONG M L, LI C, *et al.* Corner-pumped Yb:YAG lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(2): 721-725 (in Chinese).
- [3] LIU Q, GONG M L, LU F Y, *et al.* 520W continuous-wave diode corner-pumped composite Yb:YAG slab laser [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(7): 726-728.
- [4] XIE W J, TAM S Ch, LAM Y L. Simple method to calculate the radial energy and temperature distributions in diode-pumped solid state laser rods [J]. *Opt Engng*, 2001, 40(8): 1568-1572.
- [5] CAI Z Q, YAO J Q, WEN W L, *et al.* Simulation of absorbed power and temperature distribution in LD side-pumped laser [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, 15(11): 1306-1310 (in Chinese).
- [6] WANG J H, JIN F, ZHAI G, *et al.* Pump uniformity study of solid state laser rods direct side-pumped by laser diode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4): 421-426 (in Chinese).
- [7] GUO Y X, GONG M Y, XUE H Z, *et al.* Absorption property of laser rod circle-side-pumped by LD [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(6): 570-577 (in Chinese).
- [8] LIN C, HOU X, LU Y T. Analog calculation and evaluation of LDA direct side-pumping [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(7): 825-828 (in Chinese).
- [9] KOECHNER W. *Solid-state laser engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2002: 275-285 (in Chinese).
- [10] WANG Q, ZENG X D, AN Y Y. A far-field distribution model describing the double-peak beam of high-power laser diodes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(5): 619-622 (in Chinese).
- [11] ZENI L, CAMPOPIANO S, CUTOLO A, *et al.* Power semiconductor laser diode arrays characterization [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2003, 39(2): 203-217.