

## 侧面紧耦合泵浦微型激光器研究

商继敏,任宇芬

(郑州轻工业学院 技术物理系,河南 郑州 450002)

**摘要:** 利用解析法分析了激光二极管(LD)侧面紧耦合泵浦固体激光器中泵浦光强分布特点,其增益分布与发光单元发光面处的束腰半径、激光二极管等间距环绕个数、泵浦源与晶体表面的距离、晶体棒半径和工作物质的吸收系数有关,通过调整泵浦参数可以实现中心强边缘弱的泵浦光分布。采用 LD 紧贴于 Nd:YAG 的紧耦合双侧面对称泵浦技术,对侧面紧耦合泵浦微型激光器进行了相关研究,实验上实现了激光二极管泵浦固体激光器(DPL)的微型化。

**关键词:** 微型激光器; 泵浦光分布; 紧耦合泵浦; 激光二极管侧面泵浦固体激光器

**中图分类号:** TN248.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)05-1174-05

## Tightly coupled side-pumping technology of miniature solid state laser

Shang Jimin, Ren Yufen

(Department of Technical and Physics, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Direct pumping technique of micro-modularization diode side-pumped solid-state laser (DPL) was studied. The pump distribution of laser diode in gain medium was analyzed. The results show that the distribution of the gain relates to the parameter such as the waist radius of the emitter, the number of the bar around, the distance between pump sources and crystal surface, the radius of the crystal rod and the absorption coefficient of the crystal. Through adjusting the above pump parameters the pump distribution can be realized which has the character of strong center and weak edge. An experimental equipment of laser diode symmetrically side-pumped Nd:YAG laser was also designed, and the miniaturization of diode pumped solid state laser was achieved.

**Key words:** miniature solid state laser; distribution of pumping light; tightly coupled pumping technology; DPL

收稿日期:2012-09-11; 修订日期:2012-10-15

基金项目:河南省科技攻关资助项目(132102210222);郑州轻工业学院博士基金

作者简介:商继敏(1977-),女,博士,主要从事激光技术与器件方面的研究。Email:shjimin2003@zzuli.edu.cn

### 0 引言

在实际工程应用上,由于体积和质量各方面的严格要求,需要减小整个激光系统的体积和质量,以实现激光二极管泵浦固体激光器(DPL)的小型化。全固化 DPL 微型激光器是 DPL 的一种发展趋势。这种激光器具有效率高、体积小、微型化、性能稳定、寿命长等优点,因此可广泛用于精确制导、激光近炸引信、激光雷达、通讯等许多相关领域<sup>[1]</sup>。通常对于普通高功率激光器,由于高的激光增益会产生多模(横模、纵模)振荡,空间烧孔效应,热致透镜效应和双折射效应,都会不同程度降低输出光束质量<sup>[2]</sup>。如果要使激光器在较低功率下工作,可以采用激光二极管(LD)直接泵浦工作物质,把工作物质晶体固定在金属架中,其散热方式为自然传导散热或风冷等。这种直接紧泵浦方式与传统的泵浦耦合方式不同,没有准直系统对泵浦光的损耗,称之为紧耦合泵浦<sup>[1]</sup>。紧耦合泵浦是一种无需额外光学整形系统的紧凑型的直接泵浦方式。由于其紧凑性和利用自然传导散热或风冷等散热方式,能实现 DPL 的微型化。紧耦合泵浦技术是微型模块化 DPL 的关键技术之一。微型 DPL 的输出特性取决于其泵浦结构的设计,文中在分析紧耦合泵浦光分布的基础上,提出了紧耦合泵浦的设计方案,实验上实现了侧面泵浦 DPL 的微型化。

### 1 泵浦光在增益介质中的分布模拟

半导体激光器侧面泵浦是一种有效的泵浦途径,但是侧面泵浦时泵浦光的吸收是沿垂直于晶体棒轴方向进行的,导致泵浦光分布不均匀,泵浦光与振荡光场很难重合,即泵浦光与腔模振荡光空间匹配性较差,转换效率低,易产生多横模振荡,输出光束质量差,因而,从理论上研究侧面泵浦的输出特性对于设计和优化器件都有重要的意义<sup>[3-6]</sup>。泵浦效果依赖于泵浦光在激光介质中的空间分布,即依赖于对泵浦光场分布的精确掌握<sup>[7]</sup>,对于 LD 侧面紧耦合泵浦棒状 Nd:YAG 晶体,泵浦结构如图 1 所示,利用解析法分析侧面紧耦合泵浦固体激光器中泵浦光强分布特点。

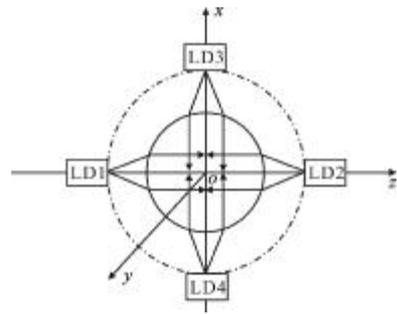


图 1 4LD 侧面泵浦 Nd:YAG 棒状晶体  
Fig.1 4LD side-pumped laser rod

激光二极管阵列侧面泵浦时,由于泵浦光沿晶体轴线方向近似呈线状排列,因此在与晶体轴线方向垂直的各横截面内,认为泵浦情况相同。如图 2 所

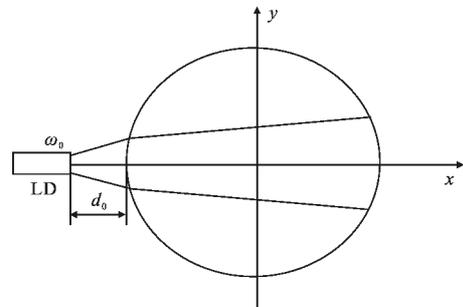


图 2 单个 LD 直接入射棒状晶体的截面示意图  
Fig.2 Section of a diode directly side-pumped laser rod

示慢轴方向(图中垂直纸面方向,即 z 轴方向)与晶体长度方向一致,忽略慢轴方向的发散,则泵浦光沿晶体轴向是均匀的,只需要考虑给定横截面上的光强分布即可,其光强分布可看成沿 y 方向的高斯光束:

$$I(x, y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{I_0}{w(x)} \exp(-2y^2/\omega^2(x)) \quad (1)$$

式中:  $w(x)$  为由高斯光束的传输矩阵计算出的晶体内 x 处 y 方向上的泵浦光束半径。  $I_0$  可通过对总泵浦功率归一化求出,取束腰所在的平面为参考面即图 2 中的  $x = -r - d_0$  位置处,有:  $w(-r - d_0) = w_0$ , 总的泵浦功率为发光强度的面积分:

$$P_{in} = \int_0^l \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{I_0}{w_0} \exp(-2y^2/\omega_0^2) dy dz \quad (2)$$

可求出  $I_0 = P_{in}/l$ ,  $w_0$  为束腰半径;  $l$  为 bar 的长度;  $P_{in}$  为总泵浦功率,即  $I_0$  是沿晶体轴向单位长度的抽运光功率。在晶体内部,考虑吸收时,则相对应的晶体内部

的泵浦光光强表达式为<sup>[8]</sup>:

$$I(x, y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{I_0}{w(x)} \exp(-2y^2/\omega^2(x)) \exp(-\alpha d) \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  为晶体对泵浦光的吸收系数;  $d$  为泵浦光在晶体内走过的长度, 由图 2 所示的坐标系可知,  $d(x, y) = \sqrt{r^2 - y^2} + x$ , 其中  $r$  为晶体棒半径。

不考虑激光棒的聚焦作用, 忽略光在界面上的反射, 且散射损耗与其他损耗之和相对于吸收损耗很小, 在光强处理时主要考虑吸收损耗。运用光线传输矩阵对 LD 光束的传输进行描述。bar 出射光束经过均匀介质(空气) $M_1$ , 晶体界面  $M_2$  和均匀介质(Nd:YAG 晶体) $M_3$  变换后, 其光线变换矩阵可以用如下形式进行描述:

$$M = M_3 M_2 M_1 \quad (4)$$

式中:  $M_1$  为长度为  $d_0$  的均匀空气介质;  $d_0$  为 bar 发光单元面距离晶体表面的距离如图 2 所示。  $M_1$  为:

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & d_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$M_2$  为空气和半径为  $r$  的棒状 Nd:YAG 晶体的界面, 相应的 ABCD 矩阵为:

$$M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n-1}{n \cdot r} & \frac{1}{n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$M_3$  为光线在晶体内部通过长度为  $d$  的距离,  $M_3$  表示为:

$$M_3 = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

将  $M_1, M_2, M_3$  代入上面的矩阵, 可得

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{n-1}{n \cdot r} d & d_0 + d \left( \frac{n-1}{n \cdot r} d_0 + \frac{1}{n} \right) \\ \frac{n-1}{n \cdot r} & \frac{n-1}{n \cdot r} d_0 + \frac{1}{n} \end{bmatrix} \quad (8)$$

在 bar 发光面处的高斯光束  $q$  参量可表示为  $\frac{1}{q_0} = -i \frac{\lambda}{2} \omega_0$  假设泵浦光束由 bar 传播至晶体中的  $P(x, y)$  点

处总的光线矩阵为:  $M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ , 则  $P(x, y)$  点处的高斯光束  $q$  参量及光斑半径分别为:

$$q = \frac{Aq_0 + B}{Cq_0 + D} \quad (9)$$

$$\omega(x) = \sqrt{-\frac{\lambda}{\pi \text{Im}(1/q)}} \quad (10)$$

代入可得  $P(x, y)$  处光斑半径。

为了获得较高的增益和尽量均匀的泵浦, 通常采用多向侧面泵浦形式对晶体进行环绕对称泵浦, 晶体内各点泵浦光强均是多向泵浦源在该点叠加的结果。对于多向侧面环绕泵浦的情况, 可通过坐标轴变换得到每个 LD 在同一点的光强分布, 再进行叠加, 点  $(x, y, z)$  处的归一化泵浦光强分布为:

$$I(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{I_0}{w(x_i)} \exp\left(-\frac{2y_i^2}{w^2(x_i)} - \alpha d_i\right) \right] \quad (11)$$

其中,  $x_i = x \cos(\theta) + y \sin(\theta)$ ;  $y_i = y \cos(\theta) - x \sin(\theta)$ ;  $d_i = \sqrt{r^2 - y_i^2} + x_i$ ;  $\theta = 360^\circ / N$  为相邻 LD 之间的夹角, 如 3LD 侧面泵浦互成  $120^\circ$ 。

由上述公式可知工作物质内增益分布特性与 LD 发光面处的束腰半径  $w_0$ 、二极管等间距环绕个数、泵浦源与晶体表面的距离、晶体棒半径和工作物质的吸收系数有关, 一旦泵浦结构参数确定了, 相应的增益分布特性也就确定了。在工程应用中, 通过调整以上泵浦参数可以实现中心强边缘弱的泵浦光分布。

## 2 实验装置与结果

采用 LD 侧面紧耦合泵浦微型激光器如图 3 所示, 利用“面对面”的紧耦合方式, LD 输出泵浦光束直接耦合进入, 两个 LD 如图所示方式照射晶体。晶体前端面为平面, 作为反射镜镀有对 1064 nm 的光高反的薄膜, 它对 1064 nm 的反射率 >99.8%; 晶体的另一端为球面, 作为输出镜对 1064 nm 的光透射率为 10%, 两个端面共同构成激光谐振腔, 侧面镀 808 nm 增透作为 808 nm 耦合输入。晶体固定在金属架中, 利用风冷散热即可。

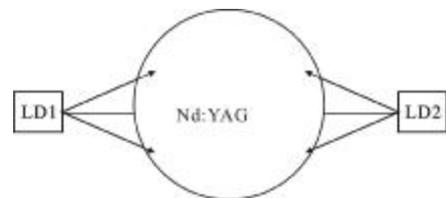


图 3 双 LD 泵浦固体激光工作物质示意图  
Fig.3 Section of 2LD side-pumped laser rod

以高斯分布的 LD 作为出射光场模型, 在泵浦源 LD 确定的情况下可以通过改变半导体激光器发光点距离晶体表面的大小  $d_0$  和晶体棒的半径  $r$  的大小来优化泵浦光在晶体中的分布情况。在其他条件

不变的情况下,激光二极管线阵发光面与晶体棒表面之间的距离  $d_0$  变化时,随着  $d_0$  值的增大,横截面内泵浦光分布越均匀。但过大的泵浦距离使得泵浦光能量分散的较快,使得介质中心处的光增益较小;距离越近,抽运的均匀性就越差。在其他参数相同的情况下,晶体棒的半径  $r$  越小,其内部泵浦光的空间分布越均匀,但过小的晶体棒半径不利于多面 LD 泵浦源的放置。晶体棒的半径越大,泵浦光到达介质中心时剩余的光能量也就越小,中心处的光增益也就越小,不利于具有高光束质量的激光输出。实验中选用掺杂浓度 0.2 at.% Nd:YAG 晶体,晶体棒的半径  $r=1\text{ mm}$ ;棒状晶体长度尺寸为  $10\text{ mm}$ ,LD 发光点距离激光晶体界面  $d_0=1.5\text{ mm}$ ,得到晶体内部的圆柱截面光强分布如图 4 所示。

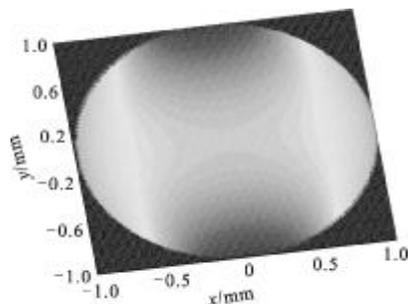


图 4  $d_0=1.5\text{ mm}$  晶体中光分布二维图

Fig.4 Two dimensional plot of pump distribution with  $d_0=1.5\text{ mm}$

优化设计泵浦结构后,实验采用两个 LD 对称泵浦,通过温控使其工作在室温  $22.2\text{ }^\circ\text{C}$ ,此时 LD 峰值波长为  $808\text{ nm}$ 。改变 LD 的工作电流,DPL 的输出功率随 LD 工作电流的变化而变化,在工作电流为  $880\text{ mA}$  时,得到  $1064\text{ nm}$  的激光输出,输出功率为  $125\text{ mW}$ ,光-光效率为  $12.5\%$ 。体积(不包括电源与传导制冷结构) $<40\text{ mm}^3$  的微型 DPL 激光器输出光斑如图 5 所示。输出光斑形状如图 6 所示,输出为低阶模,光束的对称性较好。

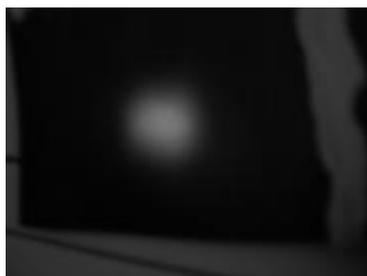


图 5 测量结果输出光斑

Fig.5 Measurement results of output spot

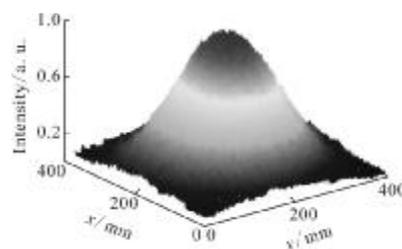


图 6 输出光场的光强分布

Fig.6 Distribution of the output intensity

### 3 结论

文中利用解析方法分析了激光二极管侧面紧耦合泵浦固体激光器中泵浦光强分布特点,采用 LD 紧贴于 Nd:YAG 的紧耦合双侧面对称泵浦技术,实现了 DPL 的微型化。这种高效紧耦合泵浦的难点在于:LD 与增益介质的对准容差极小,要同时满足 LD 的高耦合效率以及最佳光场分布是 LD 紧耦合泵浦的难点,且紧耦合的方式中泵浦光没有经过任何整形与压缩的处理,泵浦光的  $x,y$  二维方向在工作物质内传播过程中的光斑分布、发散角、宽度均不一致,模式匹配方式非常复杂,无法实现完全与基模体积重叠,所以随着泵浦功率的增加,一些低阶横模也会产生振荡,输出光场的光束质量会下降。

### 参考文献:

- [1] Liu Lei, Zhang Dayong, Zhao Hong, et al. A tightly coupled diode pumped microlaser with passive Q switch[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(6): 609-612. (in Chinese)  
刘磊,张大勇,赵鸿,等. LD 紧耦合泵浦被动调 Q 微型激光器实验研究[J]. *激光与红外*, 2010, 40(6): 609-612.
- [2] Barnes N P, Barnes J C. Injection seeding I: theory [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993, 29(10): 2670-2683.
- [3] Guo Weirong, Li Qiang, Feng Chi, et al. Numerical simulation of pumping performance of diode side pumped thin disk laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 906-912. (in Chinese)  
郭渭荣,李强,冯驰,等. 二极管侧面泵浦薄片激光器泵浦性能数值仿真[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(4): 906-912.
- [4] Zhang Shenjin, Zhou Shouhuan, Tang Xiaojun, et al. Pump distribution in gain medium of laser diode side pumped disk laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(4): 505-508. (in Chinese)

- 张申金, 周寿桓, 唐晓军, 等. 二极管侧面泵浦圆片激光器增益介质内泵浦光分布 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(4): 505-508.
- [5] Sutton S B, Albrecht G F. Simple analytical method to calculate the radial energy deposition profile in an isotropic diode-pumped solid-state laser rod [J]. Appl Opt, 1996, 35(30): 5937-5947.
- [6] Xie Wenjie, Tam Suichung, YeeLOY Lam, et al. Influence of the thermal effect on the TEM<sub>00</sub> mode output power of a laser-diode side pumped solid-state laser[J]. Appl Opt, 2000, 39(30): 5482-5487.
- [7] Minassian A, Thompson B, Damzen M J. Ultrahigh-efficiency TEM<sub>00</sub> diode-side-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. Applied Physics B, 2003, 76(4): 341-343.
- [8] Xie Wenjie, Tam Sui-chong, Lam Yee-loy, et al. Thermal and optical properties of diode side-pumped solid state laser rods[J]. Optics and Laser Technology, 2000, 32: 193-198.

## 下期预览

# 基于同步脉冲光源的抗环境红外 FTIR 多点触摸算法

李江晨, 徐小维, 韩君佩, 胡 昱, 邹雪城

(华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 多点触摸技术已应用在生活的诸多方面, 带来了人机交互上的巨大便利。在多种新型的基于视觉的多点触摸技术中 FTIR 技术是极具潜力的优势技术, 但是该技术会受环境红外噪声干扰, 不能有效识别日光环境下的手指触点信号。针对环境红外噪声干扰的问题, 提出了一种基于同步脉冲光源的相邻帧差算法 (SPLA) 使得 FTIR 技术具有良好的抗环境红外噪声的特点, 可在日光环境中有效识别手指触点。同时还构建了嵌入同步脉冲光源的多点触摸硬件平台, 实现了 SPLA 算法, 并进行了大量的触摸实验。实验结果表明, 相比于传统的背景差算法, SPLA 算法的触点对比度提高了将近 3.5 倍, 可以准确地识别出触摸点。鉴于硬件实现的通用性, SPLA 算法还可应用到其他多点触摸平台, 具有较强的可移植性。