

文章编号: 0253-2239(2003)01-57-06

二极管侧面抽运条件下工作物质增益分布特性研究*

赵 鸿¹ 姜东升¹ 王建军¹ 赵海霞¹ 周寿桓¹ 李松山¹ 陈国夫²

1 华北光电研究所, 北京 100015

2 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710069

摘要: 通过计算机模拟, 研究了二极管侧面抽运条件下工作物质的增益分布特性, 讨论了抽运结构各参量对增益分布特性的影响, 比较了灯抽运与二极管抽运条件下工作物质增益分布的差别, 并就其对激光光束质量的影响进行了初步的探讨。

关键词: 激光技术; 二极管; 侧面抽运; 工作物质; 增益分布特性

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

1 引 言

近年来, 随着激光二极管技术水平的迅速提高和制造工艺的日臻完善, 二极管抽运固体激光技术也取得了长足的进步, 抽运方式多种多样, 技术手段日新月异, 掀起了固体激光技术领域的一场革命^[1-8]。

在二极管抽运固体激光技术中, 侧面抽运是一种结构相对简单但却十分有效的抽运方式。侧面抽运条件下, 二极管发射的抽运光从侧面进入工作物质, 结构上容易实现大功率二极管抽运, 从而获得大功率激光输出^[9,10]。但是, 在侧面抽运条件下, 抽运光与激光器谐振腔模的空间匹配程度较低, 导致激光光束质量变差。

然而, 我们在研究中发现, 二极管侧面抽运条件下, 通过对抽运结构的合理设计及优化, 能够在很大程度上改善工作物质中的增益分布特性, 使激光器在大功率侧面抽运条件下同样获得高光束质量激光输出^[11,12]。本文试图通过对工作物质内增益分布特性的研究和计算机模拟, 从增益分布的角度对二极管侧面抽运条件下获得高光束质量激光的原因进行一些理论探讨。

2 数学模型

激光二极管基横模的光强可表示为

$$I(x, y, z) = I_0 \exp \left[-2 \left| \frac{x^2}{w_x^2(z)} + \frac{y^2}{w_y^2(z)} \right| \right], \quad (1)$$

其中 $w_x(z)$ 和 $w_y(z)$ 分别是厄米-高斯光束在 z 处 (光沿 z 轴传播) 沿 x 轴和 y 轴的半宽度:

$$w_x(z) = \lambda_p z / (\pi w_{ox}), \quad (2)$$

$$w_y(z) = \lambda_p z / (\pi w_{oy}), \quad (3)$$

式中 λ_p 为二极管发射波长, w_{ox} 和 w_{oy} 为光束在二极管输出端的半宽, 对于大功率二极管, 其典型值 $w_{ox} \approx 1 \mu\text{m}$, $w_{oy} \approx 50 \sim 300 \mu\text{m}$ 。由于衍射作用, x 方向上的远场发散角全角约为 40° , y 方向上的远场发散角全角约为 10° 。

实际的二极管侧面抽运固体激光器中, 为了提高单位面积内抽运光功率密度和二极管的集成度, 都是采用多个二极管串联方式工作: 多个二极管沿 y 轴方向排列成一条直线, 相邻间距离很小, 这些二极管组合在一起, 形成条状的二极管阵列。由于这些二极管排列得很密集, 它们发射的抽运光束在 y 轴方向上相互交叠。另一方面, 二极管排列方向 (y 轴方向) 与工作物质的轴线相互平行。可以认为, 除两端外, 工作物质的其余部分在其与轴线方向垂直的横截面内, 抽运情况完全相同。因此只需计算增益在工作物质横截面上的分布情况就可知道整个工作物质的增益分布特性。

为此, 只考虑激光二极管在 x 轴方向上光束的空间分布特性, 消去 y 轴分量, (1) 式可表示为

$$I(x, z) = A \exp \left[-2 \left| \frac{x^2}{w_x^2(z)} \right| \right], \quad (4)$$

其中系数 A 由下式确定

* 国防科技重点实验室基金资助课题。

E-mail: zhaohong-2000@263.net

收稿日期: 2002-01-10; 收到修改稿日期: 2002-03-25

$$A = \int I(x, y, z) dy / \exp\left[-2\left|\frac{x^2}{w_x^2(z)}\right|\right] = I_0 \exp\left[-2\left|\frac{x^2}{w_x^2(z)}\right|\right] \int \exp\left[-2\left|\frac{y^2}{w_y^2(z)}\right|\right] dy / \exp\left[-2\left|\frac{x^2}{w_x^2(z)}\right|\right] = I_0 \int \exp\left[-2\left|\frac{y^2}{w_y^2(z)}\right|\right] dy. \quad (5)$$

工程上,为了计算上的方便,还可以用极坐标来表示二极管在 xoz 平面内光束的空间分布特性:

$$I(\theta) = A' \exp\left[-2\left|\frac{\theta^2}{\theta_0^2}\right|\right], \quad (6)$$

其中 θ 是实际光线传播方向与二极管发射光轴间的夹角, θ_0 为光束发散角半宽度。(4) 式和(6) 式所表征的二极管发射光束的空间分布特性完全一致。

由(6) 式可以看出,对于确定的 θ 值,相应的 $I(\theta)$ 值的大小也是确定的。 $I(\theta)$ 表示了在与二极管发射光轴成 θ 角的方向上,光线所携带的抽运光能量的相对大小。这样可以把抽运光束的空间分布特性用携带一定抽运光能量、具有一定传播方向的光线组表示。如果在 xoz 空间中对 θ 角进行 180° 扫描,就可以得到激光二极管输出光束在整个空间能量的分布特性。这就是二极管侧面抽运条件下,抽运光束空间分布特性的数学表述。

为了精确描述工作物质内部各处对抽运光的吸收,必须对工作物质内部进行细分,更确切的说是对工作物质的横截面进行细分。被细分后,工作物质内的每一部分,都可以用由唯一坐标确定的单位面积元来表示。单位面积元越小,对工作物质内特性的刻画就越细致。在计算机模拟中,我们规定工作物质细分后的基本面积单元为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 的矩形。

工作物质对抽运光的吸收可表示为

$$P_{\text{ab}} = P_{\text{in}}[1 - \exp(-\alpha l)], \quad (7)$$

其中 P_{in} 为抽运光入射光功率, α 为工作物质的吸收系数。 l 为光线穿过该基本单元的长度。

计算机模拟的具体步骤是,首先根据(6) 式计算出特定方向上光线的方程表示和能量大小。然后对该光线的传播路径进行追迹。当光线进入工作物质后,要确定出光线经过的所有基本单元的坐标,并按(7) 式计算每一基本单元吸收的光功率,每一基本单元吸收的光功率值与该处基本单元的坐标唯一对应。最后,对所有方向上的光线进行上述操作,工作物质中的各基本单元各自对所有穿过该单元的光线对该单元贡献的抽运光功率叠加。这样,就可得到工作物质内部各处对抽运功率吸收的强度分布情况。由于工作物质内部各处吸收的抽运功率与增益强度成正比,因此也就得到了工作物质内部的增益分布情况。

3 数值计算结果

图 1 是计算机模拟的单个二极管直接侧面抽运圆棒状 Nd:YAG 的情况。Nd:YAG 的尺寸为 $\phi 4 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$, 掺杂的原子分数为 0.011, 吸收系数约为 4.0 cm^{-1} [5]。二极管输出端与 Nd:YAG 边缘相距 0.5 mm, 发散角半宽度为 20° 。计算机模拟时必须考虑到由于 Nd:YAG 侧面粗糙,破坏了光线的折射条件,使抽运光在工作物质表面未发生光路偏折所带来的影响。

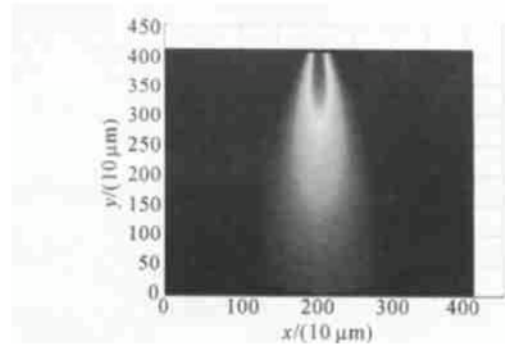


Fig. 1 Computer modeling of gain distribution in working medium side-pumped by single diode bar

图 1 描述的二极管直接侧面抽运结构一般只适用于功率很小或重复频率较低的以脉冲方式工作的激光器中。如果要使激光器在高平均功率或高重复频率条件下长时间工作,必须对工作物质进行冷却。实际上,都是采用 Nd:YAG 棒外装半径较大的石英套管,在 Nd:YAG 与石英套管的夹层中通水的方式进行冷却的。在这种条件下,二极管发光面与工作物质间距离较远,抽运光线先后穿行石英、水和工作物

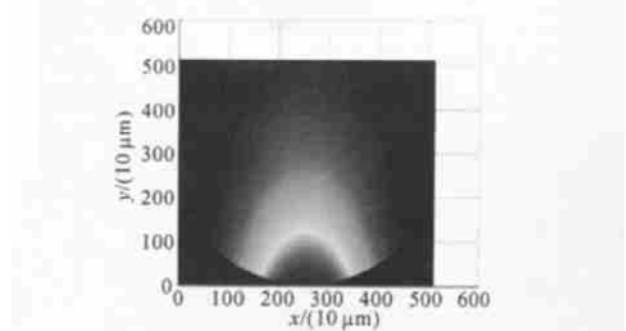


Fig. 2 Computer modeling of gain distribution in working medium side-pumped by single diode bar with cooling system

质时都产生折射。所以计算时也相对复杂一些。图 2 模拟的二极管侧面抽运系统的参量是: Nd: YAG 的尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$, Nd: YAG 的掺杂的原子分数为 0.011, 吸收系数约为 4.0 cm^{-1} 。石英套管外径为 $\phi 12 \text{ mm}$, 内径为 $\phi 10 \text{ mm}$, 二极管输出端与石英外边缘相距 $d = 4 \text{ mm}$, 发散角半宽度为 20° 。

由图 1、图 2 可以看出, 二极管单方向侧面抽运条件下, 工作物质内增益分布很不均匀, 这将使激光在谐振过程中产生严重的畸变, 导致输出激光光束质量下降。

要获得理想的增益分布, 采用多只二极管等间距环绕抽运是一种较好的解决办法。图 3 是计算机模拟的三只二极管直接侧面抽运条件下工作物质中

增益分布情况, 其抽运结构参量与图 1 的情况相同。

图 4 是计算机模拟的五只激光二极管等间距环绕抽运 Nd: YAG 的增益分布。其抽运结构的参量与图 2 的情况相同。

图 5 的抽运结构与图 4 的基本相同, 唯一的不同在于激光二极管输出端与石英管外边缘相距更远, 为 14 mm 。

图 6 是带有准直透镜的五只二极管等间距环绕抽运 Nd: YAG 增益分布的计算机模型。其抽运结构的参量与图 4 的情况相同, 但与图 4 情况不同的是, 在这种情况下, 五只二极管发射端装有准直透镜, 将二极管发射的发散角为 40° 的抽运光束压缩至 4° 。

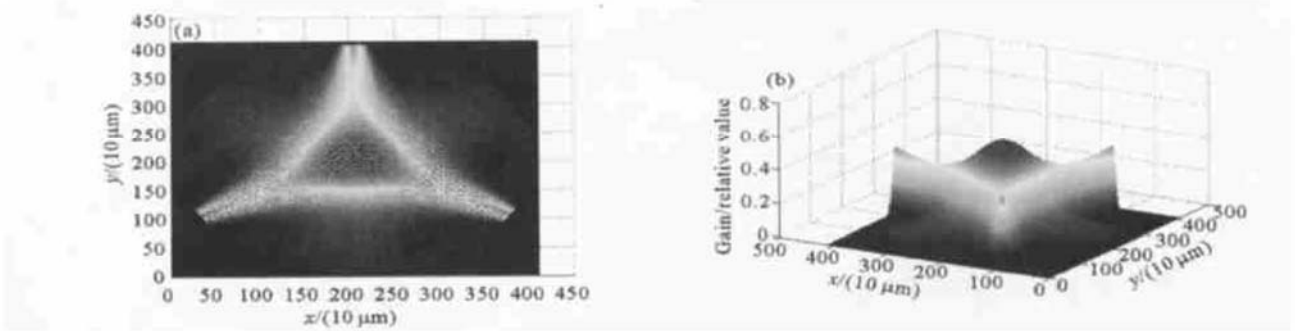


Fig. 3 2D (a) and 3D (b) computer modeling of gain distribution in working medium side pumped by three diode bars

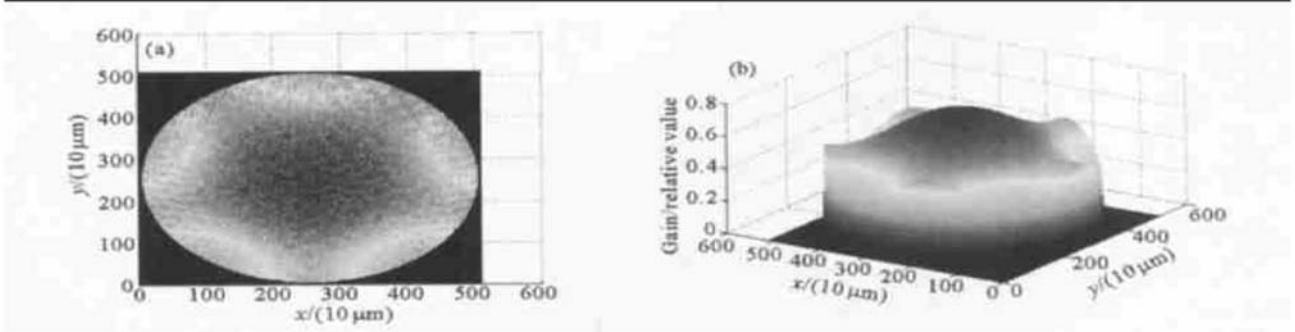


Fig. 4 2D (a) and 3D (b) computer modeling of gain distribution in working medium side pumped by five diode bars with cooling system. $d = 4 \text{ mm}$

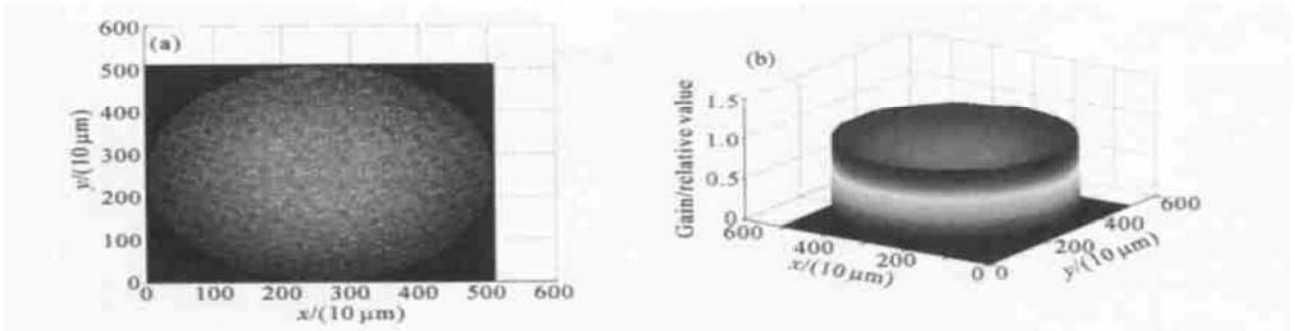


Fig. 5 2D (a) and 3D (b) computer modeling of gain distribution in working medium side pumped by five diode bars with cooling system. $d = 14 \text{ mm}$

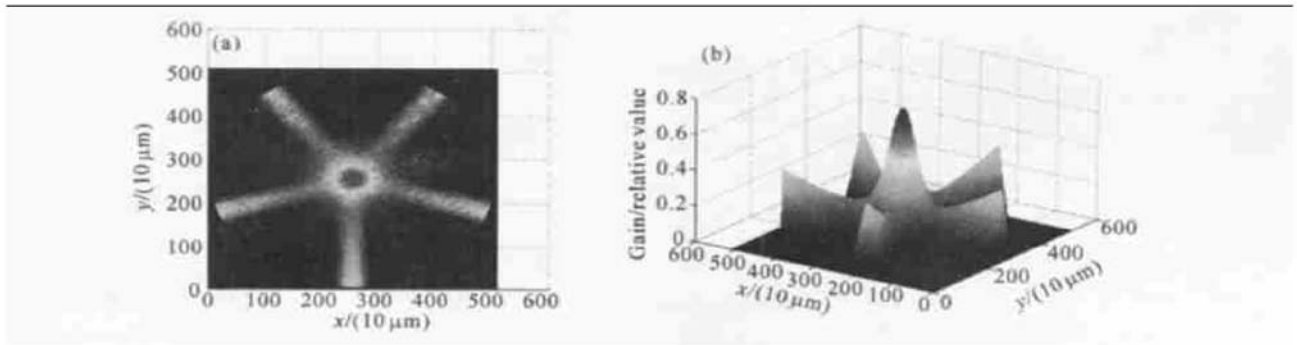


Fig. 6 2D (a) and 3D (b) computer modeling of gain distribution in working medium side pumped by five diode bars with collimate lens system. $d = 4$ mm

由上面的讨论可以知道,多只二极管等间距环绕抽运能够使工作物质内增益分布特性大为改善,环绕抽运用的二极管越多,工作物质中的增益分布就越理想。除此之外,二极管侧面抽运条件下,工作物质的半径、吸收系数、二极管的发散角及二极管输出端与工作物质间的距离等参量的变化都会对增益分布产生一定的影响。我们用计算机模拟不同实验参量,可以得到以下结论:

1) 工作物质内增益分布特性实际上是指工作物质内各区域间增益分布的相对大小,它只与二极管抽运结构参量和工作物质的吸收系数有关,而与抽运功率无关。一旦抽运结构参量和吸收系数确定了,相应的增益分布特性也就确定了。抽运功率的大小只会影响工作物质内各区域增益的绝对大小,而不会改变工作物质内各区域间增益的分布的相对大小,也就是说不会改变工作物质内的增益分布特性。

2) 其它条件不变的情况下,等间距环绕抽运用的激光二极管越多,工作物质中心处的增益就越高,增益分布沿工作物质径向变化的趋势就越明显。这种增益分布能够较好地与激光谐振腔低阶模甚至与基模匹配,从而提高输出激光的光束质量。

3) 其它条件不变的情况下,二极管输出端与工作物质的距离越近,工作物质靠近中心的区域对抽运光的吸收就越多,但抽运的均匀性就越差;二极管输出端与工作物质的距离越远,抽运的均匀性就越好,但工作物质中心区的吸收就越少。由于目前二极管的抽运功率有限,价格又较高,尽力提高运转效率是研制激光二极管抽运固体激光器的主要任务之一。所以通常情况下,二极管应尽量靠近工作物质。

4) 二极管抽运光束的发散角越小,工作物质中心区域的增益就越高,但边缘处增益就越不均匀。

由于只需考虑二极管 x 轴方向上的发散角,光学准直-聚焦系统的设计相对简单。

5) 工作物质的掺杂浓度越低,吸收系数就越小,抽运的均匀性就越好,但总的吸收效率下降。实际上,这可以通过在二极管抽运的工作物质的另一端面加装反射材料来改善。

当然,在对抽运系统进行优化设计时,应该综合考虑上述的各种因素的影响,并根据激光器性能指标的总体要求取舍。

4 增益分布的实验研究

由激光原理可知,在工作物质中,增益越高的区域自发辐射和受激辐射就越强,产生的荧光强度也越大。因此,可以通过测量工作物质的荧光分布特性比较直观地研究工作物质的增益分布特性。实验中,我们是用 Coherent 公司的光场分析仪来测定工作物质的荧光分布的。

图 7 是实测的二极管直接侧面抽运条件下工作物质的荧光分布。Nd:YAG 的尺寸为 $\phi 4$ mm \times 80 mm,掺杂的原子分数为 0.011,吸收系数约为 4.0 cm^{-1} 。二极管输出端与 Nd:YAG 边缘相距 0.5 mm,发散角半宽度为 20° 。

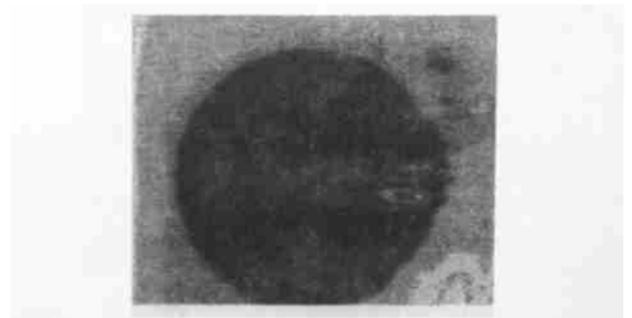


Fig. 7 Experimental result of fluorescence distribution in working medium side pumped by single diode bar

图 8 是实测的具有水冷结构的单管二极管侧面

抽运条件下工作物质的荧光分布。Nd: YAG 的尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$, Nd: YAG 的掺杂原子分数为 0.011, 吸收系数约为 4.0 cm^{-1} 。石英套管外径为 $\phi 12 \text{ mm}$, 内径为 $\phi 10 \text{ mm}$, 二极管输出端与石英外边缘相距 4 mm, 发散角半宽度为 20° 。

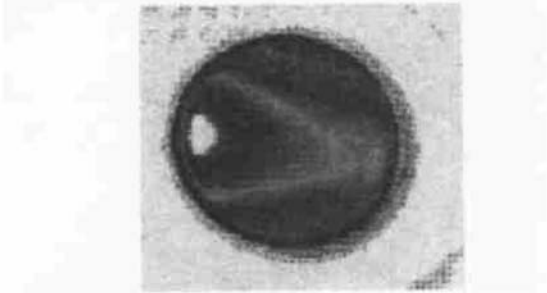


Fig. 8 Experimental result of fluorescence distribution in working medium side-pumped by single diode bar with cooling system

图 9 是实测的五只二极管等间距环绕抽运 Nd: YAG 的荧光分布。其抽运结构的参量与图 4 情况相同。

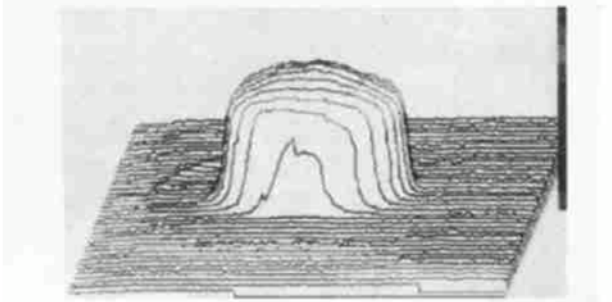


Fig. 9 Experimental result of fluorescence distribution in working medium side-pumped by five diode bars with cooling system

由实测结果可以看出, 前面通过计算机模拟的各种二极管侧面抽运条件下工作物质的增益分布特性, 与通过实验测得的各种对应情况下工作物质的荧光分布特性完全一致, 理论与实验完全符合。

5 灯抽运条件下工作物质内增益分布特性研究

在传统的固体激光器中, 闪光灯发射的抽运光在空间上是均匀分布的, 没有方向性。虽然采用各种高效聚光腔结构可以将抽运光汇集到工作物质当中, 但大部分抽运光能量都被靠近工作物质边缘的区域所吸收, 最终形成边缘高、中心低的火山口型增益分布, 如图 10、图 11 所示。这种分布特性容易导致激光谐振腔的高阶模振荡。因此, 在灯抽运的固体激光器中, 必须通过采用选模措施才能得到较好

的光束质量, 而这通常是以牺牲效率为代价的。

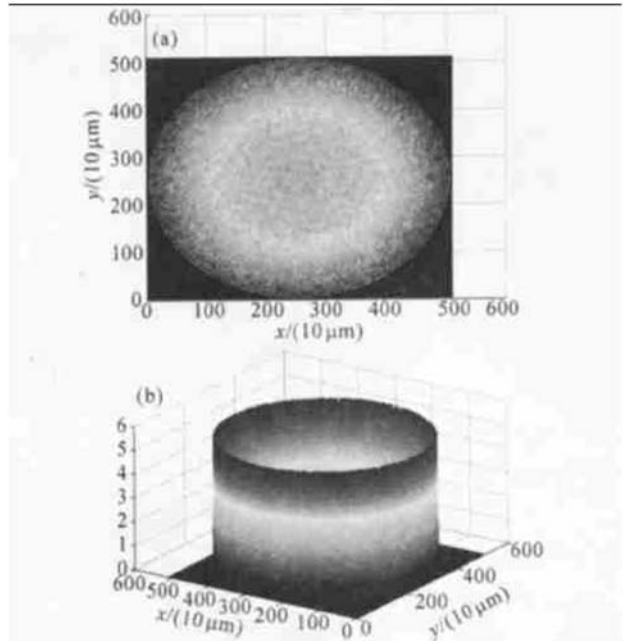


Fig. 10 2D (a) and 3D (b) computer modeling of gain distribution in working medium pumped by flashlamp

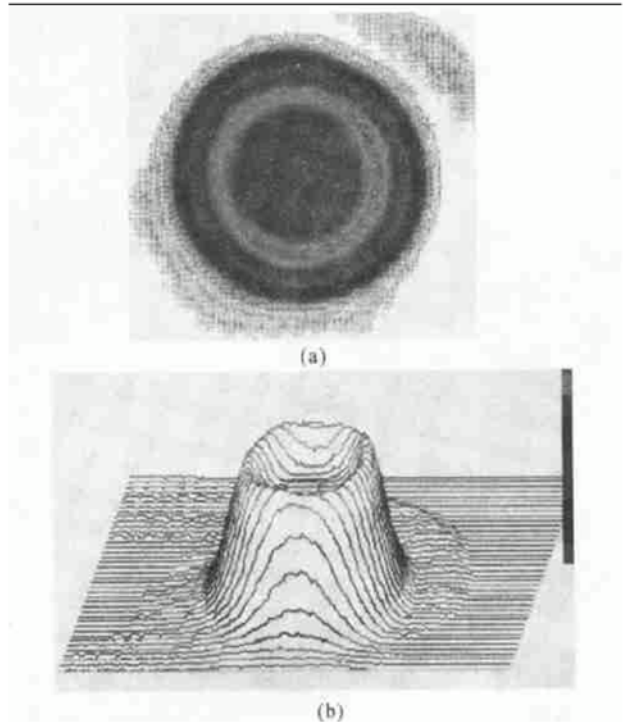


Fig. 11 2D (a) and 3D (b) experimental result of gain distribution in working medium pumped by flashlamp

结论 激光二极管发射的抽运光具有方向性好、能量相对集中的特点, 因此当用单个二极管作为光源抽运工作物质时更容易引起工作物质增益分布的不均匀, 并会因此而导致温度分布不均匀, 工作物质热畸变, 激光光束质量下降等一系列不良后果。

但在二极管侧面抽运条件下, 工作物质的增益分布特性与等间距环绕抽运的激光二极管的个数、

激光二极管输出端与工作物质间的距离、激光二极管的发散角、工作物质的半径、吸收系数等参量有关。因此可以通过对这些参量的优化设计,能够得到比较理想的增益分布,使激光器能够在高功率抽运条件下,得到高效率、高光束质量的激光输出。

实验中,我们正是采用了图 4 所示的抽运结构,在二极管抽运总功率约 700 W 的条件下,采用 KTP 晶体腔内倍频,实现了 98 W 的 532 nm 波长倍频激光输出, M^2 因子约为 20 左右,这是传统灯抽运固体激光器难以实现的。

参 考 文 献

- 1 Kane T J, Byer R L. Monolithic, unidirectional single mode Nd: YAG ring Laser. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(2): 65~ 67
- 2 Zhou Shouhuan, Lee K K, Chen Y C. Monolithic self Q-switched Cr, Nd: YAG laser. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(7): 511 ~ 512
- 3 Chen Yungfu, Lan Y P, Wang S C. Efficient high-power diode end-pumped TEM₀₀ Nd: YVO₄ laser with a planar cavity. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(14): 1016~ 1018
- 4 Honea E C, Beach R J, Mitchell S C. 183 W, $M^2 = 2.4$ Yb: YAG Q-switched laser. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(3): 154~ 156
- 5 Brioschi F, Nava E, Reali G C. Gain shaping and beam quality in diode-laser multiarray side-pumped solid-state lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **QE-28**(4): 1070~ 1074
- 6 Alcock A J, Bernard J E. Diode-pumped grazing incidence slab lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1997, **QE-3**: 3~ 8
- 7 Lai S T, Patent U S. 4942586, 1990
- 8 Baer T M, Head D F, Gooding P *et al.*. Performance of diode-pumped Nd: YAG and Nd: YLF lasers in a tightly folded resonator configuration. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **28**(4): 1131~ 1138
- 9 Stamm U, Zschocke W, Nikolaus B *et al.*. Multiple watts ultraviolet power from a diode-pumped solid-state laser at 1 kHz repetition rate. *Proc. SPIE*, 1997, **2991**: 194~ 200
- 10 Kiriya H, Nishida K, Yamanaka M *et al.*. Laser diode pumped eight pass Nd: YAG slab amplifier. *Proc. SPIE*, 1998, **3264**: 30~ 36
- 11 Zhao Hong, Jiang Dongsheng, Wang Jianjun *et al.*. Experiment research of 200 Hz repetition rate Q-switched TEM₀₀ mode Nd: YAG Laser side pumped by laser diode array. *Chinese J. Lasers (中国激光)*, 2000, **A27**(11): 965 ~ 968 (in Chinese)
- 12 Wang Jianjun, Jiang Dongsheng, Zhao Hong *et al.*. Research on diode side-pumped TEM₀₀ mode lasers. *Laser and Infrared (激光与红外)*, 2000, **30**(5): 286~ 288 (in Chinese)

Gain Distribution Characteristics in Working Medium Side-Pumped by Diode Bars

Zhao Hong¹ Jiang Dongsheng¹ Wang Jianjun¹ Zhao Haixia¹
Zhou Shouhuan¹ Chen Guofu²

1 North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015
2 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

(Received 10 January 2002; revised 25 March 2002)

Abstract: With computer modeling and experimental test, the gain distribution characteristics in the working medium side-pumped by diode bars are studied. The effect of system parameters change on gain distribution is analyzed. The difference of gain distribution characteristics between diode-side-pumped and lamp pumped are compared. The Effect on laser beam quality is discussed.

Key words: laser technique; diode bar; side-pumped; working medium; gain distribution characteristics