

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0026-04

激光二极管横向漫反射抽运掺钕钒酸钆 45 W 线偏振输出激光器

戴特力¹, 范嗣强¹, 王 莉¹, 廖海泉², 邱 港²

(¹重庆师范大学物理学与信息技术学院, 重庆 400047)
(²海泰光电技术有限公司, 山东 青岛 266100)

摘要 抽运单元由 3 个硅微沟道冷却器封装的 40 W 连续激光二极管条构成。两个抽运单元组成一个抽运头, 横向抽运安放在平行平面腔内直径 3 mm, 长 60 mm 的 Nd:GdVO₄ 晶体。该激光器输出了 45 W 线偏振激光束, TEM₀₁* 模。10 W 时输出基模, 用扫描法测得基模光斑直径 3.9 mm, 光强分布接近高斯分布。

关键词 激光技术; 激光二极管横向抽运; 硅微沟道冷却器; 陶瓷漫反射瓦; 掺钕钒酸钆

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

Diffusive Reflector-Type Laser Diode Side-Pumped Nd:GdVO₄ Rod Laser with Line Polarization Output of 45 W

DAI Te-li¹, FAN Si-qiang¹, WANG Li¹, LIAO Hai-quan², QIU Gang²

(¹ Physics and Info-Technic College, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)
(² Crystech Incorporated, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract The pumping unit consists of three 40 W CW laser diode bars mounted on modular silicon micro-channel cooled heat sinks. Two pumping units are used to assemble one pump head with a Nd:GdVO₄ crystal rod of $\phi 3 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ side-pumped. The laser with parallel-plane optical resonator emits 45 W CW laser beam with TEM₀₁* mode pattern and line polarization. When the laser has 10 W output, the mode pattern is TEM₀₀ with 3.9 mm diameter measured by scan method of micro-duct and near Gaussian radial intensity distribution.

Key words laser technique; laser diode side-pumped; silicon micro-channel cooler; pottery diffusive reflector; Gadolinium vanadate doped with neodymium

1 引 言

掺钕钒酸钆因其受激辐射截面大, 对 808nm 波长吸收频带宽, 能输出线偏振激光^[1]而适于制作声光调制频率可高于 300 kHz 的激光二极管抽运的连续激光器。端面激光二极管抽运 Nd:GdVO₄ 激光器的实验^[2]及其热效应理论^[3]国内已有报道, 横向抽运的工作尚少见报道。

2 抽运单元的结构

每个抽运单元内有三个连续 40 W 的激光二极管条, 以晶体棒轴线对称放置, 如图 1。

激光二极管输出光束的线偏振方向平行于钒酸钆晶体的 *a* 轴, 也就是垂直于 *c* 轴(光轴)。40 W 连

续激光二极管条是用硅微沟道冷却器封装的, 该冷却器件是重庆师范大学利用自己的发明专利和设备制作的。Nd:GdVO₄ 晶体是海泰光电技术有限公司控制并切割加工的^[1]。Nd 三价离子的掺杂原子数分数为 0.9%, 沿 *a* 轴方向切割。按图 1 的位置安放激光二极管条和晶体棒, 抽运光对激光棒形成横向激励。

晶体棒置于通过冷却水的石英管中, 石英管外紧贴着安置有三个陶瓷反光瓦。每个漫反射瓦正对一个激光二极管条, 三个漫反射瓦固定后形成宽 1.3 mm 的三个狭缝。三个激光二极管条正对狭缝, 它的 pn 结面在晶体轴的子午面内, 互成 120° 二面角。激光二极管条发射的光束经微柱透镜聚束后,

作者简介: 戴特力(1940—), 男, 重庆丰都人, 重庆师范大学教授, 主要从事激光二极管抽运固体激光器, 物质和强激光相互作用两方面的研究。E-mail: daitelil@public.cta.cq.cn

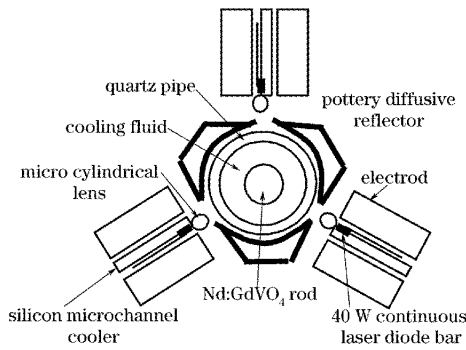


图 1 抽运单元结构示意图

Fig. 1 Structure scheme about one pumping unit

快轴方向发散角从 45° 压缩到 4° 。抽运光束穿过石英管壁和冷却水层落到晶体表面。打毛的晶体表面使约 5% 的光漫反射到漫反射瓦, 约 95% 的抽运光穿过晶体, 一部分被晶体吸收, 剩余部分被陶瓷反射瓦的柱面散射到各方向。其中一部分再次穿过晶体棒, 被再次吸收。经多次漫反射, 抽运光强最终将均匀分布在抽运腔陶瓷壁内表面。

3 Nd:GdVO₄ 晶体的特点

用 Czochralski 法制作的掺钕钒酸钷 (Nd:GdVO₄, Gadolinium Vanadate doped with neodymium) 是一种适于激光二极管抽运的激光材料。与 Nd:YAG 相比, 掺钕钒酸钷有较大的吸收和受激发射截面, 对 808 nm 抽运光的吸收截面和 $1.06 \mu\text{m}$ 的受激发射截面分别是 Nd:YAG 的 4 倍和 3 倍。热传导率也高, 稍低于 Nd:YAG, 高于 Nd:YVO₄。热膨胀系数低于 Nd:YVO₄, 折射率随温度的变化率 (dn/dT) 高于 Nd:YVO₄。连续激光运行 ($1.06 \mu\text{m}$ 或 $1.34 \mu\text{m}$) 和腔内倍频 (KTP 或 LBO) 的斜率效率和光转换效率均高于 Nd:YVO₄。Nd:GdVO₄ 的分子式为 $\text{Gd}_{0.99}\text{Nd}_{0.01}\text{VO}_4$, Nd³⁺ 离子的原子掺杂百分浓度为 1.0 ± 0.1 。晶体结构是四方晶系, 空间群是 $I4_1/amd$ 。对 1064 nm 的折射率 $n_o = 1.98535$, $n_e = 2.19831$ 。对应波长 1062.9 nm 的激光跃迁是 $^4F_{3/2} - ^4I_{11/2}$ 。受激发射截面 ($E \parallel c$, 即 π 偏振, 1064 nm) 为 $7.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, 吸收截面 ($E \parallel c$, 即 π 偏振, 808 nm) 为 $4.9 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 。荧光寿命约为 95 μs 。峰值吸收系数约为 57 cm^{-1} 。晶格常数, $a = b = 0.721 \text{ nm}$, $c = 0.635 \text{ nm}$ 。

在实际激光器运行中, Nd:GdVO₄ 晶体切割方向对激光效率有较大的影响, 因为吸收和受激发射的截面与晶体光轴的取向有关。在本实验中, 晶体的轴向

是激光传播方向, 沿 a 轴切割的晶体纵轴自然与 c 轴垂直, 激光也就自然沿光轴偏振, 因为这种 π 偏振状态的受激发射截面最大。同时, 对于 808 nm 的抽运光而言, 偏振方向与光轴垂直, 形成 σ 偏振方式, 致使晶体对 808 nm 抽运光吸收截面较小。

4 激光器结构和实验方案

激光谐振腔由两个 $\phi 20 \text{ mm}$ 的平面镜相距 190 mm 构成, 输出镜对 1064 nm 激光的反射率为 87%。海泰光电技术有限公司提供的 Nd:GdYVO₄ 晶体棒, 直径 3 mm, 长 60 mm, 安放在正中。 $\phi 10 \text{ mm}$ 石英管长 60 mm, 通过两端铜法兰盘上的 O 形橡胶圈密封, 通冷却水。安有不锈钢套的晶体棒长 100 mm, 插入石英管, 依靠两端铜法兰盘上另一对同心的较小 O 形橡胶圈密封, 棒套伸出法兰盘。完整的抽运单元外径有 50 mm, 厚 17 mm, 中心孔 $\phi 10 \text{ mm}$, 刚好能穿过石英管。三个柱面陶瓷漫反射瓦与石英管有一间隙。先把两个抽运单元套在石英管上, 再用法兰盘密封^[4]。

一个 18 V, 50 A 的直流恒流电源给串连的两个抽运单元供电, 相当于给串连的 6 个 40 W 连续激光二极管条供电。该电源是线性的 (北京大华公司制作)。

自制的冷水机给 6 个硅微通道供水, 微通道冷却水沟道并联, 供水压力 0.55 MPa, 水流量 75 L/h, 冷却水温度的控制精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。通过对水温的控制调整激光二极管的发射波长, 使之与晶体棒实现光谱耦合, 达到最大输出功率。通常的水温是 20°C 。

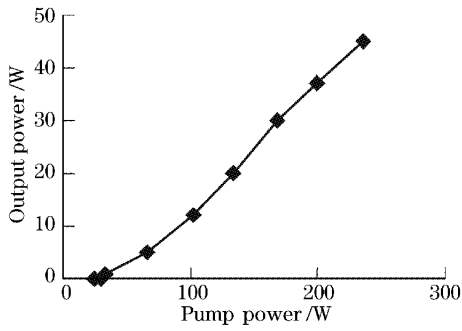
连续功率的测试是用量程 200 W 的功率计 (中国科学院物理所物科公司制造) 进行的。

在此激光器上进行了抽运-输出功率曲线测试、光斑强度分布测试和线偏振光检验等实验。

5 实验结果

实验测得的输出功率随抽运功率的变化如图 2 所示。抽运光功率最大, 即 240 W 时, 输出功率为 45 W, 转换效率为 18.75%。估计曲线的斜率效率为 22.5%。用有 64 个灰度等级的热敏纸放在激光光路上, 距束腰 1 m 处, 可得到光斑的热成像。当输出功率为 10 W 时, 光斑为基模; 20~45 W 时均为 01^+ 模, 即 01 混合模。

陶瓷壁内表面漫反射的抽运光可以看作 Lambertian 体的发射光, 是相同点光源的集合^[5]。

图 2 Nd:GdVO₄激光器的输出-抽运功率曲线Fig. 2 Output-pump power Curve of Nd:GdVO₄ laser

有百分比为 γ 的光从抽运光射入的狭缝逃逸。 γ 等于狭缝面积比陶瓷反射表面所在柱面的总面积(一个抽运单元内),称为抽运光的逃逸率。

设 Nd:GdV₄ 晶体对 808 nm 抽运光的吸收系数 α 为 3.14 cm^{-1} , 晶体棒的直径 d 为 3 mm, 光缝宽度 e 为 1.3 mm, 漫反射瓦的反射率 R_1 为 0.97, 柱面半径 r 为 6 mm, 瓦的纵向长度 L 为 13 mm, 便可以计算 γ 和棒的吸收功率。

$$\gamma = 3Le/(2L\pi r) = 3e/(2\pi r) \approx 0.10, \quad (1)$$

计算进入抽运腔功率被吸收的比例, 要考虑微柱透镜聚光效率 $\eta_1 = 85\%$, 石英管的透过率 $\eta_2 = 96\%$, 晶体棒直接吸收效率 η_3 和漫反射吸收效率 η_4 。以 η_a 表示总吸收效率, 则有

$$\eta_a = \frac{P_{\text{abs}}}{P_{\text{in}}} = \eta_1 \eta_2 (\eta_3 + \eta_4) = \eta_1 \eta_2 \left[\eta_3 + (1 - \eta_3) \frac{(1-l)t\eta_{\text{diff}}}{l + (1-l)t\eta_{\text{diff}}} \right], \quad (2)$$

其中, P_{abs} 为掺钕钒酸钆棒的吸收功率, P_{in} 为进入抽运腔的 808 nm 抽运光功率, l 为腔损耗率, 它包含腔壁光缝逃逸率 γ , 陶瓷表面吸收率 $(1-R_1)$ 和冷却水及石英管的吸收率 l_{other} , 亦即

$$l = \gamma + (1 - R_1) + l_{\text{other}} \approx 0.15, \quad (3)$$

t 为晶体棒表面的透过率, η_{diff} 表示晶体棒对陶瓷漫反射表面一个点作为 Lambertian 源的吸收率, 粗略估计为晶体棒直径与抽运腔直径之比,

$$\eta_{\text{diff}} \approx d/(2r) \approx 0.25, \quad (4)$$

晶体棒表面的透过率可估计为

$$t \approx \left[1 - \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \right]^2 = 0.9, \quad (5)$$

式中 n_1 和 n_2 分别为水和晶体的折射率 1.33 和 2.1, 后者为 Nd:GdVO₄ 晶体对 808 nm 抽运光(o 光和 e 光)的平均折射率。直接吸收率在理论上用 $\eta_3 = 1 - \exp(-\alpha l)$ 计算, 但不能用峰值吸收系数代入。

在 σ 偏振的情况下 Nd:GdVO₄ 的吸收系数与 Nd:YVO₄ 近似相等, 是 10 cm^{-1} 。根据 808 nm 附近吸收峰的形状, 平均吸收系数约为 1 cm^{-1} , 其 η_3 的值为 0.26。代入(2)式

$$\eta_a = 0.85 \times 0.96 \times [0.26 + (1 - 0.26) \times \frac{0.85 \times 0.9 \times 0.25}{0.15 + 0.85 \times 0.9 \times 0.25}] \approx 0.54. \quad (6)$$

上能级效率 η_u 等于量子效率 η_q 与斯托克斯效率 η_s 的乘积, $\eta_u = \eta_q \eta_s \approx 0.72$ 。谐振腔效率 η_{cav} 等于光束交叠效率 η_b (多模输出) 与耦合效率 η_c (表示腔内光子损耗) 的乘积

$$\eta_{\text{cav}} = \eta_b \eta_c \approx 0.6, \quad (7)$$

则输出功率 P_{out} 的理论值为

$$P_{\text{out}} = P_{\text{abs}} \eta_u \eta_{\text{cav}} = P_{\text{in}} \eta_a \eta_u \eta_{\text{cav}} \approx 120 \times 0.54 \times 0.72 \times 0.6 = 120 \times 0.25 = 28 \text{ W}. \quad (8)$$

两个抽运头输出的实际测量值是 45 W, 每个抽运单元的实际输出功率是 22.5 W, 实验值与计算值相对误差为 24%。

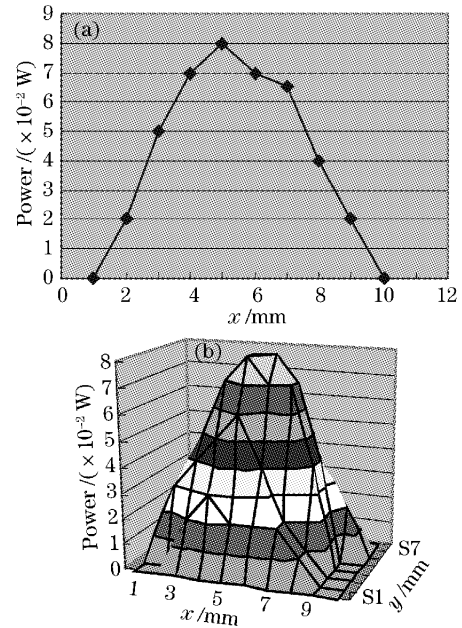


图 3 光强分布图。(a) 中央剖面, 峰值的 $1/e^2$ 即 0.011 坐标是 $x=1.6$ 和 $x=9.4$, 计算出的光斑直径为 3.9 mm; (b) 光斑的强度分布, 位置距谐振腔中央, 即束腰位置 940 mm

Fig. 3 Radial intensity distribution. (a) In the central section, the points which have the $1/e^2$ top value, 0.011 located at $x=1.6$ and $x=9.4$. The calculated diameter of the mode pattern is 3.9 mm; (b) radial intensity distribution of mode pattern which is located at 940 mm from waist

图 3 是用不锈钢针管扫描输出光斑得到的强度分布图。实验测量位置在离谐振腔中央,即距束腰 940 mm 处。输出功率 10 W,针管内径 0.4 mm,扫描步长 0.5 mm。

为了测试激光光束的偏振性质,在输出镜与功率计之间插入格兰-泰勒棱镜,并使其转动,以观察功率变化。发现其最大输出为 44.8 W,再转 90°角,输出测量值是零。

6 结 论

漫反射抽运的主要优点是输出光斑的强度分布“均匀”。这并不是指强度分布是平顶,而是指强度分布比较接近基模(10 W)或 TEM_{01*} 模(45 W)的理想分布,而没有三个峰突出在光斑边缘^[5]。

对比端面抽运(文献[2]),抽运光转换为输出光的效率下降了一倍。原因是抽运光与 Nd:GdVO₄ 棒的光轴成 σ 偏振配置,其吸收截面低。这也是大多数激光二极管抽运的 Nd:GdVO₄ 激光器采用端面抽运的原因。用微小的半波片插在抽运光进入抽运腔的窄缝上,或把激光二极管条垂直于棒的几何轴放置,

再用梯形波导板(lens duct)压缩光孔径,进入晶体棒的侧面,可实现吸收和发射均为 π 偏振的侧面抽运几何。

致谢 感谢熊玲玲,朱仁江参加部分测试工作。

参 考 文 献

- 1 Crystals & Optics Catalog 2005~2006 [C]. Crystech Inc. 35~36
- 2 Xu Fanghua, Ma Lili, Wwang Zhengping *et al.*. Laser diode-pumped Nd:GdVO₄ microchip laser [J]. *Chinese J. Laser*, 2005, **32**(9): 1166~1168
徐方华,马丽丽,王正平等. 激光二极管抽运 Nd:GdVO₄ 微片激光器 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1166~1168
- 3 Shi Ping, Li Long, Gan Ansheng *et al.*. Thermal effect research of end-pumped rectangle Nd:GdVO₄ crystals [J]. *Chinese J. Laser*, 2005, **32**(7): 923~928
史 彭,李 隆,甘安生等. 端面抽运矩形截面 Nd:GdVO₄ 晶体热效应研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(7): 923~928
- 4 Hee-Jong Moon, Jonghoon Yi, Jaemin Han *et al.*. Efficient diffusive reflector-type diode side-pumped Nd:YAG rod laser with an optical slope efficiency of 55% [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(9): 1772~1776
- 5 Nicolaie Pavel, Yoshihito Hirano, Syuhei Yamamoto *et al.*. Improved pump-beam distribution in a diode side-pumped solid-state laser with a highly diffuse, cross-axis beam delivery system [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(6): 986~992