

文章编号: 0258-7025(2003)11-0973-04

# LD 抽运免调试谐振腔被动调 Q 的固体激光器

程 勇<sup>1</sup>, 陈 波<sup>1</sup>, 王小兵<sup>1</sup>, 孙 斌<sup>1</sup>, 王古常<sup>1</sup>, 金煜坚<sup>2</sup>, 王鹏飞<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 武汉军械士官学校光电技术研究所, 湖北 武汉 430075; <sup>2</sup> 华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘要** 将免调试谐振腔应用于二极管抽运固体激光器, 采用 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体被动调 Q, 准连续二极管侧向非均匀抽运 Nd:YAG 激光棒, 传导冷却, KTP 腔外倍频, 具有结构紧凑、抗失调能力强的特点。获得了远场近似平顶高斯分布的激光输出, 输出波长 0.53 μm, 能量 52.2 mJ/pulse, 稳定性 0.5%, 电-光转换效率 3.4%, 脉宽 ~6 ns, 重复频率 10~40 Hz, 发散角 2.8 mrad。

**关键词** 激光技术; 免调试谐振腔; LD 非均匀侧向抽运; 高稳定性; Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## Study on Diode Pumped Solid Laser (DPSL) with Alignment-free Resonator

CHENG Yong<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>1</sup>, WANG Xiao-bin<sup>1</sup>,

SUN Bin<sup>1</sup>, WANG Gu-chang<sup>1</sup>, JIN Yu-jian<sup>2</sup>, WANG Peng-fei<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Optoelectronic Facility, Wuhan Ordnance Noncommissioned Officers School, Wuhan, Hunan 430075, China)  
(<sup>2</sup>North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract** An alignment-free resonator is used in diode pumped solid-state laser (DPSL). A compact anti-maladjusted passive Q-switched DPSL has been developed by quasi-CW diode uneven side-pumping, and using Cr<sup>4+</sup>:YAG passive Q-switch, conductive-cooling, KTP frequency doubling. The laser specifications are as follows: The wavelength is 0.53 μm with flattened Gaussian beam at far field, the energy is 52.2 mJ/pulse, the output stability is 0.5%, total efficiency is 3.4%, the pulse width is ~6 ns, the repetition rate is 10~40 Hz, and the divergence angle is 2.3 mrad.

**Key words** laser technique; alignment-free resonator; LD uneven side-pump; high stability; Cr<sup>4+</sup>:YAG passive Q-switch

## 1 引 言

鉴于空间在未来战争中的独特地位和作用, 世界各国都相继在飞机或卫星上安装了激光器, 用于激光测距、激光雷达、激光通讯及高能激光武器等。虽然激光二极管(LD)抽运固体激光器(DPSL)具有体积小、寿命长、可靠性高等优点, 并已成为激光领域的研究热点, 但普通腔型的 DPSL 在恶劣环境条件下易产生机械变形和热应力效应, 不能适应机载或卫星发射等情况下严峻的环境变化需要<sup>[1]</sup>。因此设计军用激光器时, 主要应考虑的因素是其对振动、冲击和大的温度变化等保持不灵敏, 系统的可靠运转比最佳性能显得更为重要。同时, 与灯抽运激光

器一样, 对于高功率侧向抽运的 DPSL, 要求抽运均匀, 否则会引起严重的热效应(热应力双折射和热透镜效应), 导致输出激光光束质量劣化, 并使谐振腔不稳定乃至停振<sup>[2]</sup>, 严重影响激光输出的稳定性和光束质量, 这是制约 DPSL 工程应用的因素之一。为了解决 DPSL 机械稳定性和热稳定性问题, 国内外研究机构做了大量的研究, 设计了各种腔型, 如折叠腔<sup>[3]</sup>、多板条稳定-非稳混合腔<sup>[4]</sup>、棱镜腔<sup>[5]</sup>等, 其中棱镜腔可提高光腔选模能力, 增加对失调的不灵敏性, 使器件的环境适应性大大增强<sup>[6]</sup>。美国 NASA 火星勘探器上 MOLA 系统, 采用 Porro 棱镜谐振腔 DPSL<sup>[1]</sup>, 用于火星激光测高。该激光器结

收稿日期: 2003-03-12; 收到修改稿日期: 2003-04-25

作者简介: 程勇(1961—), 男, 武汉军械士官学校光电技术研究所硕士生导师, 博士, 主要从事激光与光电子学研究。E-mail: gdyjs@263.net

构复杂, Porro 棱镜腔仍存在着失调灵敏方向, 需要用 Risley 楔镜准直调校, 使用不方便。我们采用免调试谐振腔,  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调 Q 方式, LD 阵列侧向抽运 Nd:YAG 棒, 获得 DPSL 高稳定度、高光束质量的激光输出。

## 2 激光器设计

### 2.1 免调试谐振腔

免调试谐振腔是指在遇有振动、冲击、温度突变等情况下, 具有装配后不经调试就能稳定输出高质量光束的一种激光谐振腔。其技术核心是: 工作物质放在谐振腔内, 其一端放置定向棱镜(形状相当于一个立方体切割下来的一个角, 底面为等边三角形或圆形等, 三个内表面互相垂直)作为谐振腔的全反射镜, 另一端放置输出镜, 构成免调试谐振腔。定向棱镜的顶点与输出镜垂足的连线即为光轴。该谐振腔具有如下特性:

1) 从定向棱镜底面入射进棱镜的光线, 经三个反射面全内反射后, 其出射光线反向平行于入射光线, 定向棱镜作为谐振腔的全反镜, 实现自准直和不失调功能;

2) 对于任何平行光线, 只要光线在三个反射面上依次反射, 其在棱镜内部所走的光程为一定值, 它等于从顶点到入射点和出射点连线中点距离的两倍。这一等光程特性在光学谐振腔中有着重要的意义: 定向棱镜作为谐振腔的全反镜, 其自身不会产生新的相位畸变;

3) 腔内振荡光线以棱镜顶点呈中心对称分布, 其物像关系为镜像, 如图 1。这一特性在激光谐振腔应用中有着特殊的意义: 定向棱镜作为谐振腔的全反镜, 要求其顶点置于光轴上。不但能保证有最大的模体积, 而且对腔内增益分布不均匀和相位畸

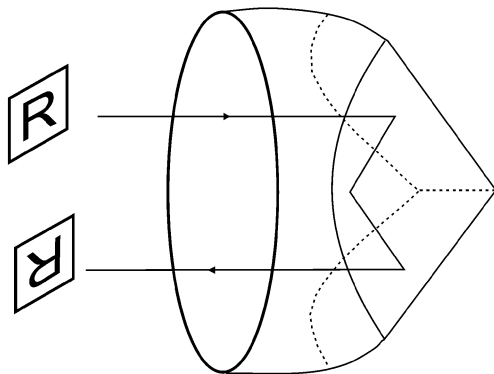


图 1 定向棱镜的物像关系

Fig. 1 Object-image relationship of directional prism

变起到一定的光学补偿作用。

### 2.2 侧向抽运几何

我们把抽运光从 LD 阵列出射, 经过光学系统聚束, 再按侧向耦合进入增益介质内, 与谐振腔的模体积成最大限度交叠的光路称为抽运几何。它直接影响激光器的冷却、效率和模式等指标。在侧向抽运中通常为多模运行, 因此设计的关键是提高抽运光在增益介质中激活区域与所要求的模式(通常是低阶模)在同一增益介质中所占体积的交叠程度。对于半径为  $a$  的圆柱体增益介质侧向抽运, 若均匀地分布在全棒, 其交叠积分(Overlap Integral)为<sup>[6]</sup>

$$J = 1/\pi a^2 L$$

当 LD 抽运功率不充分且侧向不均匀抽运时, 抽运功率在截面上增益分布是不均匀的, 其交叠积分很难给出一个统一的数学公式, 此时在普通谐振腔中一般为高阶模运行。当采用免调试谐振腔时, 由于定向棱镜的“匀光效应”<sup>[7]</sup>, 改善了不均匀抽运的交叠程度, 使低阶模效率得到提高。

### 2.3 结构设计

具体结构如图 2 所示, 8 个国产 LD 阵列(每个阵列有 8 个线阵(bar), 每个线阵峰值功率为 60 W), 呈  $90^\circ$  双向直接抽运 Nd:YAG 激光棒(尺寸:  $\phi 5 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ ), LD 通过热沉将热量传导给制冷器, 温控电路通过闭环控制半导体制冷器的工作电流及工作温度。激光棒非抽运侧面紧贴在散热凹槽上, 实现传导冷却, 由我校特制的定向棱镜与  $1.06 \mu\text{m}$  透过率为 68% 的平面输出镜构成腔长为 120 mm 的谐振腔, 用初始透过率为 30% 的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体进行被动调 Q。用尺寸为  $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$  的 II 类匹配 KTP 晶体进行腔外倍频。

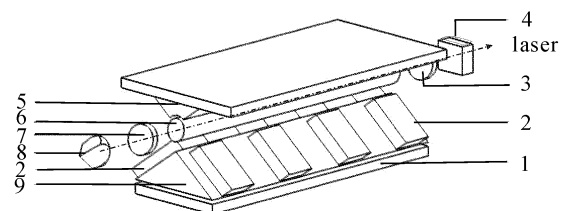


图 2 免调试谐振腔 DPSL 结构示意图

1: LD 制冷器; 2: LD; 3: 平面输出镜; 4: KTP 晶体; 5: 带反射镜的热沉; 6: 激光棒; 7: 调 Q 晶体; 8: 定向棱镜; 9: 热沉

Fig. 2 Schematic of DPSL configuration with alignment-free resonator

1: LD cooler; 2: LD; 3: KTP crystal; 4: output plano mirror; 5: heat sink with mirror; 6: laser rod; 7: Q-switch; 8: directional prism; 9: heat sink

### 3 实验结果与分析

采用上述结构研制的二极管抽运固体激光器和 FS-LDP500 型 LD 驱动电源作为实验装置,用 EPM1000 型激光功率/能量计监测激光输出,TEK-P6701A 型光电探头和 TDS3052 型 500MHz 数字式存储示波器测量脉宽,CHOU6400 型光束质量分析仪监测荧光分布和激光场分布。

#### 3.1 实验结果

在室温条件下,当工作电流为 40 A(LD 阵列的总发射峰值功率为 2560 W 左右)时,用 CHOU6400 型光束质量分析仪记录下 Nd:YAG 圆棒横截面内的荧光分布,如图 3 所示。由图可见为非均匀抽运。

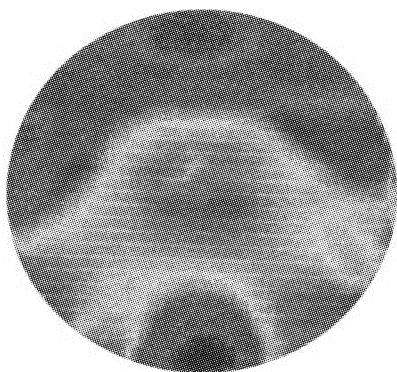


图 3 正交双向抽运荧光分布图

Fig. 3 Edge view of fluorescence distribution at two perpendicular side pumping

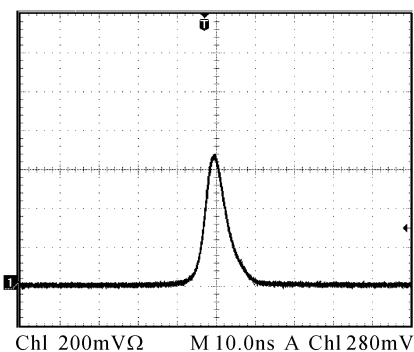


图 4 0.53 μm 免调试谐振腔 DPSL 激光脉宽波形

Fig. 4 Width of 0.53 μm DPSL output with alignment-free resonator

在重复频率为 20 Hz,工作电流为 48 A,LD 脉宽为 238 μs 时,测得 0.53 μm 激光动态输出能量为 52.2 mJ/pulse,随机抽取 10 个脉冲,能量稳定度为 0.5%;测得脉冲宽度为~6 ns 且波形稳定(示波器显示的脉冲波形如图 4)。

在 20 Hz 重复频率下,分别测得激光输出的近

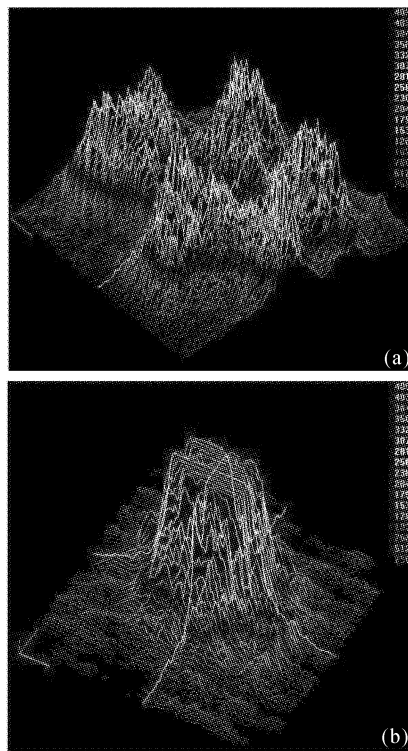


图 5 免调试谐振腔 DPSL 输出激光三维场分布图

(a) 近场分布;(b) 远场分布

Fig. 5 3D energy distribution of DPSL output with alignment-free resonator

(a) near-field distribution; (b) far-field distribution

场和远场分布如图 5 所示,其近场光斑呈现矩形米字型分布,远场呈现中心高度凸起的圆形分布。

用  $f-\theta$  法测得重复频率为 20 Hz 时的发散角为 2.8 mrad,在高温 +55℃ 环境下测得激光输出能量为 58 mJ,在低温 -40℃ 环境下测得激光输出能量为 46 mJ。连续工作 2 h 均性能稳定。

#### 3.2 结果分析

1) 实验表明,由于采用了双向侧面非均匀抽运,抽运光与模体积只有部分交叠,若采用普通谐振腔,其输出应该是与激光棒内荧光分布相对应的非均匀模式;由于采用了免调试谐振腔,其定向棱镜的“匀光效应”使输出光斑为对称的“矩形光斑”。

2) 由于非对称抽运和传导冷却,使棒内的增益和热流沿棒的径向呈不对称分布,产生热应力双折射、热光楔和热透镜等效应。采用定向棱镜作为全反镜,弥补了普通谐振腔 DPSL,尤其是在大功率非均匀抽运、被动调 Q 传导冷却情况下的许多缺点<sup>[8,9]</sup>(频率和光强起伏较大、热效应严重、易跳模和光轴漂移等),使原本分布不均匀的增益在对称交换穿行振荡过程中趋于均匀,不但增大了低阶模体

积,而且实现了对热致应力双折射、热光楔和退偏效应的补偿,使输出能量稳定性、模式稳定性和光轴稳定性得到明显改善。

3) 免调试谐振腔对腔镜失调很不灵敏<sup>[7,10]</sup>,保证了激光器有足够的机械稳定性。但为了获得高光束质量的输出,必须有高光学质量的定向棱镜作保证;其屋脊线的棱边要小于  $5\ \mu\text{m}$ ,其  $90^\circ$ 屋脊角的容限不超过  $\pm 1$  弧秒。

4) 定向棱镜的角向选模作用和准相位共轭作用<sup>[11,12]</sup>,不但压缩了发散角,而且使远场能量集中,呈近似平顶高斯分布;定向棱镜三条棱边的衍射损耗和掩模效应使近场光斑呈米字分布。

5) 在低高温环境下,激光自由振荡输出基本稳定,但在被动调 Q 时,高温输出能量升高且输出稳定;低温输出能量降低且输出稳定。对于产生此实验结果的机理,有待进一步分析研究。

## 4 结 论

报道了一种新型免调试谐振腔二极管抽运固体激光器,给出了该激光器的设计方案和实验结果。采用免调试谐振腔,  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 被动调 Q, 激光二极管侧向非均匀直接抽运 Nd:YAG, 获得了远场近似平顶高斯分布的激光输出。该激光器能满足强烈振动、大幅度温度变化环境下稳定输出高质量激光的需要,可广泛应用于激光测距、激光雷达、激光武器等领域。

### 参 考 文 献

- 1 Luis Ramos-Izquierdo, Jack L. Bufton, Patricia Hayes. Optical system design and integration of the Mars observer laser altimeter [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(3):307~322
- 2 Lü Bai-da. Solid-state Lasers [M]. Beijing: Beijing University of Post & Telecom Press, 2002. 104~111 (in Chinese)
- 3 Liu Junhai, Lu Jianren, Lu Junhua *et al.*. Design of resonators for high-power laser diode end-pumped CW solid-state lasers [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, **A27**(1):7~10 (in Chinese)
- 4 K. Du, N. Wu, J. Gieseke *et al.*. Partially end-pumped Nd:YAG slab laser with a hybrid resonator [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(5):370~372
- 5 W. Koehner. Solid-state Laser Engineering [M]. 5rd edition, New York: Springer Press, 1999. 233~235
- 6 Dai Te-li. Diode Pumped Solid-state Laser [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1993. 122~124 (in Chinese)
- 7 Cheng Yong, Wang Xiao-bing, Sun Bin *et al.*. Study of directional prism cavity character [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, **A27**(6):537~541 (in Chinese)
- 8 Zhao Hai-xia, Jiang Dong-sheng, Zhao Hong *et al.*. Study on thermal effect of high power laser side pumped by diode arrays [J]. *Laser & Infrared* (激光与红外), 2001, **31**(4):210~211 (in Chinese)
- 9 Zhang Ling, Yang Shao-chen, Li Wen-bo. Study on thermal effects of LD side-pumped Nd:YAG laser [J]. *Laser & Infrared* (激光与红外), 2003, **33**(1):37~39 (in Chinese)
- 10 Cheng Yong, Sun Bin, Wang Xiao-bing *et al.*. Study on conductive cooling repetitively laser with Nil drift optics axes [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2002, **A29**(6):495~497 (in Chinese)
- 11 Shaomin Wang, Daomu Zhao, Yong Cheng *et al.*. Corner cube recognized as super-conjugator [C]. *SPIE*, 2002, **4912**:182~187
- 12 Wang Shaomin, Zhao Daomu. Matrix Optics [M]. Beijing: High Educational Press, 2000. 97~107 (in Chinese)