

# 垂直腔面发射激光器抽运小型宽温 Nd:YAG 激光器及掠入射式放大器的研究

于真真<sup>1,2</sup> 侯霞<sup>1</sup> 周群立<sup>1</sup> 周翠芸<sup>1,2</sup> 王志君<sup>1</sup> 杨燕<sup>1</sup> 朱韧<sup>1</sup> 陈卫标<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 报道了一种小型宽温 Nd:YAG 激光器及掠入射式放大器。采用 Nd:YAG 类光纤晶体作为增益介质, 采用垂直腔面发射半导体激光器 (VCSEL) 阵列作为抽运源, 利用 Cr<sup>4+</sup>:YAG 作为可饱和吸收体进行被动调 Q。连续运转时, 在最大有效抽运功率为 5.47 W 时, 获得 1.808 W 的输出, 光-光转换效率为 33.05%, 斜率效率为 36.5%。调 Q 模式下得到最窄脉宽为 7.5 ns、单脉冲能量为 87.1 μJ、峰值功率为 11.6 kW 的输出。采用掠入射式双程放大模块, 对脉冲抽运下得到的单脉冲能量为 81 μJ、脉宽为 13 ns 的信号光进行放大, 在最大抽运功率下, 放大后的单脉冲能量为 0.88 mJ, 相应的增益为 10.86, 能量提取效率为 19.44%。放大后两个方向的光束质量因子由  $M_x^2 = 1.175$  和  $M_y^2 = 1.248$  变为  $M_x^2 = 1.196$  和  $M_y^2 = 1.307$ 。激光器体积紧凑, 可采取风冷等措施进行散热, 在 23±8 °C 的范围内, 输出能量波动小于 3%。

**关键词** 激光器; 类光纤晶体; 垂直腔面发射半导体激光器阵列; 掠入射; 多程放大

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0602003

## VCSEL Pumped Compact Wide-Temperature Nd:YAG Laser and Grazing-Incidence Amplifier

Yu Zhenzhen<sup>1,2</sup> Hou Xia<sup>1</sup> Zhou Qunli<sup>1</sup> Zhou Cuiyun<sup>1,2</sup> Wang Zhijun<sup>1</sup>

Yang Yan<sup>1</sup> Zhu Ren<sup>1</sup> Chen Weibiao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques,

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A compact and wide-temperature Nd:YAG laser and grazing-incidence amplifier are reported. Fiber-like Nd:YAG crystal is used as gain medium and a vertical-cavity surface-emitting laser array (VCSEL) is used for the pump source. Cr<sup>4+</sup>:YAG is used for passive Q-switch. In continuous-wave (CW) mode, a maximum output power of 1.808 W is achieved at the highest attainable absorbed pumping power of 5.47 W with an optical-optical conversion efficiency of 33.05% and the slope efficiency of 36.5%. In Q-switched mode, pulse with the shortest pulse width of 7.5 ns, single pulse energy of 87.1 μJ and peak power of 11.6 kW is obtained. Grazing incidence and double-passes amplification of laser with single pulse energy of 81 μJ and pulse width of 13 ns obtained by pulse-pump is investigated. With the maximum pumping power, the pulse energy of 0.88 mJ is obtained with the gain of 10.86 and the energy extraction efficiency of 19.44%. After amplification, beam quality turns into  $M_x^2 = 1.196$  and  $M_y^2 = 1.307$  from  $M_x^2 = 1.175$  and  $M_y^2 = 1.248$ . This laser system is compact and air-cooled. The fluctuation of output energy is below 3% when the temperature ranges from 15 °C to 31 °C.

**Key words** lasers; fiber-like crystal; vertical-cavity surface-emitting laser array; grazing incidence; multi-pass amplification

**OCIS codes** 140.3530; 140.3580; 140.3540; 140.3280; 140.7260

收稿日期: 2013-02-28; 收到修改稿日期: 2013-03-27

作者简介: 于真真(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: yuzhenzhen3076@sina.com

导师简介: 侯霞(1975—), 女, 研究员, 硕士生导师, 主要从事固体激光技术、星载激光遥感及激光雷达等方面的研究。

E-mail: hou\_xia@siom.ac.cn (通信联系人)

# 1 引言

随着固体激光技术和半导体激光技术的发展,激光二极管(LD)抽运的全固态激光器(DPSSL)由于具有可靠性高、体积小、质量轻、功耗低等优点成为空间激光雷达探测系统的首选光源<sup>[1~3]</sup>。空间运行环境的特殊性对激光器的寿命、质量、体积、热管理和温控技术等有着特殊要求,这对于利用激光器阵列实现多光束探测的星载激光雷达系统尤为重要,因此研究小型轻量化的宽温激光器有着重要意义。

作为抽运源,传统的边发射 LD 常常需要复杂的光学整形系统,且其发射中心波长随着温度漂移较大,而尾纤输出 LD 具有较为复杂的封装结构和较长的光纤尾纤,二者均不利于微小型激光系统的应用。垂直腔面发射激光器(VCSEL)由于出射激光圆形对称、温度稳定性好、体积小、易于二维集成等特点受到越来越多的关注。随着 VCSEL 制作工艺水平的提高和新型结构的出现,高功率 VCSEL 单晶和阵列,尤其是发射波长在 808 nm 左右的 VCSEL,已成为一种新型的抽运源<sup>[4~7]</sup>。2002 年, Lan 等<sup>[8]</sup>报道了利用 VCSEL 阵列抽运高掺杂 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的实验。2011 年, Goldberg 等<sup>[9]</sup>报道了利用 VCSEL 阵列端面抽运棒状 Nd:YAG 晶体,分别得到了高光束质量的连续输出及脉冲性质好的被动调 Q 输出。目前国内有关 VCSEL 阵列抽运的固体激光器未见报道,多数研究集中在单片或阵列 VCSEL 本身的高光束质量、高功率及 VCSEL 激光器倍频等方面<sup>[4~6]</sup>。

本文利用 VCSEL 阵列作为振荡级抽运源,以提高激光器的温度稳定性。采用 Nd:YAG 类光纤晶体作为增益介质,采用平-平谐振腔结构及 Cr<sup>4+</sup>:YAG 可饱和吸收体进行被动调 Q。放大级采用掠入射式、LD 侧面抽运 Nd:YAG 板条晶体多程放大器,可充分利用增益强区。整个激光器体积小,尺寸可在 60 mm(长)×60 mm(宽)×30 mm(高)以内,这对利用激光器阵列实现多光束探测的激光雷达系统具有一定的参考价值。

## 2 VCSEL 阵列端面抽运 Nd:YAG 激光器

### 2.1 实验装置

激光振荡器的实验装置如图 1(a)所示,为端面抽运的平-平腔结构,抽运源采用 Princeton Optronics 公司推出的商用 VCSEL 阵列,该阵列的整体集成结构

为 1.5 mm×1.5 mm 的正方形,发射光谱中心波长在 806 nm 左右。采用 10:4 的望远镜系统(焦距  $f=10$  mm 的透镜 1 与焦距  $f=4$  mm 的透镜 2)在抽运面得到 0.6 mm×0.6 mm 大小的光斑。激光介质为直径 1 mm、长 12 mm、原子数分数为 0.5% 的低掺杂棒状 Nd:YAG 晶体。晶体侧表面镀有亮金膜,使得抽运光能够在晶体内部实现全反射,类似于光纤,又称为类光纤晶体。晶体入射端面镀有 808 nm 波段的高透射膜和 1064 nm 波段的高反射膜,用作谐振腔的一个端面,另一端面镀有 808 nm 和 1064 nm 波段的高透射膜。输出腔镜为对 1064 nm 波段透射率( $T$ )为 10% 的平面镜。被动 Q 开关是实现脉冲工作的 DPSSL 微型化最有效的手段之一,因此实验中采用 Cr<sup>4+</sup>:YAG 可饱和吸收体进行被动调 Q。

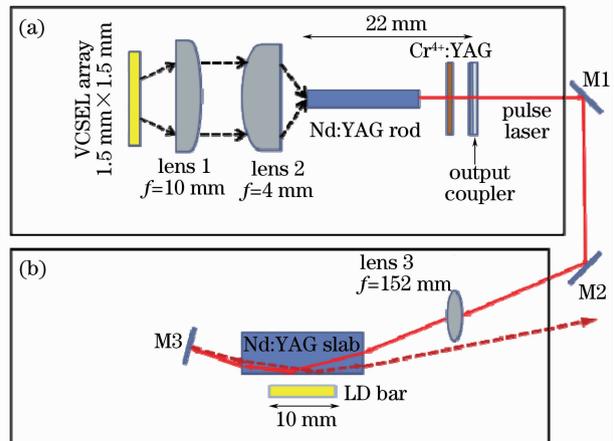


图 1 (a) VCSEL 抽运 Nd:YAG 激光器示意图; (b) 掠入射式放大器示意图

Fig. 1 Sketch of (a) VCSEL pumped Nd:YAG laser oscillator and (b) grazing-incidence laser amplifier

因 VCSEL 集成阵列通常具有较大的发光面,不易聚焦,而且光束发散角会随着驱动电流的加大而增大,使得抽运特性不稳定。对此,实验中一方面采用望远镜式的抽运耦合系统对抽运光进行聚焦,可按照设计比例对光斑进行缩放。另一方面采用低掺杂的类光纤晶体,使抽运光被限制在较小的尺寸内,同时保证抽运光均匀高效的吸收,降低晶体的热负载。采用的抽运耦合系统理论上可将 93% 的抽运光耦合到激光介质端面,且 97.6% 的抽运光被介质吸收。

### 2.2 实验结果

#### 2.2.1 连续抽运情况

连续运行(CW)下的输出功率及采用不同初始透射率的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 可饱和吸收体进行被动调 Q 情况下的平均输出功率随抽运功率的变化曲线如图 2 所示。图中横坐标为抽运吸收功率,为由 VCSEL 发

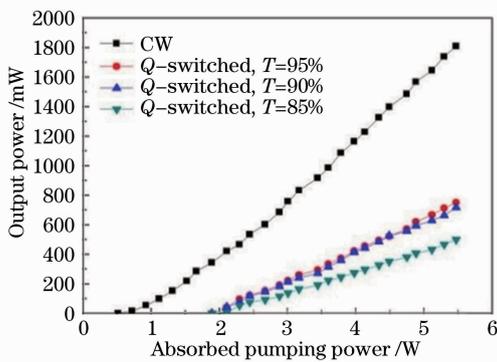


图2 连续及调Q情况下输出功率随抽运吸收功率变化曲线

Fig. 2 Output powers of CW and passively Q-switched Nd:YAG lasers at different absorbed pumping powers

射功率经过抽运耦合系统后测量得到的抽运光功率与透射输出腔镜后剩余抽运光功率之差。连续运行时,在抽运吸收功率为 5.47 W 时,获得最大输出功率为 1.808 W,阈值功率及斜率效率分别为 0.518 W 和 36.5%,高于之前报道的 17.6%<sup>[9]</sup>。被动调Q情况下,随着可饱和吸收体初始透射率的降

低,阈值功率增加。对于  $T=90\%$ ,阈值功率增加为 1.891 W 时,此时脉冲重复频率约为 1 kHz。最大平均输出功率分别为 751 mW ( $T=95\%$ )、716 mW ( $T=90\%$ ) 和 498 mW ( $T=85\%$ )。

图3为被动调Q情况下输出的重复频率、脉冲宽度和单脉冲能量随抽运功率的变化曲线。可以看出,随着抽运功率的增加,脉冲重复频率和单脉冲能量逐渐增加,脉冲宽度减小。原因是随着抽运功率增加,晶体上能级储能速度增加,腔内光子数密度增加速度加快,被动调Q晶体被漂白的的时间间隔减小,导致脉冲重复频率变大。由于储能增多,从而单脉冲能量增加。同时随着腔内光子数增长及反转粒子数衰减的加快,激光脉冲建立及熄灭过程更短,脉冲宽度更窄。此外,可以看出,随着初始透射率的降低,单脉冲能量趋于增大,得到的脉冲宽度减小。原因是越小的初始透射率导致激光阈值增大,从而激光上能级储能增加,导致单脉冲能量变大。采用  $T=85\%$  的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体时,可以得到最小脉宽为 7.5 ns、最大单脉冲能量为 87.1  $\mu\text{J}$  的激光输出,相应的峰值功率为 11.6 kW、重复频率为 5.7 kHz。

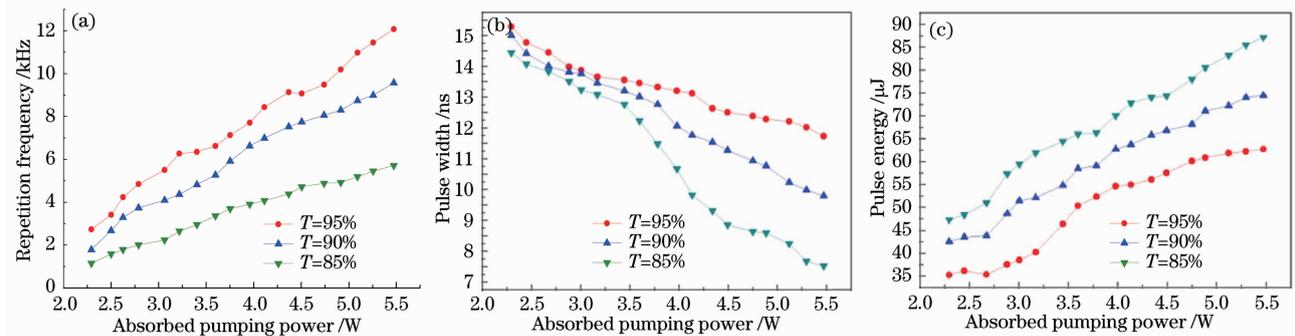


图3 (a)重复频率、(b)脉冲宽度和(c)单脉冲能量随抽运吸收功率变化曲线

Fig. 3 (a) Repetition frequency, (b) pulse width and (c) pulse energy versus absorbed pumping power

### 2.2.2 脉冲抽运情况

受限于放大级 LD 的最大占空比,采用重复频率为 100 Hz、脉宽为 300  $\mu\text{s}$  的脉冲抽运方式对激光器进行抽运。被动调Q晶体为初始透射率为 90% 的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体,输出腔镜为对 1064 nm 波段透射率为 20% 的平面镜。在 VCSEL 阵列平均输出功率为 270 mW 时,得到单脉冲能量为 81  $\mu\text{J}$ 、脉冲宽度为 13 ns 的稳定脉冲输出。实验中为了降低激光振荡阈值,采用的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  初始透射率较高,使得单脉冲能量没有进一步提高。振荡器输出脉冲序列及脉冲波形如图 4 所示。

进一步测量了脉冲抽运情况下激光振荡器的温

度稳定特性,VCSEL 阵列采用水冷系统进行温控,温度在 15  $^{\circ}\text{C}$ ~31  $^{\circ}\text{C}$  变化,测量 VCSEL 阵列发射光谱中心波长及振荡器输出功率的变化,结果如图 5 所示,可以看出 VCSEL 阵列温度稳定性很好,中心波长随温度变化的平均漂移量为 0.049 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 。振荡器输出功率在 8.0 mW 到 8.23 mW 之间变化,抖动为 2.8%。

采用 Spiricon 公司生产的  $M^2$  激光光束分析仪对输出光斑进行测量,得到 2 个方向光束质量  $M^2$  因子分别为  $M_x^2=1.175$  和  $M_y^2=1.248$ ,其测量结果如图 6(a) 所示。图 6(b) 为采用 Spiricon 公司生产的 CCD 测得的近场光斑。

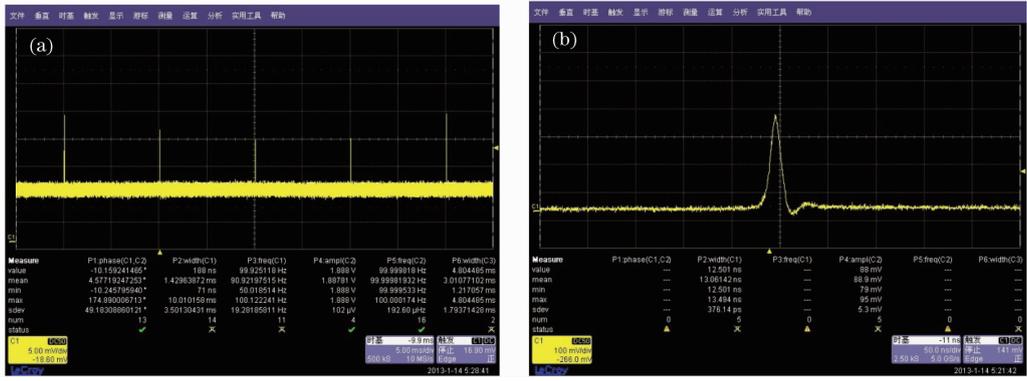


图 4 (a)激光脉冲序列;(b)脉冲波形

Fig. 4 (a) Laser pulses sequence; (b) typical pulse profile

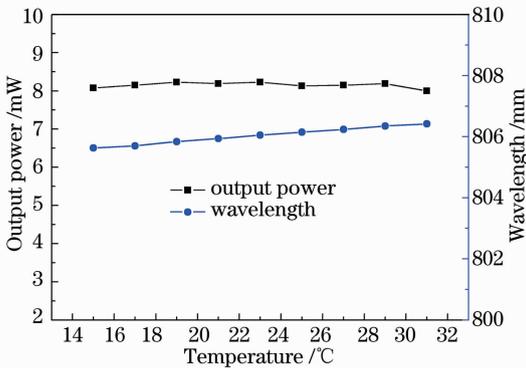


图 5 抽运光中心波长和激光输出功率随温度变化曲线

Fig. 5 Wavelength of pump light and output power versus temperature

### 3 LD bar 侧面抽运 Nd:YAG 板条掠入射放大模块

#### 3.1 放大级设计

放大级采用掠入射、侧面抽运板条放大器,这种结构通常利用强吸收晶体作为增益介质,采用激光二极管侧面抽运,在晶体内部形成一定深度的增益区域,从而掠入射的光束可充分利用晶体增益强区,在抽运面进行全反射放大。为了得到高的提取效率,可高掺杂、强吸收的增益介质如 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体、Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体、Nd:YAG 陶瓷、Nd:YAG 晶体等被广泛应用到掠入射型激光器的研究中<sup>[10~12]</sup>。而国内关于掠入射式激光器及放大器的报道较少<sup>[13]</sup>。

实验中放大部分为基于 LD bar 侧面抽运的 Nd:YAG 板条晶体,光路图如图 1(b)所示。来自激光振荡器的激光先后经 2 个 45°反射镜(M1、M2)反射,再经平凸透镜(焦距  $f=152$  mm 的透镜 3)聚焦后以较小角度掠入射到抽运面,在抽运面经全反射放大后的出射激光再经置于介质后的 0°全反镜(M3)反射后,再次入射到放大介质进行第 2 次放大。

2 个反射镜分别镀有 1064 nm 高反射膜和 808 nm 增透膜,平凸透镜的曲率半径为 71 mm,用来对振荡级输出激光聚焦,以使到达抽运面的激光光斑大小与抽运光斑相匹配。放大介质采用原子数分数为 1% 的 Nd:YAG 板条晶体,晶体尺寸为 3 mm(厚)×8 mm(宽)×36 mm(长),两个 3 mm×8 mm 的端面

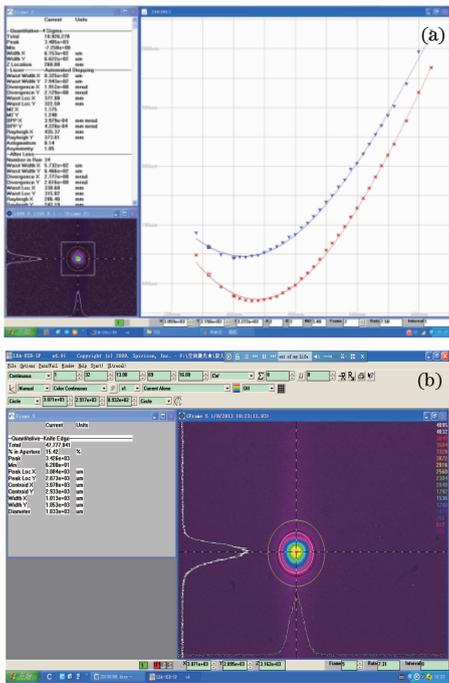


图 6 振荡级(a)输出光束质量和(b)近场光斑

Fig. 6 (a) Output beam quality and (b) near-field beam profile of laser oscillator

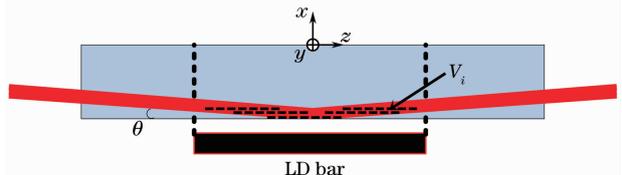


图 7 放大器理论模型示意图

Fig. 7 Theoretical model of amplifier

分别镀有 1064 nm 波段高透射膜,2 个 3 mm×36 mm 侧面分别镀有 808 nm 波段高透射膜,上下 2 个大面与紫铜热沉接触用作冷却面。抽运源采用传导冷却、准连续、快轴准直的单 LD bar,无需抽运耦合系统,减小抽运光的损失,出射光斑大小为 0.85 mm×10 mm。LD bar 输出脉冲宽度、强度和重复频率可调,在重复频率为 100 Hz、抽运脉宽为 230 μs 时最大峰值功率可达到 200 W。受限于 LD bar 的最大占空比,实验中 LD bar 重复频率选为 100 Hz,抽运脉宽为 200 μs。

### 3.2 数值计算

对放大级的放大能力进行理论分析。放大器的抽运源为快轴准直的单 LD bar,假设抽运光沿板条长度和厚度方向为均匀的,沿板条宽度方向为指数式吸收。设信号光光斑直径为  $d$ ,入射到放大介质的掠入射角(激光和抽运面之间的夹角)为  $\theta$ ,到达抽运面的光斑大小约为  $d/\sin\theta$ ,因掠入射角一般较小,信号光通常处于抽运面附近很小区域,因此可忽略晶体内部抽运光的发散角。沿激光光路把放大介质内部吸收的抽运能量分为  $i$  等份,假设每一个增益单元内抽运能量密度均匀,依次计算信号光通过每一个增益单元的小信号增益,最终得到信号光通过放大介质后的增益和储能的关系。建立如图 7 所示的模型,设微体元的体积为  $V_i$ ,则小信号增益系数  $g_0$  为

$$g_0 = E_{\text{store}} / (E_{\text{sat}} \cdot V_i), \quad (1)$$

式中  $E_{\text{store}}$  为第  $i$  个微体元内的储能(单位为 mJ), $V_i$  为微体元的体积(单位为 mm<sup>3</sup>), $V_i = A_s l$ , $l$  为沿光路方向微体元的长度(单位为 mm), $A_s$  对应微体元的横截面积(单位为 mm<sup>2</sup>); $E_{\text{sat}}$  为饱和能量密度(单位为 mJ/mm<sup>2</sup>),对于 Nd:YAG, $E_{\text{sat}} = 6.6$  mJ/mm<sup>2</sup>。利用 Frantz-Nodvik 方程<sup>[14]</sup>

$$E_{\text{out}} = E_{\text{sat}} A_{\text{active}} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{E_{\text{in}}}{A_{\text{active}} E_{\text{sat}}} \right) - 1 \right] \exp(g_0 l) \right\}, \quad (2)$$

计算信号光通过微体元后的能量。式中  $E_{\text{in}}$  为入射到第  $i$  个微体元的信号光能量, $A_{\text{active}}$  为信号光有效横截面积(单位为 mm<sup>2</sup>)。设入射到放大级的初始激光能量为  $E'_{\text{in}}$ ,放大后的激光能量为  $E'_{\text{out}}$ , $E'_{\text{store}}$  为放大介质内信号光所通过的那部分晶体存储的能量。则放大级的增益为

$$G_{\text{gain}} = E'_{\text{out}} / E'_{\text{in}}, \quad (3)$$

放大级的能量提取效率表达为

$$\eta = \frac{E'_{\text{out}} - E'_{\text{in}}}{E'_{\text{store}}} \times 100\%. \quad (4)$$

信号光单脉冲能量为 81 μJ,光斑直径为 0.74 mm,第 1 次和第 2 次通过抽运面时的掠入射角度均为 7° 时,得到的单程和双程放大后单脉冲能量及放大级增益随晶体储能的变化曲线如图 8 所示。计算结果表明,在晶体最大储能为 4.1 mJ 处,放大器第一程输出单脉冲能量为 0.3 mJ,由(3)式计算得到增益为 3.74,由(4)式计算得到单程的提取效率约为 5.4%。双程增益可以达到 12.6,能量提取效率约为 22.9%。

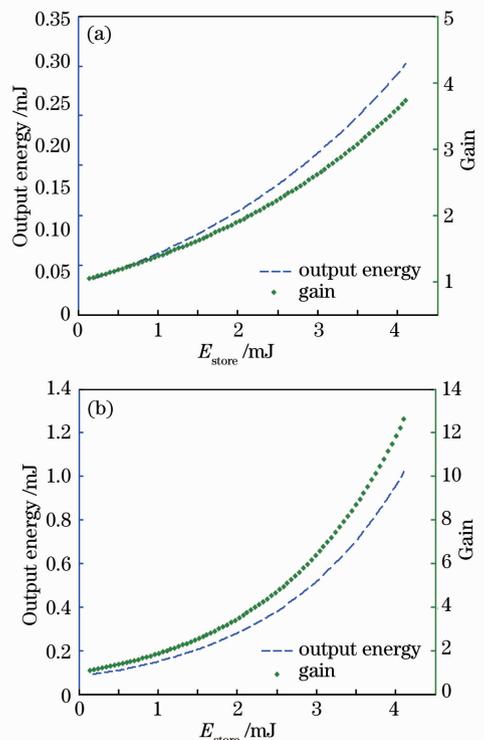


图 8 放大级单脉冲能量和增益随储能的变化曲线。

(a) 单程; (b) 双程

Fig. 8 Output energy and gain of amplifier versus stored energy. (a) Single pass; (b) double passes

### 3.3 实验结果

为了增大振荡级输出激光与放大级抽运光之间的匹配,利用长焦距平凸透镜对振荡器输出的激光聚焦后再进入放大器进行放大。调节振荡级输出与放大级抽运脉冲之间的延时,找到最佳值为 70 μs,得到如图 9 所示的单程和双程放大后的激光输出随抽运储能之间的关系曲线。这里的抽运储能是指放大介质内信号光所通过的那部分晶体存储的能量。分别测量抽运 LD 输出能量和经过晶体后的抽运光能量,计算二者的差值得到被晶体吸收的总抽运光能量  $E_{\text{absorb}}$ 。考虑到斯托克斯效率  $\eta_s$ 、量子效

率  $\eta_a$ 、模式匹配效率  $\eta_b$ 、抽运吸收效率  $\eta_{st}$  等,放大介质的储能  $E_{store}$  可表示为

$$E_{store} = \eta_s \eta_a \eta_b \eta_{st} E_{absorb}. \quad (5)$$

式中抽运吸收效率  $\eta_{st}$  表示为

$$\eta_{st} = \frac{1 - \exp(-t_p/\tau)}{t_p/\tau}, \quad (6)$$

式中  $t_p$  为抽运脉宽,  $\tau$  为激光上能级寿命。

由图 9 可以看出,放大后的激光能量随抽运功率的增大而增加,当总储能为 4.11 mJ 时,单程与双程可以得到最高激光输出分别为 0.35 mJ 和 0.88 mJ,相应的增益分别为 4.32 和 10.86,能量提取效率为 6.5% 和 19.44%,与理论计算结果基本吻合,但是得到的放大器的提取效率较低,且随着抽运功率的增加输出能量趋于饱和。分析原因,认为一是由于振荡级输出激光能量较小,对应的能量通量小,无法提取放大器晶体中更多的能量。提高注入信号光的能量密度,该放大级结构可以达到更高的提取效率。二是所采用的放大介质的掺杂浓度不够高,导致抽运光在晶体内具有一定吸收深度,降低了对抽运光的利用率。可采用更高掺杂、强吸收的增益介质 Nd:YAG、Nd:YAG 陶瓷或者 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,使抽运光具有较小吸收深度。但高掺杂会减小晶体的能

级寿命,需激光器在高重复频率下运转。

放大输出的激光脉冲波形如图 10 所示,与振荡级输入激光脉冲相比,放大后的脉宽几乎不变。

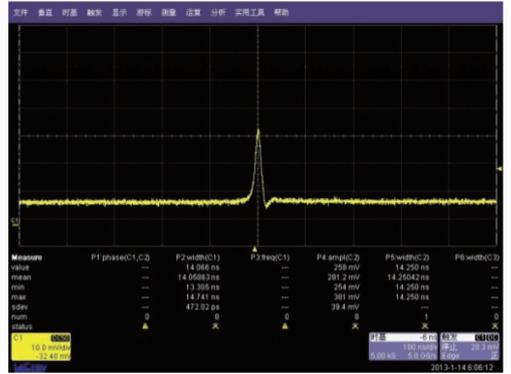


图 10 放大后的脉冲波形

Fig. 10 Pulse profile after amplification

对双程放大后的输出光斑进行测量,得到两个方向光束质量  $M^2$  因子分别为:  $M_x^2 = 1.196$  和  $M_y^2 = 1.307$ ,仍然保持较好的光束质量,其测量结果如图 11(a)所示。图 11(b)为采用 Spiricon 公司生产的 CCD 测得的近场光斑。

## 4 结 论

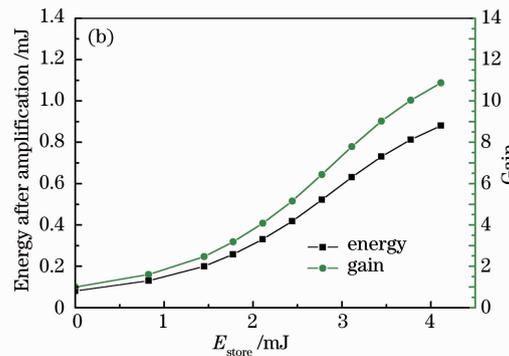
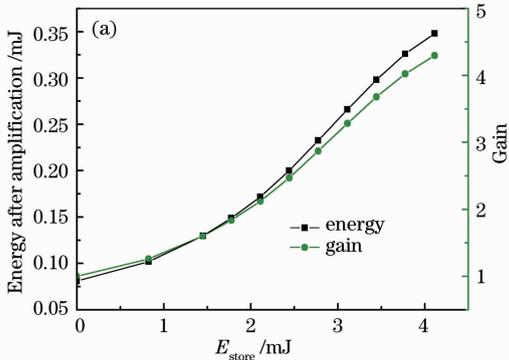


图 9 放大后的能量及增益随抽运储能的变化。

(a) 单程; (b) 双程

Fig. 9 Energy after amplification and gain versus stored energy. (a) Single pass; (b) double passes

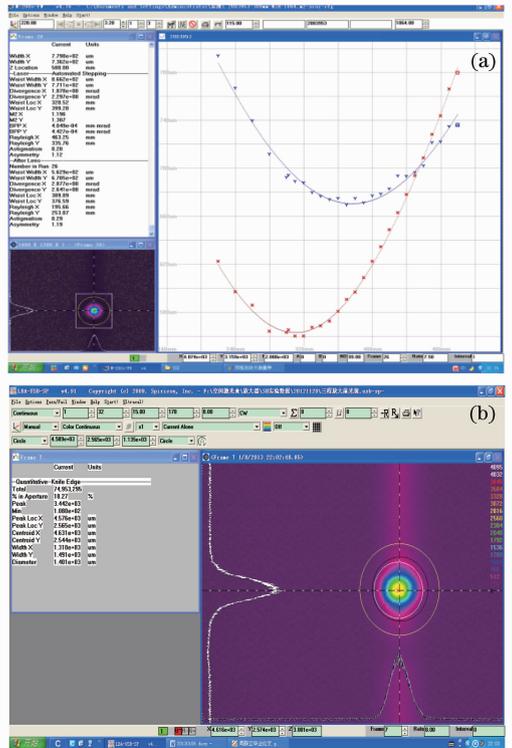


图 11 放大级(a)输出光束质量和(b)近场光斑

Fig. 11 (a) Output beam quality and (b) near-field beam profile

提出了一种小型、宽温全固态 Nd:YAG 激光振荡-放大系统, 系统结构简单、紧凑。振荡级采用 Nd:YAG 类光纤晶体作为增益介质, 采用 VCSEL 阵列进行端面抽运。连续运转时, 在最大有效抽运功率为 5.47 W 时, 获得 1.808 W 的输出, 光-光转换效率为 33.05%, 斜率效率为 36.5%。采用  $\text{Cr}^{3+}$ :YAG 被动调 Q 时, 得到最窄脉宽为 7.5 ns、单脉冲能量为 87.1  $\mu\text{J}$ 、峰值功率为 11.6 kW 的输出。在 100 Hz 的脉冲抽运下, 得到脉宽为 13 ns、单脉冲能量为 81  $\mu\text{J}$  的激光输出, 光束质量为  $M_x^2 = 1.175$  和  $M_y^2 = 1.248$ , 当温度从 15  $^{\circ}\text{C}$  增加到 31  $^{\circ}\text{C}$  时, 输出功率的抖动为 2.8%。采用 LD 侧面抽运的 Nd:YAG 板条晶体为放大级, 对振荡级输出进行多程放大, 信号光掠入射到放大介质, 在放大级最大储能为 4.11 mJ 时, 单程和双程放大后分别得到 0.35 mJ 和 0.88 mJ 的输出, 相应的增益为 4.32 和 10.86, 与计算结果基本一致, 放大后的光束质量几乎保持不变。为提高放大器输出单脉冲能量及提取效率, 实现系统高效率工作, 可以进一步换用更高掺杂浓度的 Nd:YAG 或者 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体进行实验。

整个系统结构简单、紧凑, 具有较好的温度特性, 可作为机载甚至星载激光雷达光源的参考, 在多光束推帚式激光雷达探测系统发射光源方面也具有应用潜力。

### 参 考 文 献

- 1 Bi Jinzi, Xia Wenbing, Liu Dan *et al.*. Research and progress of spaceborne solid-state lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(5): 818~821  
毕进子, 夏文兵, 刘丹等. 空间固体激光器的研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(5): 818~821
- 2 Yu Zhenzhen, Hou Xia, Zhou Cuiyun *et al.*. Progress and current state of space-borne laser altimetry [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, **50**(2): 020006  
于真真, 侯霞, 周翠芸等. 星载激光测高技术发展现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, **50**(2): 020006
- 3 Yan Fanjiang, Zheng Yongchao, Tao Yuliang. Analysis and prospects of laser technology of space-borne range measurement system [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012,

- 33**(4): 70~77  
颜凡江, 郑永超, 陶宇亮. 星载激光测距系统中激光器技术分析与发展展望[J]. *航天返回与遥测*, 2012, **33**(4): 70~77
- 4 Zhao Yingjie, Hao Yongqin, Li Guangjun *et al.*. Fabrication of new structure vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 1946~1950  
赵英杰, 郝永芹, 李广军等. 新型结构垂直腔面发射激光器的研制[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 1946~1950
- 5 Ning Yongqiang. Development and application of high power VCSEL [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(6): 1017~1024  
宁永强. 大功率垂直腔面发射激光器技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(6): 1017~1024
- 6 Zhang Yan, Ning Yongqiang, Zhang Jinsheng *et al.*. Structural design of 808 nm InGaAlAs vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0902007  
张艳, 宁永强, 张金胜等. 808 nm InGaAlAs 垂直腔面发射激光器的结构设计[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0902007
- 7 J. F. Seurin, G. Xu, V. Khalfin *et al.*. Progress in high-power high-efficiency VCSEL arrays [C]. *SPIE*, 2009, **7229**: 722903
- 8 Y. P. Lan, Y. Chen, K. F. Huang *et al.*. Oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers pumped Nd:YVO<sub>4</sub> microchip lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(3): 272~274
- 9 L. Goldberg, C. McIntosh, B. Cole. VCSEL end-pumped passively Q-switched Nd:YAG laser with adjustable pulse energy [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(5): 4261~4267
- 10 A. J. Alcock, J. E. Bernard. Diode-pumped grazing incidence slab lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1997, **3**(1): 3~8
- 11 A. Agnesi, L. Carra, F. Pirzio *et al.*. Amplification of a low-power picosecond Nd:YVO<sub>4</sub> laser by a diode-laser side-pumped grazing-incidence slab amplifier [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, **42**(8): 772~776
- 12 M. Jelinek, V. Kubeček, M. Cech *et al.*. 0.8 mJ quasi-continuously pumped sub-nanosecond highly doped Nd:YAG oscillator-amplifier laser system in bounce geometry [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2011, **8**(3): 205~208
- 13 He Fahong, Huang Lei, Gong Mali *et al.*. Optimization of grazing-incidence angle in high repetition rate acousto-optical Q-switched grazing-incidence lasers [J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(4): 380~382  
何发红, 黄磊, 巩马理等. 高重频声光调 Q 掠入射激光器的掠入射角度优化[J]. *激光技术*, 2008, **32**(4): 380~382
- 14 W. Koehner. Solid-State Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. 133~138  
W. 克希耐尔. 固体激光工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 133~138

栏目编辑: 宋梅梅