

文章编号: 0258-7025(2010)09-2340-06

# 传导冷却反弹抽运结构的板条激光放大器

尹 亮 马秀华 陆婷婷 刘珍峰 王建磊 朱小磊

(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)

**摘要** 报道了一种传导冷却、双侧面反弹抽运的脉冲运转 Nd:YAG 两级板条激光放大器。在重复频率条件下,通过实验测试其放大输入输出关系曲线、光束质量、热效应等特性,证明此种类型的放大器具有效率高、光束质量好、结构紧凑、热效应低和功率可定标放大等特性。实验对由单频激光振荡器输出的平均功率 1.1 W,脉宽 11.3 ns,光束质量因子( $M_x^2, M_y^2$ )为 1.2 的激光脉冲序列进行放大,当重复频率为 125 Hz 时,得到平均功率 24.1 W,脉宽 8.9 ns,光束质量因子  $M_x^2=1.53, M_y^2=1.27$  的高光束质量放大激光脉冲序列输出。实验结果表明,此种类型的激光放大器在空间探测应用上具有潜力。

**关键词** 激光器;板条激光放大器;光束质量;反弹抽运;传导冷却

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103709.2340

## Conductively-Cooled and Bounce-Pumped All-Solid-State Double-Stage Slab Laser Amplifier

Yin Liang Ma Xiuhua Lu Tingting Liu Zhenfeng Wang Jianlei Zhu Xiaolei

(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)

**Abstract** One kind of conductively-cooled, double-edge-bounce-pumped and pulsed Nd:YAG double-stage slab laser amplifier is reported. When the amplifier operates in pulsed condition, its high efficiency, good beam quality, compactness, weak thermal effects and high scalable gain are proved by the tests of the input-output relationship, beam quality and thermal effects and so on. The pulsed laser generated by a seed injected single-frequency oscillator, whose power is 1.1 W, pulse duration is 11.3 ns and beam quality factor ( $M_x^2, M_y^2$ ) is 1.2, is amplified by the amplifier at the repetition frequency of 125 Hz and high-beam-quality output laser, whose power is 24.1 W, pulse duration is 8.9 ns and beam quality factor  $M_x^2$  is 1.53,  $M_y^2$  is 1.27, is obtained. Experimental results show that this kind of laser amplifier has great potential in the application of space detection.

**Key words** lasers; slab laser amplifier; beam quality; bounce-pumped; conductively-cooled

### 1 引 言

高重复频率、高功率、高光束质量全固态激光器由于结构紧凑、效率高、质量轻便、稳定性好且易工程化等优点,在空间激光、工业加工和强场激光物理等方面有着较大的应用需求。热致应力双折射、热聚焦和应力断裂效应使得传统棒状激光器在试图获得高功率高光束质量激光输出时遇到了困难,而板

条激光器相比传统的棒状激光器而言,由于采用矩形结构和 zig-zag 激光传输,减弱了热效应影响,包括热透镜、热致应力双折射和热致退偏等,有利于显著提高激光光束质量。适合在高功率(百瓦级到千瓦级)、高脉冲能量下运转。此外,板条介质传导冷却技术在机械稳定性、结构紧凑、减少振动和节约能源等方面比对流冷却更有优势,更符合空间应用的

收稿日期: 2010-05-10; 收到修改稿日期: 2010-06-02

作者简介: 尹 亮(1987—),男,硕士研究生,主要从事二极管抽运固体激光器技术方面的研究。

E-mail: bluesky\_whiteclouds@sina.com

导师简介: 朱小磊(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事全固态激光器技术及激光应用系统等方面的研究。

E-mail: xlzhu@mail.siom.ac.cn

要求。目前,传导冷却激光二极管(LD)抽运的全固态板条激光器的空间应用已经引起了广泛的关注<sup>[1~4]</sup>。研究高重复频率、传导冷却、脉冲运转全固态板条激光器对于发展空间高功率激光器显得更为迫切。2008 年,美国 Fibertek 公司研制的单级纯传导冷却双侧面反弹(bounce)点抽运的 Nd:YAG 板条放大器,其板条晶体端面切割成 90°,利用板条介质的优良散热性能和紧凑稳固传导冷却结构,实现了 200 Hz 重复频率下将平均功率 3.4 W,光束质量  $M^2=1.1$  的信号光放大到 15 W,脉宽 17 ns,光束质量  $M^2=1.2$  的输出<sup>[2]</sup>。

本文在理论仿真的基础上,在优化设计的传导冷却、双侧面反弹抽运板条激光放大器的装置上,实验研究了该类板条激光放大器的热光畸变、放大器放大能力、提取效率、光束质量变化等特性。

## 2 板条激光放大器的结构设计

实验中,两级放大器的设计相同。板条激光放大器的增益介质为 Nd:YAG 晶体,掺杂原子数分数为 1%,几何尺寸为 5 mm×5 mm×110 mm,在抽运

面上镀针对 808 nm 波长的高透膜,减少界面反射损耗。两个端面切割成布儒斯特角,最大限度地抑制  $z$  方向上可能出现的寄生振荡<sup>[5]</sup>,提高放大器的输出效率和增益<sup>[6]</sup>。根据激光束在板条内走 zig-zag 形的行进轨迹(如图 1 所示),在全反射面排布两侧面反弹抽运,另外两侧面则用于传导冷却。这种设计优势在于能有效控制增益介质的热效应。首先,板条状增益介质内的温度梯度几乎只在一维内( $x$  方向)分布,因此有效地消除了热应力感生的双折射与退偏振损耗;其次,入射激光在板条内走 zig-zag 形的光路,进一步补偿 zig-zag 平面内的热畸变效应<sup>[7]</sup>;最后,宽高比达 1:1 的设计可以极大地降低装校应变的产生。此外,将 LD 模块放置在激光 zig-zag 光路的内全反射点对应的位置上,在提高抽运光利用效率的同时,减少板条内的热沉积。由于被放大的信号激光的偏振方向相对于板条端面为入射面内的线偏光,可以无损耗通过,因此可完全避免因端面镀膜增透膜而导致的膜损伤问题,对提高放大器的高功率损伤阈值非常有利。

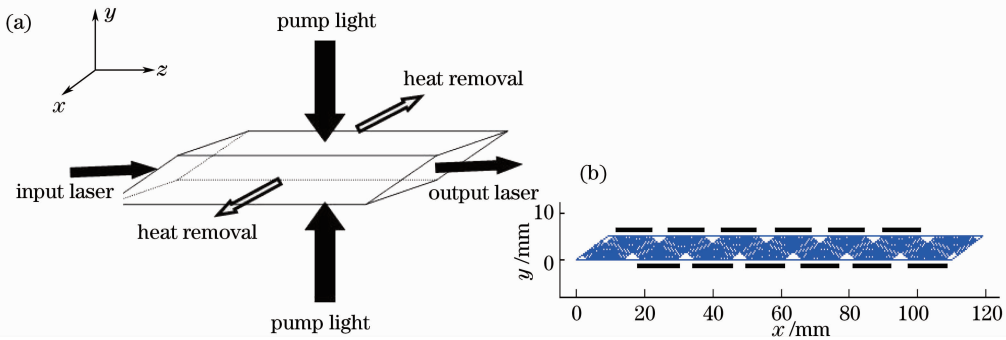


图 1 (a)放大器的抽运和冷却结构;(b) LD 模块排布方式示意图

Fig. 1 (a) Pump and cooling configuration; (b) sketch of the laser-diode packets placed along the length direction with space between each other, which shows the pump-on-bounce configuration

同时为了防止板条在工作时的热聚焦效应使激光聚焦损坏晶体,必须在两级之间加入补偿系统。首先用扩束镜使激光束腰斑增大,降低功率密度,从而减小晶体损伤几率;其次,由于板条在 zig-zag( $y$  方向)面内对热透镜有补偿效果,而在垂直于 zig-

zag 的面内( $x$  方向)没有补偿效果,并且板条内的温度梯度几乎只分布于  $x$  方向,所以  $x$  方向的热透镜比  $y$  方向的要严重得多。因此,为了将激光的  $x, y$  方向都补偿成近似平行,需要在  $x$  和  $y$  方向使用焦距不同的负柱透镜,如图 2 所示。

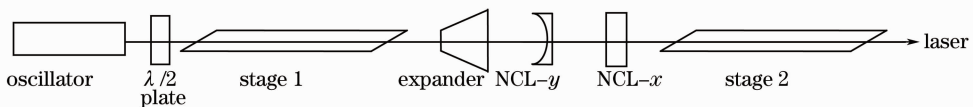


图 2 实验系统的光路示意图(NCL- $x$  和 NCL- $y$  分别表示  $x$  和  $y$  方向的负柱面镜)

Fig. 2 Optical sketch of the experimental system (NCL- $x$  and NCL- $y$  stand for negative cylindrical lens in the  $x$  and  $y$  direction respectively)

### 3 理论分析

针对结构设计,首先采用修正的 Frantz-Nodvik 方程对该板条放大器的放大能力进行估算。计算

$$E_{\text{out}} = \frac{E_s A \cos \theta}{\alpha} f(2-f) \cdot \ln \left\{ 1 + \left\{ \exp \left[ \frac{\alpha E_{\text{in}}}{A E_s \cos \theta} \cdot \frac{1}{f(2-f)} \right] - 1 \right\} \cdot \exp \left( \frac{E_{\text{store}}}{A E_s \cos \theta} \right) \right\}, \quad (1)$$

式中  $E_s$  为 Nd : YAG 晶体的饱和能量<sup>[7]</sup>,  $E_s = (h\nu)/\sigma$ ,  $h\nu$  是波长为 1.064  $\mu\text{m}$  时光子的能量,  $\sigma$  为  $\text{Nd}^{3+}$  离子  $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$  能级的发射截面;  $A$  为板条的截面积;  $\theta$  为激光在板条内的传输角(激光束与  $z$  轴的夹角);  $\alpha$  为四能级系统的抽取系数<sup>[8]</sup>,  $f$  定义为板条的填充因子,表示激光充满板条的程度<sup>[8]</sup>,  $f = l/L$ , 如图 3 所示。 $E_{\text{store}} = \eta_i \eta_a \eta_{\text{st}} \eta_s \eta_e \eta_q E_{\text{LD}}$  为板条内存储的能量,  $E_{\text{LD}}$  为每个抽运周期内所有 LD 抽运脉冲的能量之和。 $\eta_i$  为从 LD 发出的抽运光到板条表面的传输效率;  $\eta_a$  为板条对已经耦合入板条的抽运光的吸收效率;  $\eta_{\text{st}}$  为由板条的荧光损耗引进的效率;  $\eta_s$  为斯托克斯效率;  $\eta_e$  为板条内激光的模式体积和板条的增益体积的耦合效率,即激光在板条内经过的区域的体积与板条内被抽运的区域的体积之比;  $\eta_q$  为量子效率。(1)式中各参量的初始取值如表 1 所示。

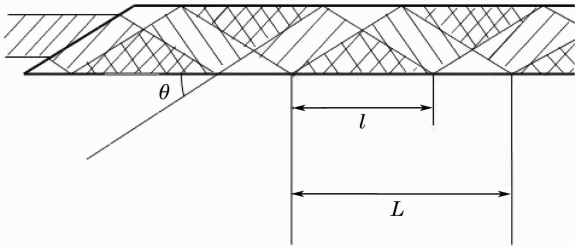


图 3 板条内激光束的光路示意图

Fig. 3 Geometry of a zig-zag slab

表 1 部分物理量的意义与取值

Table 1 Meaning and value of part of parameters above

Parameter	Value
Saturation fluence $E_s / (\text{J}/\text{cm}^2)$	0.67
Cross-sectional area $A / \text{cm}^2$	0.25
Propagation angle $\theta / (^\circ)$	32
Extraction parameter $\alpha$	1
Fill fraction of slab $f$	0.56
Energy stored in slab $E_{\text{store}}$	$\eta_i \eta_a \eta_{\text{st}} \eta_s \eta_e \eta_q E_{\text{LD}}$
Pump pulse energy $E_{\text{LD}} / \text{J}$	1.08
Beam overlap efficiency $\eta_e$	0.78
Quantum efficiency $\eta_q$	0.95 <sup>[9]</sup>

中,用  $E_{\text{in}}$  表示输入激光脉冲能量,用  $E_{\text{out}}$  表示放大后输出激光脉冲能量,输入输出脉冲能量的关系为<sup>[7]</sup>

考虑到板条内部的温度分布直接影响放大脉冲光束质量,因此通过求解热传导稳态偏微分方程来深入分析板条内部的温度  $T(x, y, z)$  分布特征<sup>[10]</sup>

$$\nabla \cdot (\nabla T) + \frac{Q}{\lambda(T)} = 0, \quad (2)$$

(2)式必须满足下列边界条件

$$\begin{aligned} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)_1 &= \left( \lambda_c \frac{\partial T}{\partial x} \right)_2, \quad T_1 = T_c, \quad x = \pm \frac{l}{2} \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial y} &= h(T - T_\infty), \quad y = \pm \frac{w}{2} \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial z} &= h(T - T_\infty), \quad \text{end face} \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $\lambda/\lambda_c$  为板条和热沉的热传导系数比,  $T_1/T_c$  为板条和热沉的接触面上的温度比,  $h$  为表面对流系数,为 5  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,  $T_\infty$  为环境温度(20  $^\circ\text{C}$ )。在理论计算时,把坐标原点设在板条中心。板条内热量(流)密度  $Q$  是板条内位置的方程,典型地取为板条储能密度的 32%<sup>[7]</sup>。

板条温度分布的不均匀必然产生热致应力。由 Hook 定律,可得出反映板条介质内部的热应力关系式<sup>[11,12]</sup>

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \frac{E}{1+\nu} \left[ \epsilon_{ij} + \left( \frac{\nu}{1-2\nu} \right) (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) \delta_{ij} - \right. \\ &\quad \left. \left( \frac{1+\nu}{1-2\nu} \right) \alpha_e T \delta_{ij} \right], \quad i, j = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $\sigma_{ij}$  为激光介质的弹应力分量,  $\epsilon_{ij}$  为形变分量,  $\alpha_e$  为热膨胀系数,  $E$  为杨氏模量,  $\nu$  为泊松比,  $\delta$  是 Kronecker 函数。

利用有限元分析法(FEA)解(2),(4)式得到板条的温度分布和应力分布,如图 4 所示。FEA 对选定形状和尺寸的晶体,设置抽运参量和边界条件(由冷却方式决定),利用自动网格生成器在晶体内部生成大量等间距的网格,对热传导方程进行数值求解,并通过三维可视化程序,给出温度和应力分布的三维视图<sup>[13]</sup>。由模拟结果可以看出,板条抽运面上与 LD 对应的抽运点位置[图 4(a)中深色区域]由于吸收的抽运能量最多因此温度最高,而板条其他位置的温度随离抽运点的距离增加而逐渐降低,且由于

板条通过上下冷却面与热沉传导散热,因此板条冷却面的温度比板条中心的温度低,这两个原因使板条内形成温度梯度,数据显示板条的最高温度和最低温度分别为 30.2 ℃ 和 20 ℃,因此总体温度和温度梯度都较低。相应地,由于在应力分布图中板条抽运面上与 LD 对应的抽运点位置温度最高,因此

板条受热膨胀,但由于板条的冷却面被热沉夹持,所以在抽运点对应的棱边处[图 4(b)中深色区域]应力最高,数据显示最高应力仅为  $3.8 \times 10^7$  Pa,远低于 Nd:YAG 晶体的断裂阈值<sup>[14]</sup>。因此,放大器工作时板条内部不会出现严重的热效应。

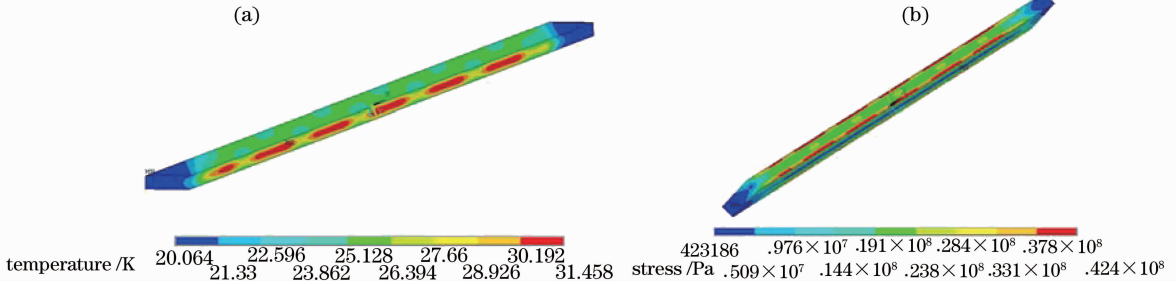


图 4 单个板条在 LD 抽运功率为 126 W 时板条内温度(a)与应力(b)分布图

Fig. 4 Temperature (a) and stress (b) distributions in a single slab when the pump power of LD is 126 W

### 4 实验结果

首先实验测量了板条晶体的热焦距。在整体抽运功率(252.5 W)条件下,将信号探测光通过两级放大器,测量出射光束在  $x, y$  方向最小光斑出现的位置,取该位置离板条出射面的距离为板条的热焦距。采用上述方法测得板条晶体在  $x$  方向的热焦距为  $f_x = 0.6$  m,  $y$  方向的热焦距为  $f_y = 3.0$  m。很明显  $x, y$  方向的热透镜效应存在明显的不同。对于反弹结构的 zig-zag 板条,在  $x$  方向,由于板条通过两

散热面传导散热,因此在板条中心和散热面之间存在较大的温度梯度,所以  $x$  方向上的焦距较短。而在  $y$  方向,由于“Z”字形的光路在 zig-zag 方向上补偿了一阶热透镜,因此在  $y$  方向上焦距较长。

其次实验对板条晶体的热退偏程度进行了测量,测量装置如图 5 所示。在抽运功率为 252.5 W 时,使用功率计测得经过检偏器的激光功率,再与不加检偏器时的激光功率比较,得到晶体热致退偏损耗仅为 1.5%。

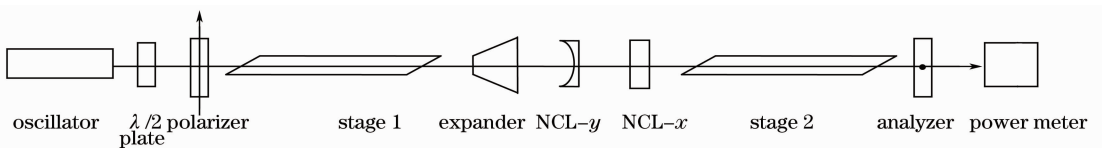


图 5 热退偏损耗测试光路示意图

Fig. 5 Optical schematic for testing depolarization loss

然后实验使用自行研制的单频激光振荡器输出的脉冲激光作为放大器的输入信号进行放大能力测试。振荡器输出的平均功率为 1.1 W,脉宽为 11.3 ns,重复频率为 125 Hz。实验中通过改变放大器 LD 的驱动电流以改变抽运功率输入,获得不同抽运功率下的放大倍率。图 6 中的实线代表实际测得的放大器输出功率与抽运功率的关系曲线。虚线为根据(1)式计算获得的该放大器输出功率和抽运功率关系的理论曲线,两者符合得相当好。

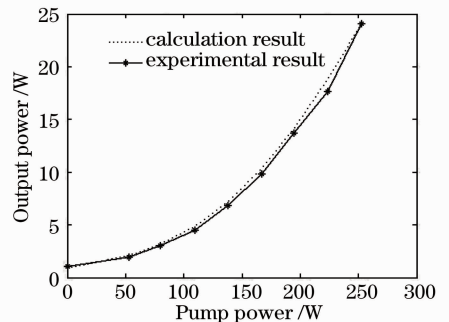


图 6 输出脉冲功率与抽运脉冲功率的关系曲线  
Fig. 6 Relationship between output pulse power and pump pulse power

根据图 6 的实验数据,可以推算得放大器在最大抽运条件下的放大倍率为

$$g = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{24.1 \text{ W}}{1.1 \text{ W}} \approx 22, \quad (5)$$

相应的提取效率

$$\eta_e = \frac{P_{\text{ex}}}{P_{\text{store}}} = \frac{P_{\text{out}} - P_{\text{in}}}{\eta_t \eta_a \eta_s \eta_{\text{ASE}} \eta_{\text{qd}} \eta_c \eta_d \eta_{\text{LD}}} = \frac{24.1 \text{ W} - 1.1 \text{ W}}{0.3 \times 252.5 \text{ W}} = 30.3\%. \quad (6)$$

从图 6 中可以看出,输出脉冲功率与抽运脉冲功率的关系曲线近似于指数曲线,因此此时放大器正工作在小信号增益的状态下,这正是此时的提取效率不太高的原因。

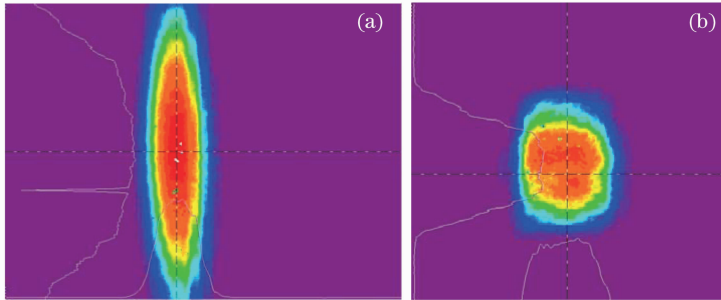


图 7 入射激光(a)和出射激光(b)的近场光斑分布

Fig. 7 Near field beam profile of the input laser (a) and output laser (b)

放大激光脉冲的光束质量用 Spiricon 公司生产的光束质量分析仪进行了测量,当 LD 抽运功率为 252.5 W 时输出,放大激光光束质量如图 8 所示[图 8(b)中的两条拟合曲线显示输出激光在  $x, y$  两个方向上的腰斑位置不同,这是因为第二级板条在  $x$  方向上的热透镜强于  $y$  方向]。结果显示输出激光的光束质量  $M_x^2 = 1.53, M_y^2 = 1.27$  与输入激光的光束质量  $(M_x^2, M_y^2) = 1.2$  对比可以看出,由于放大器设计合理有效地降低了板条的热效应,使得激光经

放大后光束质量的恶化很小。

在实验中,用 PIN 管分别测试了两级放大器输入激光和输出激光的脉宽,分别为 11.3 ns 和 8.9 ns (如图 9 所示)。这是由于脉冲前沿进入板条时,反转粒子数密度最大,可以得到很高的增益。但到脉冲后沿进入板条时,上能级的粒子数几乎被抽空,只能得到很小的增益。其结果就引起脉冲形状变尖,脉宽变窄。

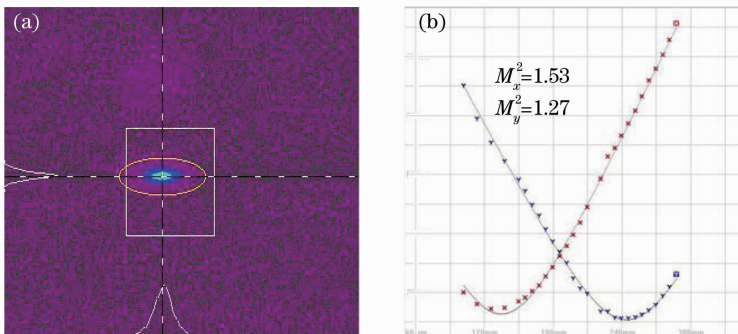


图 8 输出激光的光束质量

Fig. 8 Beam quality of output laser

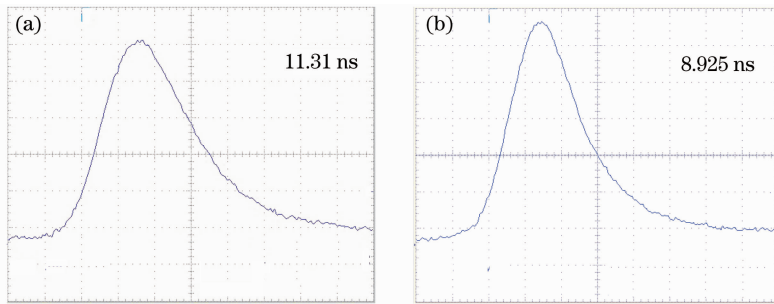


图 9 输入激光(a)与输出激光(b)的脉宽

Fig. 9 Pulse durations of the input laser (a) and output laser (b)

## 5 结 论

在实验设计的两级双侧面抽运、双侧面传导冷却的板条激光放大器中,采用双侧面反弹点抽运技术,有效地提高了抽运光的利用效率,并达到了同时减少晶体内热沉积的效果。在用该激光放大器对平均功率 1.1 W,脉宽 11.3 ns,光束质量( $M_x^2, M_y^2$ )为 1.2, 125 Hz 重复频率运转的单频脉冲激光进行放大时,输出平均功率 24.1 W,获得了约 22 倍的放大增益,输出脉冲的脉宽略有压缩,为 8.9 ns,输出激光光束质量  $M_x^2=1.53, M_y^2=1.27$ ,放大器总体提取效率为 30.3%。

## 参 考 文 献

- 1 R. J. St. Pierre, D. W. Mordaunt, H. Injeyan. Diode array pumped kilowatt laser [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1997, **3**(1): 53~58
- 2 F. E. Hovis, J. Edelman, T. Schum *et al.*. Recent progress on single frequency lasers for space and high altitude aircraft applications [C]. *SPIE*, 2008, **6871**: 68710E
- 3 K. Tei, M. Kato, Y. Niwa *et al.*. Diode-pumped 250-W zigzag slab Nd:YAG oscillator-amplifier system [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(7): 514~516
- 4 Xiuhua Ma, Jinzi Bi, Xia Hou *et al.*. Conductively cooled all-solid-state zigzag slab laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(5): 366~368
- 5 Cheng Xiaojin, Xu Jianqiu. Research on parasitic oscillation in slab amplifiers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1827~1830
- 程小劲, 徐建秋. 板条放大器中寄生振荡的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1827~1830
- 6 Tang Jingping, Hu Lili, Meng Tao *et al.*. Cladding glass' refract index match up to the laser glass[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1573~1578

唐景平, 胡丽丽, 孟 涛等. 激光玻璃与包边玻璃的折射率匹配 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1573~1578

- 7 W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996
- 8 J. M. N. Eggleston, L. M. Frantz, H. Injeyan. Derivation of the Frantz-Nodvik equation for zig-zag optical path, slab geometry laser amplifiers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(8): 1855~1862
- 9 Ma Xiuhua. Studies of Techniques and Thermal Effect for Spaceborne Conductively Cooling All Solid-state Laser [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008. 83
- 马秀华. 传导冷却空间全固态激光器热效应及其关键技术研究 [D]. 上海:中国科学院上海光学精密机械研究所, 2008. 83
- 10 B. Chen, Y. Chen, J. Simmons *et al.*. Thermal lensing of edge-pumped slab lasers-I [J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **82**(3): 413~418
- 11 J. M. Eggleston, T. J. Kane, K. Kuhn *et al.*. The slab geometry laser-part I: theory [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1984, **QE-20**(3): 289~301
- 12 Wang Jianlei, Li Lei, Qiao Liang *et al.*. Theoretical analysis of temperature and stress distribution in end-pumped composite ceramic Nd:YAG laser slab[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1777~1783
- 王建磊, 李 磊, 乔 亮等. 端面抽运复合 Nd:YAG 陶瓷板条激光介质温度和应力分布的理论分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1777~1783
- 13 Shao Jie, Li Xiaoli, Feng Yutong *et al.*. LD-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser and its thermal effects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 497~501
- 邵 杰, 李小莉, 冯宇彤等. 激光二极管端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条激光器及其热效应[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 497~501
- 14 Hou Liqun, Zu Jifeng, Dong Yue *et al.*. Comparison of laser characteristics of neodymium doped glass, YAG and GGG operating in heat capacity mode [J]. *High Power Laser and Partical Beams*, 2006, **18**(6): 881~885
- 侯立群, 祖继锋, 董 玥等. 钕玻璃, Nd:YAG 和 Nd:GGG 热容激光特性比较[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(6): 881~885