

可低温工作的窄脉冲宽温激光器

白家荣^{1,2}, 刘源^{1*}, 钟朝阳¹, 孟洁¹, 施君杰¹, 王明建¹, 孟俊清¹, 侯霞¹, 陈卫标¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 报道了一种可在低温环境下和 100 °C 以上的宽温范围内稳定工作的纳秒级被动调 Q 的 Nd:YAG 激光器。谐振腔采用抗失谐的双 Porro 棱镜组合腔型, 以热电制冷器控温的垂直腔面发射激光器侧面抽运 Nd:YAG 板条晶体, 被动调 Q 晶体为 Cr⁴⁺:YAG。在抽运峰值功率为 1 kW, 重复频率为 1 Hz 的条件下, 测量了激光器在不同温度下的工作情况。结果表明在 -75~40 °C 温度范围内, 激光输出平均能量为 18.79 mJ, 标准差为 2.29 mJ, 脉宽约为 4 ns, 近场光斑直径约为 5 mm, 远场发散角小于 0.9 mrad。激光器体积小、结构紧凑、可靠性高, 十分适合宽温范围尤其是低温环境下的空间激光应用。

关键词 激光器; 低温工作; 垂直腔面发射激光器; 宽温

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0101004

Narrow Pulse Width lasers Operating over Wide Range of Low Temperature

Bai Jiarong^{1,2}, Liu Yuan^{1*}, Zhong Chaoyang¹, Meng Jie¹, Shi Junjie¹,

Wang Mingjian¹, Meng Junqing¹, Hou Xia¹, Chen Weibiao¹

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In this study, we describe a passively Q-switched Nd:YAG nanosecond laser capable of operating stably over 100 °C and at low temperatures. The resonator is based on a stable, double-Porro-prism cavity structure. A Nd:YAG slab is side-pumped via a vertical-cavity, surface-emitting laser array, and the temperature is controlled by a thermoelectric cooler. The passively Q-switched crystal is Cr⁴⁺:YAG. We have tested the performance of the laser at different temperatures with a 1 kW peak pump power and 1 Hz repetition frequency. The results show that the average output energy of the laser is 18.79 mJ, the standard deviation is 2.29 mJ, the pulse width is ~4 ns, the near-field spot diameter is ~5 mm, and the far-field divergence angle is less than 0.9 mrad in the temperature range of -75-40 °C. The lasers has a small size, compact structure, and high reliability. It is thus suitable for space-laser applications under a wide range of low-temperature conditions.

Key words lasers; operate at low temperature; vertical cavity surface emitting laser; wide temperature

OCIS codes 140.3580; 140.3540; 140.3538; 140.7260; 140.3410

1 引 言

由于具有能量转换效率高、体积小、能耗低等优势, 半导体激光器抽运的全固态激光器已成为国内外空间激光应用和军用激光器件的首选光源^[1-2]。但由于传统的抽运 LD(laser diode)的发射波长会随温度的变化发生漂移(约 0.3 nm/°C), 无法与激

光晶体吸收谱匹配, 使得激光器难以在复杂温度环境中稳定工作, 所以能在宽温度范围内稳定工作的固体激光器已成为一大研究热点。

目前主要有三种方式实现激光器宽温运行。一是减小抽运源发射波长随温度变化的灵敏度, 如用水冷机或热电制冷器(TEC)对抽运源直接控温, 或采用特殊抽运源, 如垂直腔面发射激光器

收稿日期: 2018-08-09; 修回日期: 2018-09-19; 录用日期: 2018-10-17

基金项目: 中国科学院青年创新促进会人才项目(2016226)

* E-mail: liuyuantd@126.com

(VCSEL), 其波长随温度变化的灵敏度约为 $0.07 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。2005 年, 美国的 McCarthy 等^[3] 设计的激光指示器利用 TEC 控制 LD 阵列温度, 使 Nd:YAG 在 795 nm 和 807 nm 两个吸收带处工作, 实现了在 $-40 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 内激光输出能量大于 40 mJ 。2013 年, 日本的 Tsunekane 等^[4] 设计了一种利用 VCSEL 抽运 Nd:YAG 晶体的微型被动调 Q 激光器, 在 $10 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内实现了大于 1 mJ 的激光能量稳定输出。二是采用特殊抽运方式降低抽运源发射谱与晶体吸收谱的失配, 如多波长抽运或 zig-zag 型抽运方式。文献[2]中介绍了一种三波长抽运的超小型激光指示器, 在 $-30 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内激光输出能量为 $52 \sim 60 \text{ mJ}$, 脉宽为 $25 \sim 30 \text{ ns}$ 。2002 年, Bruno 等^[5] 提出了一种混合式抽运 zig-zag 板条的激光器, 可在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内稳定工作。三是选择特殊的激光晶体以增加对抽运光的吸收效率, 如在 808 nm 附近吸收峰较宽的 Nd:GdVO₄, 或是采用长晶体以增强对波长漂移后的抽运光的吸收。2017 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所的鲁绍文等^[6] 以 Nd:GdVO₄ 为增益晶体设计了一种激光器, 在 $20 \sim 36 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内放大级激光输出能量稳定在 2 mJ 附近, 抖动量为 5% 。2016 年, Lee 等^[7] 以增大晶体吸收长度的抽运方式和 U 形腔结构设计的激光指示器在 $-46 \sim 71 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内激光输出能量大于 60 mJ 。另外, 还有综合了以上多种方式的固体激光器^[8-9], 都实现了一定的宽温运行效果。

本文以 TEC 控温的 VCSEL 阵列作为激光器抽运源, 侧面抽运 Nd:YAG zig-zag 板条晶体; 在采用双 Porro 棱镜作为腔镜的基础上, 创新地设计了轴对称单端悬臂式谐振腔。多措并举, 使激光器可在 $-75 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内较为稳定运行。激光器整体结构紧凑, 可靠性高, 宽温工作范围大, 且 $115 \text{ }^\circ\text{C}$ 的

宽温工作能力优于国内外绝大部分已公开的相关文献报道, 而其最低工作温度是目前已知的宽温激光器中所达到的最低温度。另外, 部分相关文献在实验时只是改变了抽运源的温度, 并没有改变整个激光器所处的环境温度, 不是真正意义上的宽温激光器, 而本文所报道的激光器是将整体置于温变箱中进行的实验测试。因此, 本文可为此类激光器在特殊环境下的使用提供可行方案。

2 实验原理

2.1 激光器装置

激光器结构图如图 1 所示, 抽运源为镭科公司生产的 VCSEL 阵列, 阵列由 5 个 VCSEL 芯片组成, 每个芯片尺寸为 $4.5 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$, 芯片间隔为 1 mm , 在驱动电流为 170 A , 温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 其发射谱中心波长在 806.5 nm 附近。VCSEL 发散全角为 15° , 整个阵列用一个焦距为 8 mm 的柱透镜聚焦照射到 Nd:YAG 板条晶体的侧面。晶体长 45 mm , 截面为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的正方形, 掺杂度为 1% , 两个端面切割成布儒斯特角以产生线偏振光。晶体抽运面镀有 808 nm 波段的高透膜, 相对的另一侧面镀有反射率为 99.8% 的 808 nm 高反膜, 以提高对抽运光的利用率, 此面与钨铜热沉接触, 两个端面镀有 1064 nm 高透膜。两个棱线互相垂直的 Porro 棱镜组成谐振腔的腔镜, 其中一个棱镜的棱线与桌面约成 60° 角。由于光线经 Porro 棱镜反射后会产生退偏效应, 经过偏振片后部分光透过偏振片在腔内继续振荡, 部分光被反射输出, 输出耦合率约为 60% ^[10]。 0.57λ 波片用于补偿退偏的激光。板条晶体两侧的光楔组用于微调光路, 优化输出。被动调 Q 晶体 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 初始透过率为 20% 。整个谐振腔置于一个殷钢骨架中, 总长约为 110 mm 。

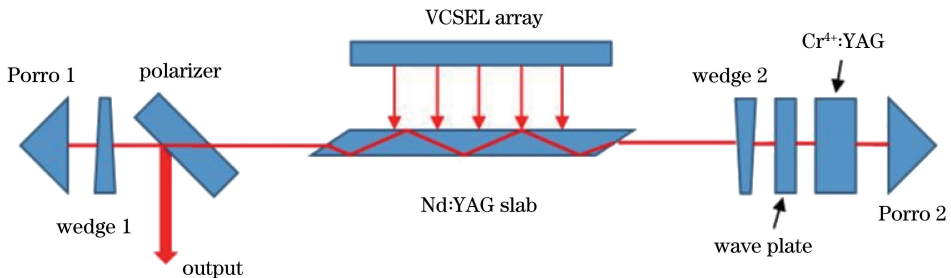


图 1 激光器结构图

Fig. 1 Laser structure diagram

与传统的边发射 LD 相比, VCSEL 因其出光方向与腔面垂直, 光斑圆形对称, 发散角也比 LD 快轴方向的发散角小很多, 而且其温度稳定性极好, 发射谱中心波长随温度的漂移量约为 $0.07 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 适合作为宽温激光器的抽运源^[11]。本激光器采用 VCSEL 侧面抽运 Nd:YAG zig-zag 板条晶体, 激光在晶体内全内反射走之字形路线, 晶体内的温度梯度只沿抽运方向, 在长度方向对称分布, 而且板条晶体散热面积大, 可以大大减弱热透镜和热畸变等热效应的影响, 提高输出光束质量^[12]。Cr⁴⁺:YAG 是一种可在宽温环境下工作的调 Q 晶体, 若抽运能量合适, 即可保证良好的激光单脉冲输出, 而且在低温下其工作性能更佳^[13]。双 Porro 棱镜腔型可抵消因振动和光学元件形变导致的轻微失谐。本设计采

用轴对称单端悬臂式的谐振腔结构, 置于殷钢骨架中的谐振腔以板条晶体为中心, 其他光学元件以大致对称的方式安装, 利用桌面上的夹具只固定靠近激光输出的一端(即图 1 中的左端)的骨架, 其他部分悬空。这样当温度变化时, 一方面可以保证腔内元件的形变沿轴向对称, 而不发生俯仰变化; 另一方面, 单端悬臂式结构整体只会朝一个方向形变, 而元件之间的相对法线不变, 如图 2(a) 所示, 不会像常用的谐振腔元件固定方式(两端或元件各自固定)那样, 腔形发生扭曲, 元件之间的相对法线偏移, 使谐振腔失谐, 如图 2(b) 所示。殷钢材料的热膨胀系数很小, 取值范围为 $0.5 \times 10^{-6} \sim 2.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 其在低温和高温下的形变极小。正是以上这些因素保证了激光器可在宽温环境下运行。

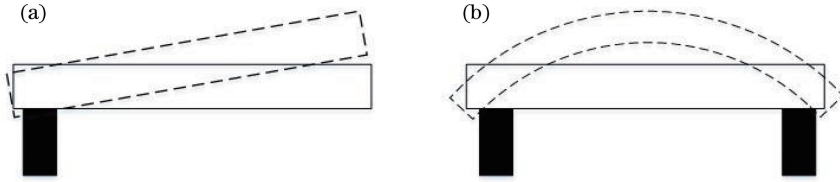


图 2 不同谐振腔型因温度变化而形变的示意图(虚线框为形变后的谐振腔)。(a)单端固定;(b)双端固定

Fig. 2 Deformation of different resonator types due to temperature changes (Dashed frames are deformed resonators).

(a) Single end fixed; (b) double end fixed

2.2 仿真计算

抽运光经柱透镜聚焦后, 在晶体表面上的分布

仿真结果如图 3 所示。抽运光斑长约 28 mm, 宽约 2 mm。

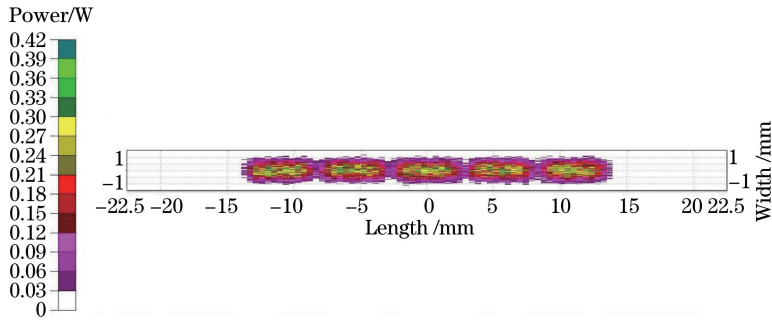


图 3 晶体表面抽运光分布

Fig. 3 Distribution of pump light on crystal surface

假设抽运光为理想高斯光束, 在晶体长度方向抽运能量分布均匀, 在抽运面上为高斯分布, 利用 COMSOL 软件仿真得到晶体和热沉上的温度场分布, 结果如图 4 所示。仿真计算了脉冲抽运 15 min 的结果, 初始温度和环境温度均为 20°C , 晶体上的最高温度为 23.1°C , 最低温度为 23.0°C , 其温度梯度很小, 可保证晶体不会产生严重畸变而影响激光质量。晶体的最高温度随时间变的曲线如图 5 所示, 从图中可以看出, 大约 600 s 后, 晶体的温度几乎不再变化, 即达到稳态。

根据调 Q 激光器速率方程^[14]可以得到

$$\frac{d\phi}{dt} = \phi \left(c\sigma n \frac{l}{L} - \frac{\epsilon}{t_R} \right), \quad (1)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma n \sigma c \phi, \quad (2)$$

$$n_i - n_f = n_i \ln \frac{n_i}{n_f}, \quad (3)$$

$$E = \frac{Ah\nu}{2\sigma\gamma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right), \quad (4)$$

式中: ϕ 为光子数密度; c 为真空中的光速; σ 为激光

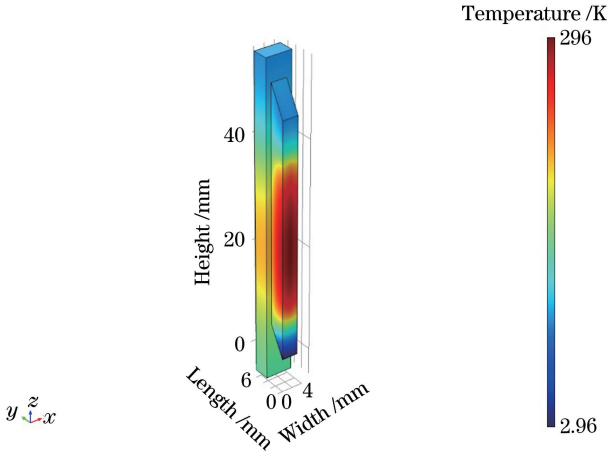


图 4 晶体和热沉的温度场分布

Fig. 4 Temperature distribution of the crystal and heat sink

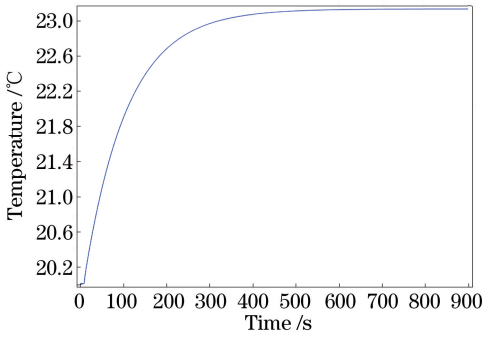


图 5 晶体的最高温度随时间变化曲线

Fig. 5 Highest temperature of the crystal versus time

介质的受激发射截面; n 为反转粒子数密度; l 为激光介质长度; L 为谐振腔腔长; ϵ 为腔内往返损耗, 包括输出耦合损耗、散射、衍射和吸收损耗以及 Q 开关损耗; $t_R = 2L/c$ 为光子往返渡越时间; γ 为能级简并因子; n_i, n_f, n_t 分别表示激光介质内初始反转粒子数、最终反转粒子数、阈值反转粒子数; E 为激光输出能量; A 为有效光束截面; $h\nu$ 为激光光子能量; R 为输出镜反射率, 在本研究中表示偏振片的透过率, 即输出耦合率为 $1-R$ 。

根据 Degnan 提出的最佳耦合调 Q 激光理论^[15-16], 利用无量纲参量 $z = \frac{2g_0 l}{\delta} = \frac{n_i}{n_f}$ 可大大优化计算流程, 其中 g_0 为小信号增益系数, δ 为衍射和吸收损耗。由此可以得到调 Q 激光器最佳输出能量和脉冲宽度分别为

$$E_{\text{opt}} = \frac{Ah\nu}{2\sigma\gamma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln z, \quad (5)$$

$$t_p = \frac{t_R}{\delta} \left\{ \frac{\ln z}{z[1 - a(1 - \ln a)]} \right\}, \quad (6)$$

其中,

$$a = \frac{z-1}{z \ln z}. \quad (7)$$

利用表 1 中的数据 and (5)~(7) 式及参量 z 可求得激光最佳输出能量 $E_{\text{opt}} = 24.7 \text{ mJ}$, 脉宽 $t_p = 3.8 \text{ ns}$ 。

表 1 理论计算所用参数

Table 1 Parameters for theoretical calculation

Parameter	Value	Parameter	Value
l / mm	45	g_0 / cm^{-1}	0.2
L / mm	110	γ	1
δ	0.1	A / cm^2	0.028
σ / cm^2	2.8×10^{-19}	$h\nu / \text{J}$	1.868×10^{-19}
$c / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3×10^8	R	0.4

为了验证 VCSEL 良好的温度稳定性, 仿真比较了无温控时, 不同环境温度下, 相同功率的 VCSEL 和 LD 分别抽运本实验激光器的激光输出能量, 结果如图 6 所示。可以看出, 在大约 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上的范围内, 以 VCSEL 作为抽运源, 激光输出能量较为平稳, 在 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下, 输出能量明显下降, 是由于此时 VCSEL 的中心波长在 $800 \sim 804 \text{ nm}$ 之间, Nd:YAG 对这一波段的光的吸收系数很小, 同时晶体的吸收长度不大, 从而导致激光输出能量很低。而 LD 作为抽运源时, 不同温度下激光输出能量起伏变化较大。可以预测, 如果以 VCSEL 作为抽运源, 并加以控温装置, 那么激光能量在低温和高温环境下能保持一致且平稳的输出。

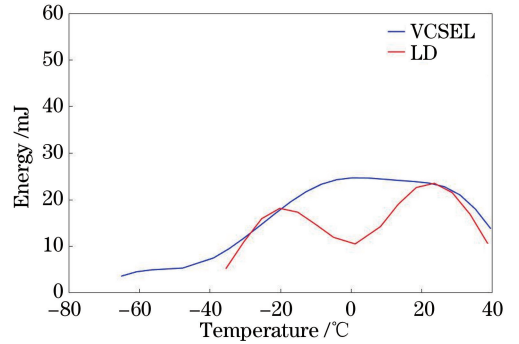


图 6 不同抽运源的激光输出能量随温度变化的仿真结果

Fig. 6 Simulative results about laser output energy of different pump source versus temperature

3 实验结果

3.1 室温下激光性能

首先测试了在室温 ($22 \text{ }^\circ\text{C}$ 附近) 环境下激光器的输出性能。TEC 控温 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 抽运电流为 170 A , 脉宽为 $240 \text{ } \mu\text{s}$, 重复频率为 1 Hz , 激光脉冲能量随脉冲数变化的曲线如图 7 所示, 能量输出比较稳定, 几乎都在 20 mJ 以上, 平均输出能量为 21.5 mJ , 标

准差为1.35 mJ,抖动率(标准差/平均值)为6.3%。图8为激光脉冲波形,脉冲宽度约为4.3 ns,与理论计算基本相符,为基模单脉冲。图8右上角为激光近场光斑,光斑直径为4.5 mm。光束远场发散角约为0.86 mrad。

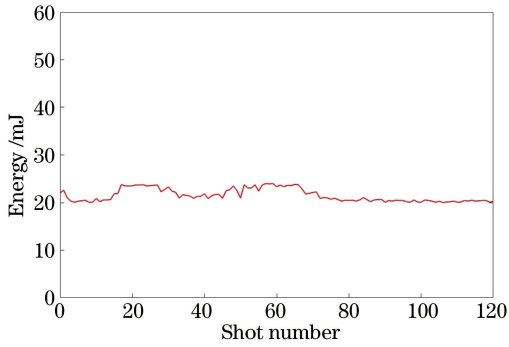


图7 室温下激光输出能量的稳定性

Fig. 7 Stability of laser output energy at room temperature

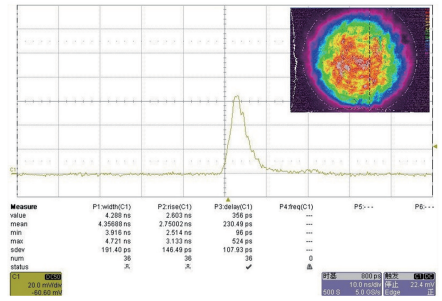


图8 室温下激光脉冲波形与近场光斑

Fig. 8 Laser pulse waveform and near-field spot at room temperature

3.2 宽温实验结果

将激光器置于温变箱中,测量了多个温度点下的激光输出能量和光斑大小。每个温度点下恒温存储激光器1 h,存储时抽运驱动电源和TEC电源均关闭。测量时,TEC控温20℃,抽运驱动电源设置与室温下测量时相同。图9为激光输出能量和光斑大小随温度变化的曲线(探测器位于同一位置)。

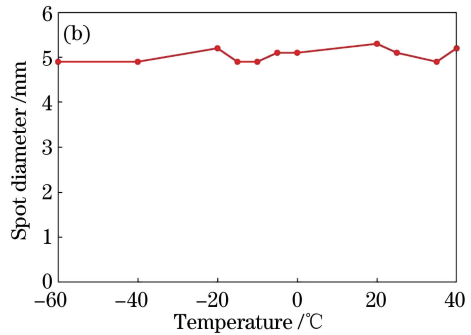
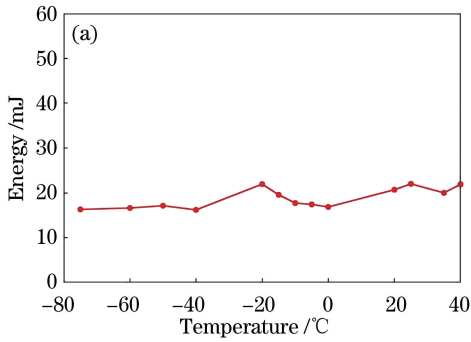


图9 激光输出能量(a)和激光光斑直径(b)随温度变化曲线

Fig. 9 Laser output energy (a) and laser spot diameter (b) versus temperature

在-75℃至40℃范围内,温度为-40℃时激光输出能量最低,为16.19 mJ;温度为25℃时激光输出能量最高,为22 mJ。此温度范围内平均输出能量为18.79 mJ,标准差为2.29 mJ,抖动率为12%。曲线整体较为平稳,符合之前的预测。但0℃以下的能量普遍低于0℃以上的能量,而且-20℃处的能量明显高于其附近温度的能量,出现这种情况的原因有以下几种可能。1)抽运源输出功率在低温下升高。但由于有TEC控温,此原因造成的影响非常小。2)激光晶体的受激发射截面随温度的升高而降低。根据文献[17]提出的受激发射截面与温度的关系表达式,从40℃到-75℃,晶体的受激发射截面将增加约19%,但最终的输出能量变化不大。3)由于晶体、热沉和殷钢骨架的热膨胀系数不同,在同一温度下的形变量就不同,所以晶体会因

热沉等元件的形变而发生偏转,从而使光路发生偏移,影响激光输出能量。综合考虑,第三个原因是最可能对激光能量造成较大影响的因素。据此,可以考虑在晶体、热沉、骨架三者之间加入弹性较大的金属薄层,或者采用一体化设计,减小互相之间的形变影响,使光路保持稳定,从而使激光能量保持稳定。

测量了-60℃至40℃范围内的光斑直径变化,最大值为5.3 mm,最小值为4.9 mm,平均值为5 mm,标准差为0.15 mm,抖动率为3%。图10比较了40℃、0℃和-60℃下激光脉冲持续输出的情况,可以看出激光能量在20 mJ附近,起伏不大,比较平稳,各温度下的标准差分别为0.20, 1.21, 1.03 mJ,抖动率均小于6.8%,优于或接近室温下的结果。由此可见,该激光器在100℃以上的宽温范围内可以较为稳定的工作,而且光斑质量良好、稳定。

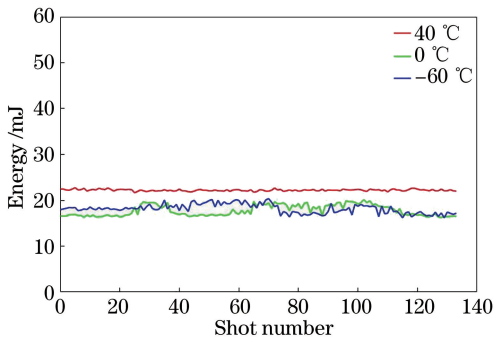


图 10 不同温度下的激光输出能量的稳定性

Fig. 10 Stability of laser output energy at different temperatures

4 结 论

报道了一种可在 100 °C 以上的温度范围内稳定运行的全固态被动调 Q 激光器, 系统结构紧凑, 可靠性高。采用 TEC 控温的 VCSEL 侧面抽运 Nd:YAG zig-zag 板条晶体, 以正交的双 Porro 棱镜为腔镜的轴对称单端悬臂式谐振腔。室温下, 激光输出能量为 21.5 mJ, 脉宽为 4.3 ns, 近场光斑直径为 4.5 mm, 远场发散角为 0.9 mrad。在 -75 °C 至 40 °C 范围内, 激光输出平均能量为 18.79 mJ, 抖动率为 12%, 近场光斑直径保持稳定, 在 5 mm 左右。该激光器温度稳定性好, 宽温范围为国内已知的最大温度范围, 且优于国外的大部分公开报道, 可工作的最低温度是已知的最低工作温度, 在结构设计和实验结果上分别有所创新和提高, 十分适合应用于特殊低温情况。如果在晶体和热沉之间加入弹性较大的金属薄片或设计一体化结构, 可进一步提高该激光器的能量稳定性。另外, 若使用多波长拼接的 VCSEL 抽运源或可以提高抽运吸收效率的特殊抽运方式等, 有望摆脱控温器件并扩大宽温工作范围。

参 考 文 献

[1] Yu Z Z, Hou X, Zhou C Y. 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. 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.

[2] Goldberg L, Nettleton J, Schilling B, *et al.* Compact laser sources for laser designation, ranging and active imaging [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6552: 65520G.

[3] McCarthy J C, Young Y E, Day R C, *et al.* Athermal, lightweight, diode-pumped, 1-micron transmitter [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5707:

237-243.

[4] Tsunekane M, Taira T. Compact and wide temperature acceptance of VCSEL-pumped micro-laser for laser ignition [C] // *Advanced Solid-State Lasers 2013*, October 27-November 1, 2013, Paris, France. Washington: OSA, 2013: ATu3A.58.

[5] Crépy B, Le Névé M, Montagne J, *et al.* Efficient, diode temperature insensitive Nd:YAG hybrid longitudinal/transversal-pumped zig-zag slab laser: delta concept [C] // *Advanced Solid-State Lasers*, 2002, February 3-6, 2002, Québec City, Canada. Washington: OSA, 2002: TuC4.

[6] Lu S W, Meng J, Zhao X Q, *et al.* Temperature insensitive Nd:GdVO₄ laser with high peak power and narrow pulse width [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0401009.
鲁绍文, 孟洁, 赵学强, 等. 高峰值功率窄脉宽宽温 Nd:GdVO₄ 激光器 [J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 0401009.

[7] Lee S T, Silver M, Barron A, *et al.* A compact laser target designator [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9834: 98340Q.

[8] Wei D K. Research on temperature insensitive laser technology and single-frequency double-pulse hybrid MOPA system [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
魏大康. 温度不敏感激光技术及单频双脉冲混合 MOPA 系统的研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.

[9] Chen S L, Zhang X, Jiang J, *et al.* VCSEL side-pumped all solid-state laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(10):1001001.
陈思露, 张鑫, 蒋静, 等. VCSEL 侧面泵浦的全固态激光器 [J]. *中国激光*, 2018, 45(10): 1001001.

[10] Yang H L. Study of high energy all-solid-state slab lasers for space applications [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016: 18-21.
杨海龙. 大能量空间全固态板条激光器的技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2016: 18-21.

[11] Li Y J, Zong N, Peng Q J. Characteristics and progress of vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 050006.
李玉娇, 宗楠, 彭钦军. 垂直腔面发射半导体激光器的特性及其研究现状 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 050006.

[12] Ma X H. 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: 15-20.

- 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: 15-20.
- [13] Yin S M, Wu Y, Sun N C. Influence of temperature on Cr^{4+} : YAG passive Q-switched laser plateau region [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2010, 8(1): 31-34.
- 尹升茂, 吴颖, 孙年春. 温度对 Cr^{4+} : YAG 被动调 Q 激光器坪区影响[J]. 光学与光电技术, 2010, 8(1): 31-34.
- [14] Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. Sun W, Jiang Z W, Cheng G X, Transl. Beijing: Science Press, 2002: 410-414.
- Walter Koechner. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社, 2002: 410-414.
- [15] Degnan J J. Theory of the optimally coupled Q-switched laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(2): 214-220.
- [16] Degnan J J. Optimization of passively Q-switched lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1995, 31(11): 1890-1901.
- [17] Zhao S Z, Chen L, Zhang L, *et al.* Study on temperature dependence of the 1.064 μm stimulated emission cross section of Nd:YAG crystal [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(2): 133-135.
- 赵圣之, 陈磊, 张路, 等. Nd:YAG 晶体 1.064 μm 受激发射截面随温度变化特性研究 [J]. 光子学报, 2004, 33(2): 133-135.