

VCSEL 侧面抽运的全固态激光器

陈思露^{1,2}, 张鑫¹, 蒋静¹, 孟俊清^{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 研究了一种 VCSEL(垂直腔表面发射激光器)侧面抽运的全固态激光器,报道了一种可以稳定工作的紧凑型 Nd:YAG 激光器。该激光器采用 VCSEL 阵列进行侧面抽运,利用微透镜阵列对 VCSEL 阵列进行准直,并以柱透镜将抽运光整形为线形光束以获得足够高的功率密度,以 Cr⁴⁺:YAG 作为可饱和吸收体进行被动调 Q,最终得到重复频率为 40 Hz、脉宽为 4 ns 及单脉冲能量为 2.1 mJ 的激光输出。测试结果表明,该激光器在较大的温度范围内都可以实现稳定的激光输出,同时具有结构紧凑、高抗失谐和高抗振动的特性,可作为未来空间激光探测及其他特殊环境下应用的光源。

关键词 激光器; 固体激光器; 垂直腔面发射激光器; 被动调 Q; 侧面抽运技术

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1001001

VCSEL Side-Pumped All Solid-State Lasers

Chen Silu^{1,2}, Zhang Xin¹, Jiang Jing¹, Meng Junqing^{1*}, 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 A kind of vertical-cavity surface-emitter laser (VCSEL) side-pumped all solid-state laser is studied. A compact and stable Nd:YAG solid-state laser is reported. The laser is side-pumped by VCSEL arrays, and the VCSEL arrays are collimated by microlens array. A cylindrical lens is used to reshape the pump beam into a linear beam to achieve high power density. Besides, the Cr⁴⁺:YAG crystal is used as saturable absorber to be the passive Q-switch. The laser output with 40 Hz repetition frequency, 4 ns pulse width and single pulse energy of 2.1 mJ is obtained. The experimental results show that the laser can achieve stable laser output in a large temperature range. The laser has a compact structure and high resistance to detuning and vibration. It can be used as a light source for future space laser detection and other special environments.

Key words lasers; solid-state lasers; vertical-cavity surface-emitter lasers; passively Q-switched; side-pumping technology

OCIS codes 140.3460; 140.3538; 140.3580; 060.3510

1 引 言

固体激光器被广泛应用于材料加工、半导体制造、工业印刷及激光雷达等领域,一般来说,固体激光器常用于对高峰值功率或高亮度有特殊要求的领域。固体激光器大多使用半导体激光二极管或者闪光灯对增益介质进行抽运,常见的增益介质为掺杂的玻璃或晶体。虽然使用光抽运价格低廉,但光谱较宽,抽运效率较低。半导体激光器(LD)则具有窄

带宽、低发散角和高效率等优点,是一种结构紧凑、抽运效率较高的抽运源。一般用作抽运源的 LD 多为边发射激光器,发光区域面积小,功率密度大,而发射光谱对温度变化较为敏感,发射光谱中心波长随温度变化的灵敏度一般约为 0.3 nm·°C⁻¹。以 Nd:YAG 晶体作为增益介质时,由于其在 800 nm 附近的吸收带宽较窄,在使用普通的边发射激光器作为抽运源时,为了获得稳定的输出,往往需要使用半导体制冷器(TEC)或者水冷等主动方式对抽运源

收稿日期: 2018-04-08; 修回日期: 2018-04-24; 录用日期: 2018-05-07

* E-mail: jqmeng@siom.ac.cn

温度进行精确的控制。在空间应用中,大多使用 TEC 对 LD 阵列进行温控。但 TEC 的制冷效率非常低,一般不超过 0.5,同时 TEC 的使用增加了抽运源的结构复杂度,使系统的可靠度大大降低。因此,发展温度不需要精确控制的全固态激光器是空间激光应用的一个重要目标。

近年来,随着垂直腔表面发射激光器(VCSEL)的发展,将低功率的单个发射器制备为大的二维平面阵列,VCSEL 作为高功率全固态激光器的抽运源获得越来越多的关注^[1-8]。美国陆军夜视和电子传感器委员会于 2011 年,利用 804 nm 输出的 VCSEL 阵列对 Nd:YAG 晶体进行端面抽运,通过改变 VCSEL 的工作电流得到抽运光不同的角向分布,使抽运光经聚焦透镜的强度分布发生变化,激光输出脉冲能量实现了从 9 mJ 到 18 mJ 的 2 倍可调性^[3]。Princeton Optronics 公司于 2011 年使用 VCSEL 阵列作为抽运源对 Nd:YAG 晶体进行侧面抽运,被动调 Q 时,得到脉宽为 4 ns,脉冲能量为 4.7 mJ 的 1064 nm 输出的线偏振脉冲光,脉冲经过外部倍频与四倍频后得到 2.5 mJ 的 532 nm 与 0.8 mJ 的 266 nm 脉冲输出;而在类似的装置下使用主动调 Q,使晶体在准三能级较弱的 946 nm 处发生跃迁,得到了 12 mJ 的脉冲能量,经倍频后得到脉宽为 17 ns 和脉冲能量为 5.6 mJ 的脉冲光^[4]。中国科学院上海光学精密机械研究所于 2016 年研制了一种利用光纤激光器作为种子光,经过以大功率 VCSEL 阵列抽运的 Nd:YAG 四通放大器,得到了重复频率为 300 Hz、脉冲能量为 317 mJ,脉宽在 2~6 ns 范围内可调节的 1064 nm 的激光输出^[6-11]。

与条形边发射 LD 相比,VCSEL 阵列具有成本低^[9],可靠性高^[10],可在宽温度范围使用^[11],发射谱宽极小[半峰全宽(FWHM)通常小于 2 nm],且发射的光束为小发散角(数值孔径)的均匀分布的圆形光束等优点。尤其是 VCSEL 的发射光谱中心波长对温度的敏感性较弱,发射光谱中心波长随温度漂移的系数仅为 $0.07 \text{ nm} \cdot \text{°C}^{-1}$,用作 Nd:YAG 晶体抽运源时,相对边发射激光器而言,对温度控制的要求大大降低,可以在没有 TEC 主动温控的情况下实现稳定激光输出。

本文以 Nd:YAG 板条晶体作为增益介质,使用 2 个 VCSEL 阵列组成的大功率面阵作为抽运源,并采用微透镜阵列对抽运光的一维方向进行准直,再使用柱透镜将抽运光整形为线形光束进行抽运,谐振腔采用双保罗(porro)棱镜超稳谐振腔,以 Cr^{4+} :

YAG 晶体作为可饱和吸收体进行被动调 Q。最终实现了单脉冲能量为 2.1 mJ,脉冲宽度为 4 ns,重复频率为 40 Hz 及光束质量因子分别为 $M_x^2 = 1.78$, $M_y^2 = 1.55$ 的激光输出。整个激光系统体积小,具有高抗失谐和高抗振动特性,并可在没有 TEC 主动温控的情况下在较大温度范围内稳定工作。

2 实验原理

2.1 抽运模块

本实验以中心波长为 805 nm 的 VCSEL 阵列作为抽运源,对 Nd:YAG 板条晶体进行侧面抽运。抽运模块由两个 VCSEL 阵列组成。每一个 VCSEL 阵列的发光区域为 $4.7 \text{ mm} \times 4.7 \text{ mm}$,发射区域内包含了 11500 个圆形发射单元,排列为 $115 \text{ pixel} \times 100 \text{ pixel}$,每个单元的发散角为 16° 全角。VCSEL 是表面发射激光器,发光区域面积大,抽运功率密度不够高,因此需要对抽运光进行整形,将其聚焦为线性光斑以获得足够的功率密度。但是 VCSEL 阵列的发光区是由 $115 \text{ pixel} \times 100 \text{ pixel}$ 的点源组成,因此采用微柱透镜阵列首先对抽运光的一维方向进行准直,然后通过柱面镜聚焦,将光斑整形为线型光斑进行抽运。微透镜阵列同样为 115 行,透镜周期为 $41 \mu\text{m}$,每个微透镜的有效焦距为 0.13 mm。发散角为 16° 空间立体角的 VCSEL 激光器经微透镜阵列准直后,在竖直方向上的发散角小于 1° 。再通过焦距为 7.5 mm 的柱面透镜整形将抽运光聚焦为 $0.8 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的线状光斑,对 Nd:YAG 板条晶体进行侧面抽运。VCSEL 抽运阵列的聚焦准直示意图如图 1 所示。

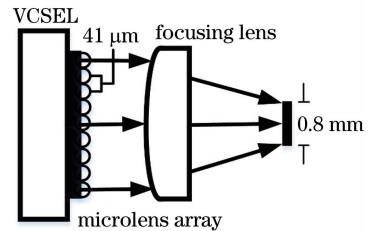


图 1 抽运模块的准直聚焦示意图

Fig. 1 Schematic of collimation and focusing of pump module

采用水冷板控制 VCSEL 热沉的温度,对 VCSEL 阵列的输出特性进行测量。当 VCSEL 热沉温度 T 为 23.9 °C 时,VCSEL 在重复频率为 40 Hz,脉冲宽度为 $230 \mu\text{s}$,工作电流 I 为 121 A 时的抽运脉冲能量为 46 mJ。对热沉温度分别为 8.8, 14.0, 19.9, 29.0 °C , 电流值分别为 90, 100, 110, 120 A 时的

VCSEL 输出的脉冲能量以及输出中心波长随工作温度的变化进行测试,结果如图 2(a)、2(b)所示。可以

看到,恒定电流下,VCSEL 的输出光谱具有较好的波长稳定性,温度漂移系数仅为 $0.06 \text{ nm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

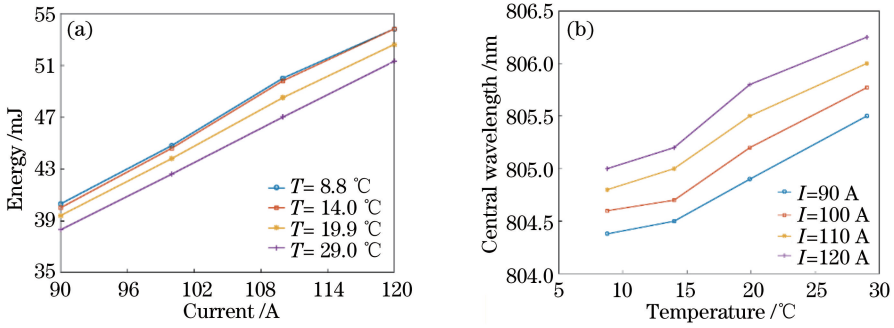


图 2 VCSEL 阵列的输出特性。(a)不同温度时 VCSEL 激光器输出脉冲能量与工作电流的关系; (b)不同工作电流时 VCSEL 激光器输出中心波长随温度的关系

Fig. 2 Output characteristics of VCSEL array. (a) Output pulse energy of VCSEL laser versus working current under different temperatures; (b) central wavelength of VCSEL laser versus temperature under different working currents

2.2 实验装置

实验采用掺杂浓度(离子数分数)为 1%,长度为 15.2 mm,宽度为 5 mm,厚度为 1.2 mm 的 Nd:YAG 晶体作为增益介质,晶体为 Zig-Zag 板条形状,激光在晶体内发生全内反射沿之字形传播;沿布儒斯特角切割晶体的两个端面,使晶体具有选偏的特性。

实验装置结构图如图 3 所示。两个正交双保罗棱镜(porro1 和 porro2)组成谐振腔,谐振腔长约

8 cm。采用如此短的谐振腔可以确保被动调 Q 输出的光脉冲为单纵模,没有拍频现象发生^[12]。使用 0.57λ 波片对保罗棱镜带来的相位延迟进行补偿^[13],利用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体实现被动调 Q。抽运增益介质产生的光经过偏振分光棱镜(PBS)后,部分通过 PBS 并经过 porro2 反射,并在谐振腔内形成振荡,部分以 45° 角反射后输出,得到 1064 nm 的输出光,通过对光楔(wedge)的偏转角的微调实现谐振腔的优化输出。

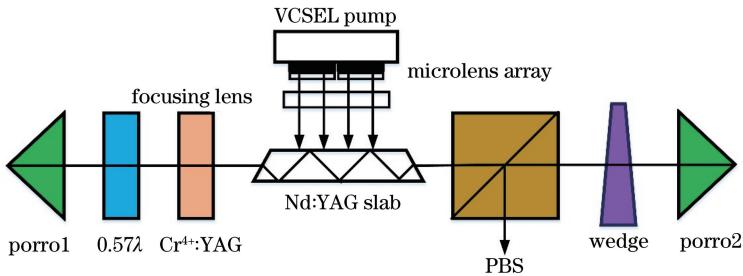


图 3 VCSEL 侧面抽运的全固态激光器装置图

Fig. 3 Set-up diagram of VCSEL side-pumped solid-state laser

3 实验结果

VCSEL 阵列在温度为 13°C ,工作电流为 87 A (峰值光功率 185 W),重复频率为 40 Hz,抽运脉冲宽度为 $230 \mu\text{s}$ 时,激光器输出脉冲能量为 2.1 mJ,不考虑抽运光的吸收效率的情况下对应的总光-光转换效率约为 5%。使用 LD 抽运得到的输出脉冲能量为 2.0 mJ,抽运脉冲能量为 40 mJ,光-光转换效率约为 5%。VCSEL 抽运和 LD 抽运的能量转换效率无明显差异。光束质量如图 4 所示,光束质量因子分别为 $M_x^2=1.78, M_y^2=1.55$,近场光斑图 5 所示。

使用波长计对输出波长进行测试,得到输出波长为 1064.39567 nm,输出线宽小于 500 fm(相当于 132 MHz),相邻单纵模间隔 $\Delta\nu_q = \frac{c}{2nL} \approx 1.36 \text{ GHz}$,比 132 MHz 大,其中 c 为光速, L 为谐振腔长, n 为介质折射率。所以输出光脉冲为单纵模。

采用上升沿响应速率为 60 ps 的 PIN 光电二极管对脉冲进行采集,采集的示波器带宽为 1 GHz,采样率为 20 GHz,获得的脉冲波形如图 6。可以看到脉冲波形为光滑的脉冲,没有拍频现象,对应的激光脉冲的 FWHM 约为 4 ns。

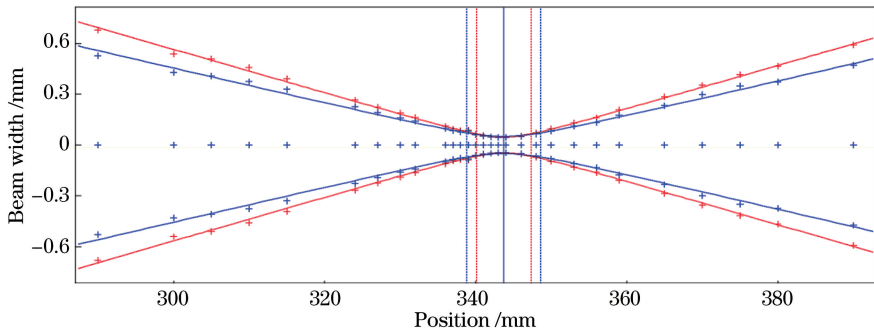


图 4 输出光束质量测量图

Fig. 4 Output beam quality measurement

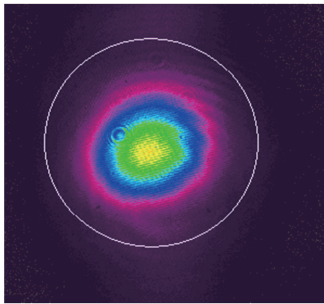


图 5 输出光束近场光斑图

Fig. 5 Output beam near-field facula

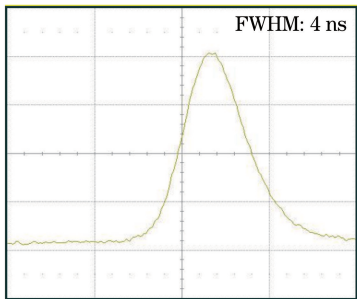
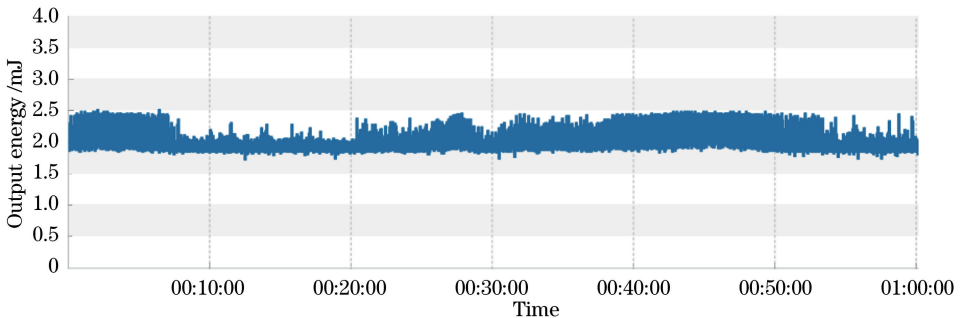


图 6 脉冲波形图

Fig. 6 Pulse wavelength diagram

对不同温度下激光器的阈值抽运能量进行测量,结果如图 7 所示。可以看到,在 9.1 °C 到 16.8 °C 的温度范围内,激光器的阈值抽运能量最低为



min: 1.730 mJ; max: 2.500 mJ; average: 2.004 mJ; standard deviation: 117.8 μ J; over range: 0; total pulses: 144161

图 8 1 h 内 VCSEL 抽运固体激光器输出能量记录

Fig. 8 Output energy recording of solid-state laser pumped by VCSEL in 1 h

42.7 mJ, 最高为 45.4 mJ, 即激光器在 45.4 mJ 的抽运能量下,可以在大于 8 °C 的温度范围内稳定出光,而同样的结构下以边发射激光器为抽运源,工作温度范围仅为 3 °C,可以看到以 VCSEL 为抽运源极大地降低了激光器对抽运源温度的控制要求。

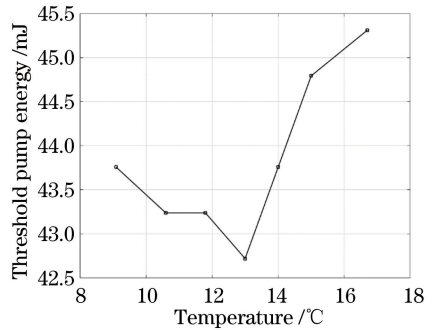


图 7 阈值抽运能量与 VCSEL 热沉温度的变化

Fig. 7 Threshold pump energy versus VCSEL heat sink temperature

同时为了验证能量的稳定性,对 VCSEL 阵列与 LD 阵列抽运的相同结构的激光器的输出能量进行监测,并记录其在 1 h 以内的能量输出,结果如图 8 与图 9 所示。在温度为 20 °C 时,测量 1 h 内 VCSEL 侧面抽运固体激光器的输出能量变化,可以看出脉冲能量抖动标准差为 117.8 μ J,而平均输出

能量为 2.004 mJ,抖动能量标准差约占平均输出能量的 5.9%。在温度为 23.5 °C 时,测量 1 h 内边发射 LD 侧面抽运固体激光器的输出能量变化,可以看出脉冲能量抖动标准差为 151.5 μJ,而平均输出

能量为 1.620 mJ(输出光束经由一块透镜折射,测量时能量有所损耗),抖动能量标准差约占平均输出能量的 9.4%。相比边发射 LD 抽运激光器,VCSEL 抽运固体激光器的能量稳定性更优。

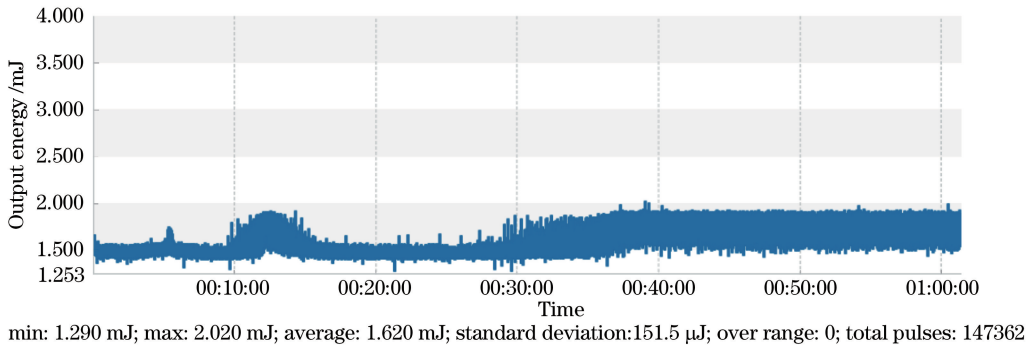


图 9 1 h 内 LD 抽运固体激光器输出能量记录

Fig. 9 Output energy recording of solid-state laser pumped by LD in 1 h

4 结 论

报道了一种结构紧凑、工作温度范围大及可靠性高的 VCSEL 侧面抽运的被动调 Q 全固态激光器。激光器使用了一对正交双保罗棱镜作为谐振腔,利用偏振分束棱镜实现偏振耦合输出。该激光器可以在无 TEC 对抽运源主动温控的条件下在较大温度范围内实现脉冲能量为 2.1 mJ、重复频率为 40 Hz 及脉宽为 4 ns 的稳定输出,输出光束质量因子分别为 $M_x^2 = 1.78, M_y^2 = 1.55$ 。与边发射的 LD 抽运相比,VCSEL 抽运的激光器具有更大的温度适应范围。该激光器同时具有结构紧凑和抗失谐性能高等优点,可作为未来空间激光探测及其他特殊环境下应用的理想光源。

参 考 文 献

[1] Seurin J F, Ghosh C L, Khalfin V, *et al.* High-power high-efficiency 2D VCSEL arrays [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6908: 690808.
 [2] Seurin J F, Xu G Y, Khalfin V, *et al.* Progress in high-power high-efficiency VCSEL arrays [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7229: 722903.
 [3] Goldberg L, McIntosh C, Cole B. VCSEL end-pumped passively Q-switched Nd:YAG laser with adjustable pulse energy [J]. Optics Express, 2011, 19(5): 4261-4267.
 [4] Leeuwen R V, Xiong Y H, Watkins L S, *et al.* High power 808 nm VCSEL arrays for pumping of compact pulsed high energy Nd:YAG lasers operating at 946 nm and 1064 nm for blue and UV light generation [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7912:

79120Z.
 [5] Wang C, Geske J, Garrett H, *et al.* Large-area high-power VCSEL pump arrays optimized for high-energy lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8381: 83811R.
 [6] Xiong Y H, Leeuwen R V, Watkins L S, *et al.* High power VCSEL array pumped Q-switched Nd:YAG lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8235: 82350M.
 [7] Seurin J F, Xu G Y, Miglo A, *et al.* High-power vertical-cavity surface-emitting lasers for solid-state laser pumping [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8276: 827609.
 [8] Wang C, Wei H, Jiang Y, *et al.* VCSEL-pumped Nd:YAG laser with 95 W average power and user-selectable nanosecond pulses [J]. Chinese Optics Letters, 2016(12): 85-88.
 [9] Choquette K D, Hou H Q. Vertical-cavity surface-emitting lasers: moving from research to manufacturing [J]. Proceedings of IEEE, 1997, 85 (11): 1730-1739.
 [10] Tatum J A, Clark A, Guenter J K, *et al.* Commercialization of Honeywell's VCSEL technology [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 3946: 2-13.
 [11] Morgan R A, Hibbs-Brenner M K, Marta T M, *et al.* 200 °C, 96-nm wavelength range, continuous-wave lasing from unbonded GaAs MOVPE-grown vertical cavity surface-emitting lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1995, 7(5): 441-443.
 [12] Yang H L, Meng J Q, Chen W B. Characteristic analysis of a polarization output coupling porro prism resonator [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9255: 92553O.
 [13] Chen S Y, Yang H L, Wang M J, *et al.* Analysis of

natural longitudinal mode selection in passively Q-switched lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0801006.

陈苏园, 杨海龙, 王明建, 等. 被动调 Q 激光器中的纵模自然选择分析[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0801006.

[14] M Tsunekane, T Taira. 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: Optical Society of America, 2013: ATu3A.58.