

# 高温激光二极管抽运全固态激光器

刘 旭 程 勇 万 强 谭朝勇 朱孟真 陈 霞 魏靖松

武汉军械士官学校光电技术研究所, 湖北 武汉 430075

**摘要** 为实现激光二极管抽运全固态激光器(DPSSL)的小型轻量化和高效率,研究了采用高温激光二极管(LD, 808 nm, 55 °C)作为抽运源,降低温控系统制冷压力,减小传导冷却结构体积、重量、功耗的思路和方法。分析了激光二极管抽运全固态激光器中热电制冷器制冷量与激光二极管工作温度的关系,采用高温激光二极管阵列抽运源和角锥棱镜谐振腔设计了可靠性高、小型轻量化的全固态激光器,研制了工程化样机,激光器重复频率为 50 Hz,连续工作时间达 6 min,脉冲能量为 85.7 mJ,脉冲宽度为 10.8 ns,光束发散角为 2.8 mrad,电光效率为 4.3%,体积为 170 mm×62 mm×80 mm,重量为 1.1 kg。研究表明,高温激光二极管抽运的全固态激光器是实现 DPSSL 小型轻量化和高效率的有效途径。

**关键词** 激光器; 高温激光二极管; 二极管抽运激光器; 小型化

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0701003

## High Temperature Laser Diode Pumped All-Solid-State Laser

Liu Xu Cheng Yong Wan Qiang Tan Chaoyong

Zhu Mengzhen Chen Xia Wei Jingsong

*Institute of Opto-Electronics Technology, Wuhan Ordnance Non-Commissioned Officers Academy,  
Wuhan, Hubei 430075, China*

**Abstract** For miniaturization, light weight and high efficiency of the diode pumped all-solid-state laser (DPSSL), a new method is studied with laser diodes (LD) operating at high temperature (808 nm, 55 °C) as the pumping source. The refrigeration press of the temperature control system is reduced, and the bulk, weight and power of the conductive cooling structure are optimized. The relationship between the cooling power of thermoelectric cooler used in DPSSL and the operation temperature of LD is studied. A highly reliable, miniaturized light-weight DPSSL is designed by using the pump source of high temperature LD array and the corner cube prism resonator. An engineering laser prototype is developed with parameters as follows: repetition rate 50 Hz, continuous operation time 6 min, pulse energy 85.7 mJ, pulse width 10.8 ns, divergence angle 2.8 mrad, electro-optic efficiency 4.3%, volume 170 mm×62 mm×80 mm, and weight 1.1 kg. The results show that the high temperature LD pumped all-solid-state laser is an effective way to realize small, light-weight highly effective DPSSL.

**Key words** lasers; high temperature laser diode; diode pumped laser; miniaturization

**OCIS codes** 140.3460; 140.2010; 140.3480

## 1 引 言

激光二极管抽运全固态激光器(DPSSL)以其高效率、高光束质量、高可靠性、可全固化、长寿命等诸多优异性能成为固体激光器领域的研究热点与发展方向<sup>[1-4]</sup>。DPSSL 技术日趋成熟,在激光测距机、激光目标指示器、光电火控、机载吊舱以及空间应用激光器等领域逐步推广应用。但是,DPSSL 自发明至今,体积、重量和功耗等问题没有明显改善,原因是 DPSSL 采用激光二极管(LD)作为抽运源,而 LD 的发射波长线宽通

收稿日期: 2016-01-11; 收到修改稿日期: 2016-03-08

基金项目: 装备预先研究项目(51302010104)

作者简介: 刘 旭(1983-),男,硕士,讲师,主要从事全固态激光器、光参量振荡器等方面的研究。

E-mail: gdyjs@263.net

常为 3 nm 左右,而且 LD 的波长随着工作温度的改变发生漂移,为使抽运光波长与激光介质 Nd:YAG 吸收峰相匹配从而获得较高的吸收效率,需要对 LD 采取精确的闭环温度控制措施<sup>[3-5]</sup>,通常 DPSSL 的温控系统部件会导致激光器体积、重量和功耗的明显增加,限制了 DPSSL 在结构空间和能源供给受限的激光装备中的应用。同时,随着对 DPSSL 激光器脉冲能量、重复频率、光束质量等输出性能的要求不断提高,DPSSL 小型化的问题突显,尤其是机载、弹载和星载等特殊应用平台对 DPSSL 的小型化提出了更加苛刻的要求<sup>[6]</sup>。因此,小型高效的温控部件已成为新型 DPSSL 设计与工程化的关键。

传统 DPSSL 采用常温工作(25 °C 时工作波长约为 808 nm)的 LD 抽运源,激光器在高重复频率和传导冷却条件下工作时,温控系统的主要压力源自 LD 制冷过程。为了有效降低激光器重复频率工作时的热负荷,本文采用高温工作(55 °C 时工作波长约为 808 nm)的 LD 作为 DPSSL 抽运源的新思路,通过提高 LD 的工作温度点,减小激光器温控系统的制冷压力,从而优化传导冷却温控系统的体积、重量和功耗,实现 DPSSL 的小型轻量化。同时,随着半导体激光器技术的发展,高温 LD 器件性能已基本达到同等功率条件下常温 LD 器件的性能指标,寿命实验已达 10<sup>9</sup> 次发射脉冲<sup>[7-8]</sup>,高温 LD 抽运作为新技术替代传统常温器件的时机已经成熟。

本文在理论分析与仿真的基础上,设计了采用新型高温 LD 作为抽运源的 DPSSL,研制了满足工程化应用要求的样机,在传导冷却条件下,实现脉冲能量为 85.7 mJ、重复频率为 50 Hz、脉冲宽度为 10.8 ns、连续工作时间为 6 min、发散角为 2.8 mrad 的指标输出,激光器体积仅为 170 mm×62 mm×80 mm,小型化指标功率体积比达 5 mJ·Hz·cm<sup>-3</sup>,重量为 1.1 kg,适应环境温度为 -40~60 °C,与同样输出性能的传统 DPSSL 相比,温控系统体积减小了 50%,功耗降低了 38%,研究表明,高温 LD 抽运的全固态激光器是实现 DPSSL 小型轻量化和高效率的有效途径。

## 2 理论分析

为分析高温 LD 降低 DPSSL 温控系统制冷压力的能力,建立基于半导体制冷器(TEC)闭环温控和传导冷却条件下的 DPSSL 热传导模型,如图 1 所示。

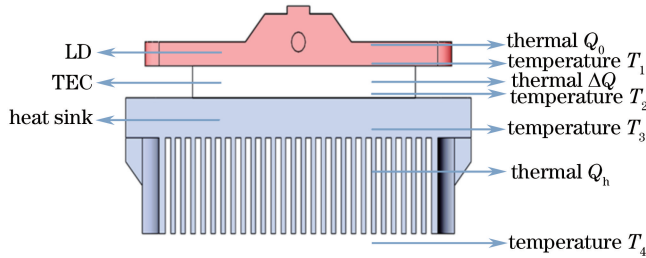


图 1 DPSSL 热传导模型示意图

Fig. 1 Scheme for DPSSL heat conduction model

根据热传导模型建立 TEC 冷面热平衡方程

$$Q_c = Q_0 + Q_{hc} + \frac{\Delta Q}{2}, \tag{1}$$

式中  $Q_c$  为 TEC 的制冷作用从冷面传递到热面的热量,  $Q_0$  为 TEC 的制冷量,即 LD 工作时产生的废热量,  $Q_{hc}$  为冷热面之间温差导致的热面传递到冷面的热量,  $\Delta Q$  为 TEC 工作产生的焦耳热(假设热量各有 1/2 分别传导至 TEC 的冷面和热面)。由热电制冷原理可得  $Q_c = \alpha IT_1$ ,  $Q_{hc} = K(T_2 - T_1)$ ,  $\Delta Q = I^2 R$ , 其中  $K$  为 TEC 的热导,  $T_1$  和  $T_2$  分别为 TEC 的冷端和热端温度,  $\alpha$  为塞贝克系数,  $I$  为 TEC 工作电流,  $R$  为 TEC 的电阻, 因此, (1) 式可以写为

$$Q_0 = (\alpha I + K) T_1 - K T_2 - \frac{I^2 R}{2}. \tag{2}$$

热面的热平衡方程可写为

$$Q_h = Q_c - Q_{hc} + \frac{\Delta Q}{2}, \tag{3}$$

式中  $Q_h$  为半导体制冷器由热面传递到热沉上的热量。由(1)、(3)式得

$$Q_h = Q_0 + \Delta Q, \quad (4)$$

即 TEC 热端所要散发的热量为 LD 作为热负载所要传导散发的热量和 TEC 本身因工作而产生的焦耳热之和。

设  $K_A$  为热面和热沉之间的热导,  $T_3$  为热沉的温度, 则

$$Q_h = Q_0 + \Delta Q = K_A(T_2 - T_3). \quad (5)$$

同时, 热沉需要将此热量传导至周围环境, 设  $K_B$  为热沉和空气的热导,  $T_4$  为环境温度, 则

$$Q_h = Q_0 + \Delta Q = K_B(T_3 - T_4). \quad (6)$$

(5)式与(6)式相加得

$$T_2 = T_4 + \frac{(K_A + K_B)}{K_A K_B} (Q_0 + \Delta Q). \quad (7)$$

令  $\beta = \frac{K_A + K_B}{K_A K_B}$ , 将(7)式代入(2)式得

$$Q_0 = \frac{(\alpha I + K) T_1 - K T_4 - (\beta K + 0.5) I^2 R}{K \beta + 1}. \quad (8)$$

以 12704 型号的 TEC 为例, 参数取值参考文献[9]。TEC 组件共 127 对 PN 节, 每对 PN 节塞贝克系数为  $3.91 \times 10^{-4}$  V/K, 组件  $R = 3.2 \Omega$ ,  $K = 0.331$  W/K,  $\beta = 0.037$ ,  $I = 2.5$  A, 计算得到不同环境温度  $T_4$  条件下, TEC 制冷量  $Q_0$  与 TEC 冷端温度  $T_1$  的关系。

如图 2 所示, 在 25 °C 环境温度条件下, LD 工作温度为常温 25 °C 时, TEC 制冷量为 26.5 W, LD 工作温度为高温 55 °C 时, TEC 制冷量达 40 W; 在 60 °C 环境温度条件下, LD 工作温度为常温 25 °C 时, TEC 制冷量为 15 W, LD 工作温度为高温 55 °C 时, TEC 制冷量达 28.5 W, 即在设定参数条件下, 将 LD 工作温度由 25 °C 提升至 55 °C, TEC 制冷量可提升 13.5 W, 采用高温 LD 作为抽运源可有效提升 DPSSL 的温控制冷能力。

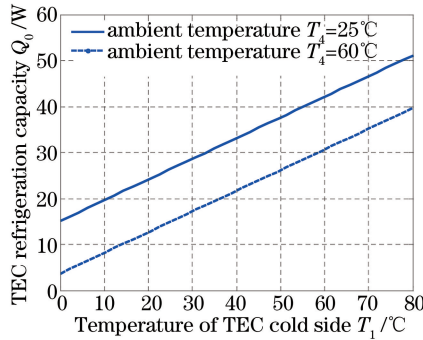


图 2 TEC 制冷量  $Q_0$  与冷端温度  $T_1$  的关系

Fig. 2 Relationship between cooling power and temperature of TEC cold side

### 3 高温 LD 抽运全固态激光器设计

高温 LD 抽运源阵列设计采用波长补偿技术和高特征温度无铝材料外延技术, 外延生长了热沉温度为 55 °C、波长为 808 nm 的无铝化材料, 同时优化了散热结构设计, 通过一体化烧焊成型技术实现了 10 叠层阵列, 热模拟(200  $\mu$ s, 100 Hz)结果如图 3 所示, LD 结构的整体温升小于 15 °C, 该高温 LD 阵列电光效率为 53%, 工作寿命大于  $10^9$  次脉冲[8]。

抽运和传导冷却方式设计采用半圆柱环状侧面侧向抽运和冷却结构, 抽运源为 4 组上述高温 LD 阵列, 55 °C 时中心波长为 808 nm, 激光介质为 Nd:YAG 晶体, 尺寸为  $\Phi 4.5$  mm  $\times$  60 mm, Nd 离子掺杂浓度为 0.8% (原子数分数), 两端镀 1064 nm 增透膜, 侧面打毛。热管理设计采用小型化传导冷却方式, LD 阵列的温控采用闭环 TEC 紧贴铝制散热肋片热沉传导结合强迫风冷方式, Nd:YAG 晶体的热管理采用非抽运半圆柱面紧贴铝制散热肋片的方式, 各接触面之间放置铝箔或高性能导热硅脂以尽可能地减小热阻, 并且为有效减小侧向抽运的非均匀性, 高温 LD 阵列分组沿激光晶体长度方向交替排列, 如图 4 所示, 从整体上获得了相对均匀的

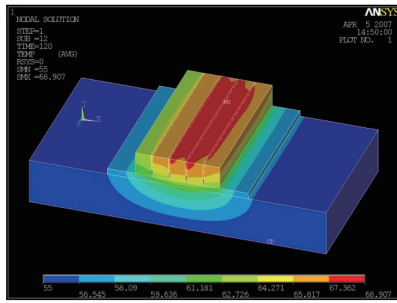


图 3 55 °C 高温 LD 阵列热模拟结果

Fig. 3 Thermal simulation of LD array at 55 °C

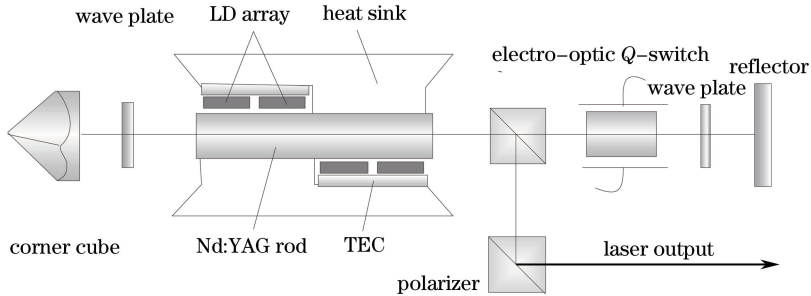


图 4 高温 LD 抽运全固态激光器结构示意图

Fig. 4 Scheme for high temperature LD pumped all-solid-state laser

增益和温度梯度分布<sup>[10]</sup>,这种抽运和传导冷却方式具有效率高、抽运相对均匀、结构简单紧凑等特点。

谐振腔设计是 DPSSL 获得高稳定性、高可靠性和高光束质量的关键。设计采用了抗失调稳定性高的角锥棱镜偏振耦合谐振腔,如图 4 所示,角锥棱镜与平面全反射镜构成封闭稳定的谐振腔,角锥棱镜、1/4 波片和偏振分光镜组合作为谐振腔的偏振耦合输出镜,P 光维持振荡和调 Q,S 光偏振耦合输出,腔长 160 mm。该谐振腔利用角锥棱镜的偏振特性和 1/4 波片结构,结合 LiNbO<sub>3</sub> 电光调 Q 可实现高效率、高稳定性的线偏振光输出,偏振耦合输出透过率达 60%<sup>[11]</sup>。该腔型的优点是利用角锥棱镜的自准直反射特性可极大地提高激光器的机械稳定性和重复频率工作热稳定性;利用角锥棱镜的光线交换反射匀化作用可改善侧向非均匀抽运增益和传导冷却热分布的均匀性<sup>[10-11]</sup>。

## 4 测试结果

研制的工程样机如图 5 所示,依照《固体激光器测试方法》(GJB 5441-2005)测试激光器的输出能量、脉冲宽度、光束质量等指标。

采用激光功率能量计(EPM1000 型)测量激光输出能量,在 LD 抽运脉宽为 240 μs、抽运电流为 70 A 时,激光器以 50 Hz 的重复频率连续工作 6 min,用能量计记录每个脉冲的能量,考察该激光器的能量稳定性,结果如图 6 所示。共计 18000 个脉冲,能量最大值 92.8 mJ,最小值 81.8 mJ,平均值 85.7 mJ,此时,高温

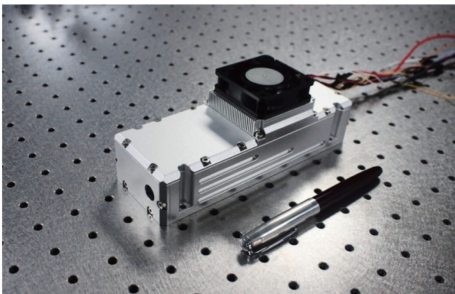


图 5 DPSSL 工程化样机

Fig. 5 Engineering DPSSL prototype

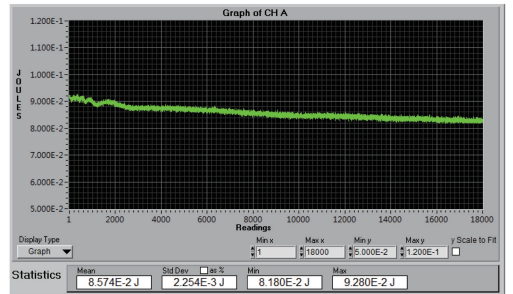


图 6 激光器的能量稳定性

Fig. 6 Energy stability of DPSSL

LD 注入电功率为 67.2 W,TEC 温控电注入为 28 W,风扇功耗为 5 W,激光输出平均功率为 4.3 W,电光效率达 4.3%(包含温控功耗)。同等输出条件下,高温 LD 和常温 LD 抽运的全固态激光器性能对比实验数据如表 1 所示。若抽运源为常温 LD 阵列,则激光器同等性能输出条件下 TEC 温控电注入达 45 W,若要通过 60 °C 高温环境实验,热沉肋片体积要增加 1 倍,结果表明,高温 LD 作为抽运源减小 DPSSL 温控部件体积和功耗的效果明显。

表 1 高温 LD 和常温 LD 作为抽运源的 DPSSL 性能对比

Table 1 Performance comparison between DPSSLs with high temperature LD and normal temperature LD as pumping sources

Pump source	Amount of LD /bar	1.06 $\mu\text{m}$ laser output /mJ	Input power of LD /W	Input power of TEC /W	Input power of fan /W	Volume of heat sink /( $\text{mm}\times\text{mm}\times\text{mm}$ )	Weight of heat sink /kg
808 nm LD at 55 °C	40	85.7	67.2	28	5	62×60×20	0.45
808 nm LD at 25 °C	40	85	65.3	45	5	62×60×40	0.9

采用光电探头(TEK-P6701A 型)和 500M 数字式存储示波器(TDS3052 型)测量激光器脉冲波形及宽度,测量得到脉宽为 10.8 ns,波形光滑稳定,如图 7 所示。采用光束质量分析仪(BeamView 型)监测激光器 85.7 mJ、50 Hz 输出时的脉冲远场光场分布,测量结果如图 8 所示。可以看出激光器远场只有一个主峰,而且边缘光滑,峰顶相对均匀,通过套孔法测得发散角约为 2.8 mrad。

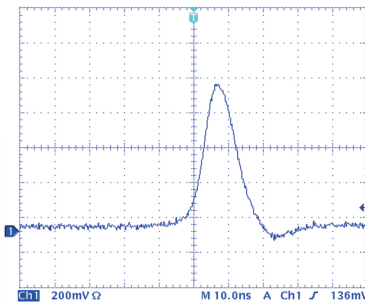


图 7 激光器脉冲波形

Fig. 7 Pulse waveform of DPSSL

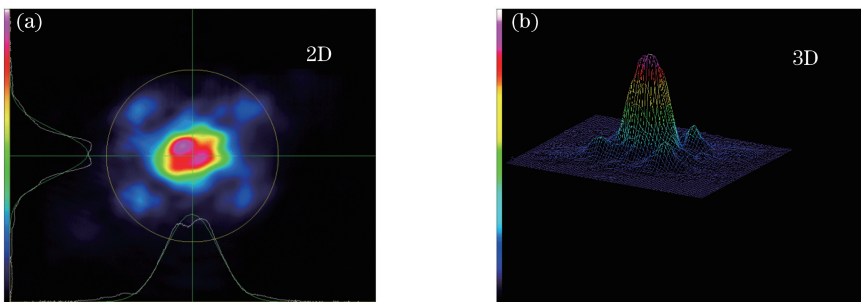


图 8 激光输出脉冲的远场光场分布

Fig. 8 Far-field distribution of output laser pulse

由于激光器采用角锥棱镜腔结构,提高了激光器的稳定性和抗失调能力,同时,在 50 Hz 重复频率工作、传导冷却条件下,角锥棱镜谐振腔结构通过对腔内各种热畸变进行匀化补偿,一定程度上改善了输出激光的光场分布,保证了相对较好的光束质量。

激光器工程样机体积仅为 170 mm×62 mm×80 mm,重量为 1.1 kg,小型化指标功率体积比达 5 mJ·Hz·cm<sup>-3</sup>,环境适应性通过了国军标实验,在 -40~60 °C 范围内稳定工作,是满足激光测距、目标指示、激光雷达等应用的优异工程实用器件。

## 5 结 论

研究了采用高温 LD (808 nm, 55 °C) 作为 DPSSL 抽运源, 降低激光器温控系统制冷压力, 减小传导冷却系统体积、重量和功耗的思路与方法, 理论分析了 DPSSL 的 TEC 制冷量与 LD 工作温度的关系, 设计了高温 LD 阵列抽运源、抽运结构、传导冷却方式、角锥棱镜偏振耦合谐振腔, 研制了性能可靠、小型轻量化的高温 LD 抽运全固态激光器。激光器重复频率为 50 Hz, 连续工作时间超过 6 min, 平均脉冲能量为 85.7 mJ, 脉冲宽度为 10.8 ns, 光束发散角为 2.8 mrad, 可以在 -40~60 °C 范围内稳定工作, 满足车载、机载、舰载等平台激光测距、目标指示等领域的工程化应用, 研究表明, 高温 LD 抽运的全固态激光器是实现 DPSSL 小型轻量化和高效率的有效途径。

## 参 考 文 献

- Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state-laser[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1605-1618.  
周寿桓, 赵 鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1605-1618.
- Li Jinmin. Development, trend and application of high average power diode pumped lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(7): 16-29.  
李晋闽. 高平均功率全固态激光器发展现状、趋势及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(7): 16-29.
- Payne S A, Beach R J, Bibeau C, *et al.*. Diode arrays, crystals, and thermal management for solid-state lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1997, 3(1): 71-81.
- Armandillo E, Norrie C, Cosentino A, *et al.*. Diode-pumped high-efficiency high-brightness Q-switched Nd:YAG slab laser[J]. Optics Letters, 1997, 22(15): 1168-1170.
- Li Mingshan, Zhang Wenping, Wang Shiyu, *et al.*. Optimal thermal dissipation of LD in high power DPL under high temperature environment[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 221-225.  
李明山, 张文平, 王石语, 等. 高温环境下大功率 DPL 的 LD 最佳散热效果[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 221-225.
- Ciofini M, Favilla E, Lapucci A, *et al.*. MILD: A laser altimeter transmitter for a mercury planetary orbiter[J]. Applied Physics B, 2008, 92(3): 431-438.
- Jin Yujian, Wang Pengfei, Li Jiuxi, *et al.*. Hot management research for diode-pumped solid-state-laser[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(3): 187-189.  
金煜坚, 王鹏飞, 李久喜, 等. 二极管泵浦固体激光器的热管理研究[J]. 激光与红外, 2006, 36(3): 187-189.
- Chen Hongtai, Che Xianghui, Xu Huiwu, *et al.*. Study on high-power laser diodes as pumping source at high operating temperature[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(11): 2799-2802.  
陈宏泰, 车相辉, 徐会武, 等. 高工作温度抽运用大功率激光二极管研究[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2799-2802.
- Ren Xin, Zhang Peng. An experimental research on performance of thermoelectric refrigerator under limited cooling intensity[J]. Cryogenics, 2003(4): 58-62.  
任 欣, 张 鹏. 有限散热强度下半导体制冷器性能的实验研究[J]. 低温工程, 2003(4): 58-62.
- Lu Changyong, Li Li, Liu Xu, *et al.*. Laser diode-pumped passively Q-switched laser with corner-cube resonator[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(7): 1228-1231.  
卢常勇, 李 莉, 刘 旭, 等. 角锥棱镜腔激光二极管抽运被动调 Q 激光器[J]. 光学学报, 2007, 27(7): 1228-1231.
- Cheng Yong, Lu Changyong, Liu Xu, *et al.*. Diode pumped electro-optically Q-switched laser with corner-cube resonator[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(11): 2747-2751.  
程 勇, 卢常勇, 刘 旭, 等. LD 抽运角锥棱镜腔光电调 Q 固体激光器[J]. 光子学报, 2009, 38(11): 2747-2751.