

文章编号: 0253-2239(2010)01-0137-05

# 高重复频率窄脉宽 LGS 电光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器

唐 昊<sup>1,2</sup> 朱小磊<sup>1,2</sup> 孟俊清<sup>1,2</sup> 臧华国<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; <sup>2</sup> 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)

**摘要** 报道了一种激光二极管(LD)端面连续抽运的高重复率电光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器。采用新型电光晶体 La<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>SiO<sub>14</sub>(LGS)作为调 Q 元件,并设计高效稳定谐振腔,实现了最高 30 kHz 的高重复率电光调 Q 运转。使用透射率为 50% 的输出镜,在 5 kHz 重复率运转时,获得了单脉冲能量 0.4 mJ,脉宽 6.3 ns 的脉冲序列输出;当重复率达 30 kHz 时,得到的单脉冲能量为 0.2 mJ,脉宽 9.1 ns,最大平均功率 6.2 W,斜率效率为 32.7%,调 Q 动静比达 83%,光束传输因子  $M^2 < 2$ 。实验结果表明,该激光器输出功率并没有出现饱和现象,具有进一步提升的空间。

**关键词** 激光器;LGS 晶体;高重复率;电光调 Q

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103001.0137

## High Repetition Rate Short Pulse Width LGS Electro-Optic Q-Switched Nd:YVO<sub>4</sub> Laser

Tang Hao<sup>1,2</sup> Zhu Xiaolei<sup>1,2</sup> Meng Junqing<sup>1,2</sup> Zang Huaguo<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)  
(<sup>2</sup> Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai 201800, China)

**Abstract** An electro-optic (EO) Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser with high repetition rate of 30 kHz, end-pumped by a continuous-wave (CW) laser diode (LD) is reported. Using La<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>SiO<sub>14</sub> (LGS) single crystal as an EO Q-switch and designing an efficient and stable resonator, the repetition rate of EO Q-switched operation can be changed from 1 Hz to 30 kHz. Using an output coupler with transmittance of 50%, an output pulse train with pulse energy of 0.4 mJ and pulse width of 6.3 ns is obtained at the repetition rate of 5 kHz. An average output power of 6.2 W with the pulse width of 9.1 ns is obtained when the repetition rate reaches 30 kHz, the slope efficiency and dynamic to static ratio are 32.7% and 83%, respectively. The beam transfer factor  $M^2$  is measured to be less than 2. Experimental results show that the output level has great potential for further development.

**Key words** lasers; LGS crystal; high repetition rate; electro-optic Q-switched

## 1 引 言

激光二极管(LD)抽运的固体激光器(DPSSL)以其转换效率高、光束质量好、结构紧凑、使用和维护方便等优点得到了人们的广泛关注。尤其是高重复率窄脉宽固体激光器,在激光雷达、空间通信、激光测距以及激光精细加工等领域<sup>[1~4]</sup>都有着十分重要的应用。目前,高重复率固体激光器大都采用被动 Q 开关或声光 Q 开关作为调 Q 元件<sup>[5,6]</sup>。但这两

种 Q 开关都有各自的不足:被动 Q 开关的工作稳定性差,且单脉冲能量较低;声光 Q 开关的开关速度慢,所得的脉冲脉宽一般在 10~100 ns 量级。而电光 Q 开关可以弥补上述不足,容易获得 10 ns 以下的稳定脉冲输出,但由于受到驱动源和调 Q 晶体本身性能、制备方面的限制,目前报道的工作频率可在 10 kHz 以上的高重复率电光调 Q 激光器还较少,应用也不是很普遍。在高重复率电光 Q 开关的研制

收稿日期: 2009-02-17; 收到修改稿日期: 2009-03-30

作者简介: 唐 昊(1984—),男,硕士研究生,主要从事全固态激光器高复率电光调 Q 技术方面的研究。

E-mail: tanghao\_1984@163.com

导师简介: 朱小磊(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事固体激光技术和激光应用系统等方面的研究。

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

方面,较成熟的产品是英国 LEYSOP 公司生产的可以在 200 kHz 重复频率工作的  $\text{RbTiOPO}_4$  (RTP) 电光 Q 开关,但未见有使用该 Q 开关进行激光器系统研究的报道。而在高重复率电光调 Q 激光器的实验研究方面,2003 年德国夫琅禾费激光技术所的杜可明等<sup>[7]</sup>用  $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$  (BBO) 晶体进行电光调 Q 得到了重复频率 50 kHz,脉宽 9.5 ns 的激光输出。2005 年美国波士頓应用技术公司 Y. K. Zou 等<sup>[8]</sup>利用  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$  (PMN-ZT) 光学陶瓷进行了电光调 Q 的实验研究,调 Q 重复频率可高达 200 kHz,脉宽 13 ns,但未给出脉冲能量和输出功率方面的信息。2008 年山东大学赵佳等<sup>[9]</sup>利用 RTP 晶体获得了重复频率 40 kHz,脉宽 15.5 ns 的电光调 Q 脉冲,但其光-光效率不到 10%。近年来,利用新型电光晶体  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$  (LGS) 进行的电光调 Q 实验研究取得了重大进展<sup>[10~13]</sup>,LGS 晶体不但抗损伤阈值高、透光范围大、物理化学性能稳定,而且插入损耗和压电效应小,特别适合于高重复率运转。2006 年中国科学院上海光学精密机械研究所王春雨等<sup>[14]</sup>利用 LGS 晶体作为电光 Q 开关,获得了最高重复频率 10 kHz 的 1064 nm 激光输出,并指出其巨大的应用潜力。因此,利用 LGS 晶体作为电光调 Q 元件,同时为了压缩脉宽和系统小型

化,在优化设计的超短谐振腔中,利用半导体制冷片 (TEC) 对激光晶体进行传导冷却,获得了最高重复频率 30 kHz、脉宽小于 10 ns 的 1064 nm 激光输出,取得了较好的实验结果。小型化及传导冷却技术的引入,为该激光器在空间的应用奠定了基础。

## 2 实验装置及原理分析

实验采用端面抽运方式,抽运源为带尾纤连续输出的 808 nm LD,其数值孔径 NA 为 0.22,纤芯直径为 400  $\mu\text{m}$ ,在实验条件下,最大输出功率为 24 W。LD 发出的抽运光经过放大率 1:1 的光学耦合系统后聚焦进激光晶体,实测焦点处光斑半径约为 250  $\mu\text{m}$ 。激光晶体使用适合高重复率运转的  $\text{Nd:YVO}_4$ <sup>[15]</sup>。谐振腔设计过程中,使用 LasCAD 软件模拟加入激光晶体后的激光谐振腔,分析引入晶体热效应后谐振腔的稳定性,最后得到一稳定的超短激光谐振腔,图 1、图 2 分别为抽运功率为 25 W 时模拟谐振腔  $\text{TEM}_{00}$  模模式图 and 不同抽运功率下腔稳定性的变化情况。图 2 中,  $G_1 \cdot G_2$  为引入激光晶体热效应后即将激光晶体视为可变焦距的热透镜后的腔稳定性参数,其值由 LasCAD 软件计算得出,此时谐振腔的稳定性条件为  $0 < G_1 \cdot G_2 < 1$ 。

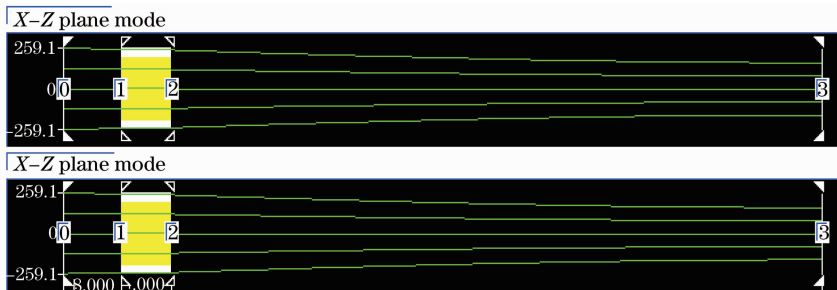


图 1 谐振腔的  $\text{TEM}_{00}$  模模式图

Fig. 1  $\text{TEM}_{00}$  mode of cavity

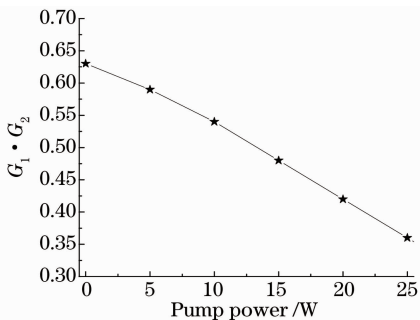


图 2 腔稳定性随抽运功率的变化关系

Fig. 2 Relation between the cavity stability and pump power

图 1 中,标号为 0 和 3 的界面分别表示后腔镜和输出镜,而界面 1 和界面 2 之间的部分为激光晶体。从图 1 中可以看到,谐振腔中  $\text{TEM}_{00}$  模最大腰斑半径为 259.1  $\mu\text{m}$ ,而激光晶体处的腰斑半径约为 256  $\mu\text{m}$ ,与抽运光焦点处的光斑半径接近,这种抽运方式既能充分利用激光晶体处的  $\text{TEM}_{00}$  模模体积又能防止多模振荡,同时从图 2 可知,在抽运功率范围内谐振腔皆具有较好的稳定性。另外,使用的  $\text{Nd:YVO}_4$  晶体掺杂浓度原子分数为 0.3%,较低的掺杂浓度可以大大降低高重复率运转时激光晶体的热效应,因此通过该谐振腔可获得较高的抽运效率

和较好的光束质量。图 3 为不同掺杂浓度时激光晶体内部温度分布的比较,其中部分仿真参数设置为:抽运光选为旋转对称,焦斑大小设为 250  $\mu\text{m}$ ;抽运

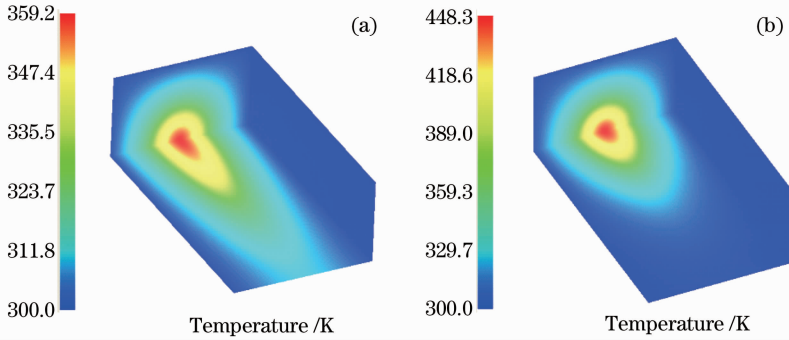


图 3 不同掺杂浓度下晶体的温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of the laser crystal at different doping concentrations

掺杂浓度原子分数为 0.3% 的晶体内部的温度梯度,如图 3(a)所示,明显低于掺杂浓度原子分数为 1% 的晶体,如图 3(b)所示,且晶体热效应相应较小。根据模拟的谐振腔,再插入调 Q 元件得到整个实验装置如图 4 所示。

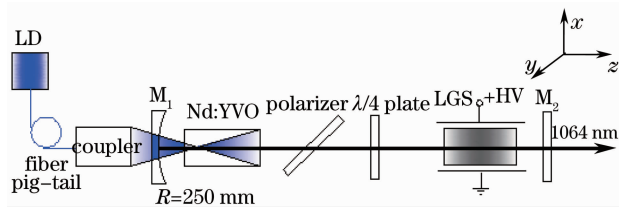


图 4 高重复率电光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器装置图

Fig. 4 Schematic diagram of high repetition rate electro-optic Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser

平-凹谐振腔腔长为 105 mm,从左至右依次放置后腔镜  $M_1$ 、Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体、偏振片、四分之一波片、LGS 晶体和耦合输出镜  $M_2$ 。 $M_1$  凹面的曲率半径  $R$  为 250 mm,镀有 808 nm 增透膜和 1064 nm 全反膜,耦合输出镜  $M_2$  为镀有 1064 nm 一定透射率膜的平面镜。Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体为  $a$  轴切割,尺寸为 4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 7 mm。4 mm $\times$ 4 mm 的两个面作为通光面,镀有 808 nm 和 1064 nm 增透膜,为了使结构更加紧凑,将 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的非通光面安装在 TEC 制冷的铜制热沉中,完全舍弃水循环冷却系统,便于应用。电光调 Q 晶体 LGS 由山东大学提供,尺寸为 4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 40 mm,晶体采用  $z$  向通光, $x$  方向加电压,如图 4 所示,LGS 晶体 10:1 的纵横比值,大大降低了调 Q 所需的电压值, $V_{\lambda/4}$  理论值仅为 1760 V,更有利于高重复频率驱动。

实验采用脉冲加压机电光调 Q 方式,偏振片、四分之一波片和 LGS 晶体共同构成 Q 开关。LGS 晶体上

功率设为 25 W;边界冷却条件设为传导冷却,表面温度设为 300 K;不同掺杂浓度下的吸收系数依据吸收系数与掺杂浓度成正比的关系设置。

未加电压时,Q 开关处于关闭状态;在 LGS 晶体上加四分之一波电压后,腔内光束往返一次后偏振方向转过 90°,Q 开关打开,释放出巨脉冲,此种调 Q 方式的消光比较高,接近 100:1<sup>[12]</sup>。高频高压驱动源是实现高重复率电光调 Q 的关键部件,利用特殊的高频开关组件,自行研制驱动和控制电路,制成了高重复率电光调 Q 驱动源,输出重复频率在 0~30 kHz 范围内连续可调,高压输出最高可达 4 kV。

### 3 实验结果

首先考察低重复率运转时激光器的输出特性,在重复频率为 5 kHz 的条件下,当使用透射率  $T=50\%$  的耦合输出镜时,实验获得最佳耦合输出,最大单脉冲能量为 0.4 mJ,相应脉宽为 6.3 ns,脉冲波形如图 5 所示。

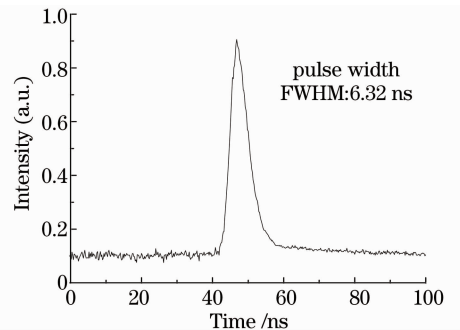


图 5 5 kHz 时的调 Q 脉冲波形

Fig. 5 Q-switched pulse profile at 5 kHz

随后,使用透射率  $T=50\%$  的耦合输出镜,改变电光 Q 开关重复频率,考察输出功率随重复频率的变化情况。在 5~30 kHz 频率范围内,均获得了稳定的调 Q 输出,实验测得的激光器输出功率变化结果如图 6 所示。

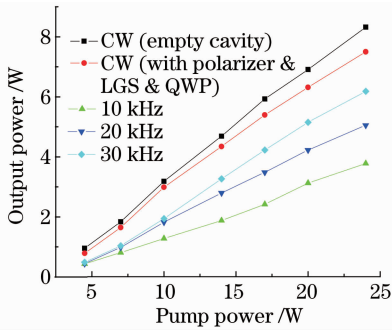


图 6 不同重复频率下的输出功率曲线

Fig. 6 Output power versus pump power at different repetition rate

由图 6 结果可以看出,当谐振腔内插入偏振片、LGS 晶体和四分之一波片等调 Q 开关组件后,由于存在一定的插入损耗,使得静态连续波输出的斜率效率从 38.18%降低为 34.78%,但插入损耗的影响并不严重。而 Q 脉冲输出功率曲线则表明,调 Q 输出功率随着重复频率的增加而增加,并没有出现饱和和迹象。受高压驱动源功率所限,未能进行高于 30 kHz 重复频率的实验。在重复频率为 30 kHz,抽运功率为 24 W 时,获得最大平均功率输出 6.2 W,按激光晶体实际吸收 22 W 抽运光功率计算,最大光-光转换效率约为 28%,斜率效率为 32.7%,调 Q 动静比约为 83%,相应单脉冲能量和脉宽随抽运功率的变化关系如图 7 所示。

分析图 7 的实验结果可以发现,在 30 kHz 重复频率条件下,激光单脉冲能量随着抽运功率的增加而增加,而脉宽随着抽运功率的增加而减小,当抽运功率为 24 W 时,获得最大单脉冲能量 0.2 mJ,最窄脉宽 9.1 ns,相应峰值功率高达 22 kW。实验中用示波器监测 30 kHz 重复频率下的调 Q 脉冲序列,

发现调 Q 脉冲序列具有较好的稳定性,如图 8 所示。

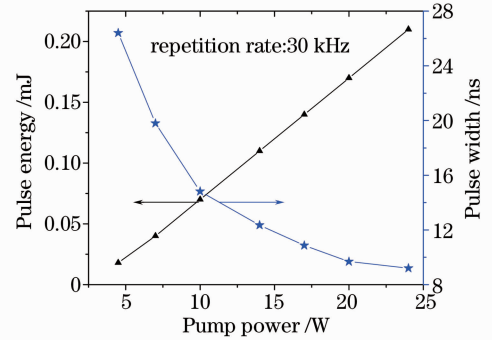


图 7 30 kHz 时单脉冲能量和脉宽随抽运功率的变化曲线

Fig. 7 Single-pulse energy and pulse width versus pump power at 30 kHz

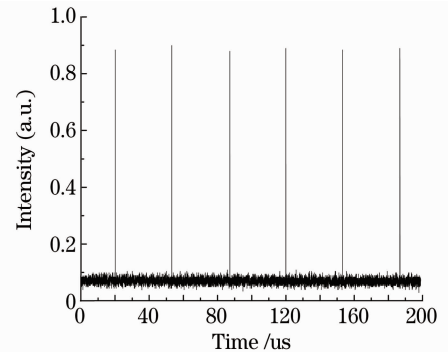


图 8 30 kHz 时的调 Q 输出脉冲序列

Fig. 8 Q-switched pulse series at 30 kHz

用 Spiricon 公司生产的 M<sup>2</sup>-200 型光束传输分析仪测量了重复频率为 30 kHz 时调 Q 输出光的光束质量,图 9(a)为抽运功率 10 W,输出功率约 2 W 时的测量结果,此时,  $M_x^2 = 1.50$ ,  $M_y^2 = 1.39$ ,图 9(b)为激光能量远场空间分布。在抽运功率范围内,  $M^2$  因子皆小于 2,说明获得了高光束质量的窄脉冲激光。

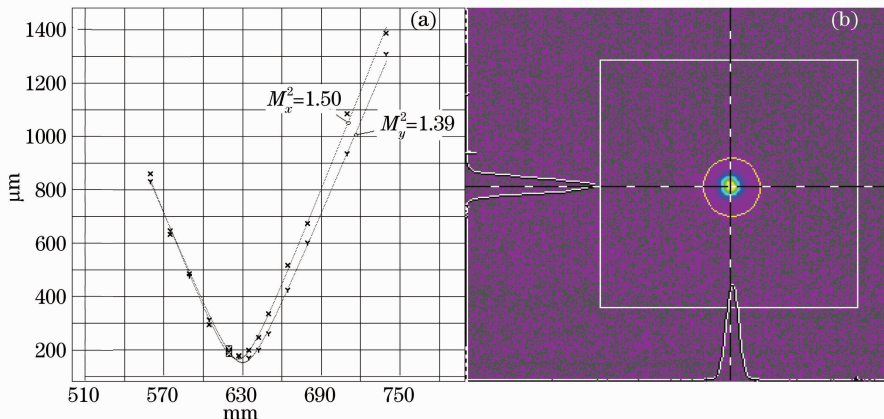


图 9 输出功率 2 W 时的光束质量测量

Fig. 9 The beam quality measurement of the Q-switched laser at 2W output

## 4 结 论

利用新型电光晶体 LGS 作为调 Q 元件, 通过优化设计高效稳定谐振腔, 实现了激光器高重复率电光调 Q 运转, 获得了最高重复频率 30 kHz 的窄脉宽激光输出, 最大平均功率达 6.2 W, 斜率效率为 32.7%, 且光束质量良好, 在抽运功率范围内, 光束传输因子  $M^2 < 2$ 。实验结果表明, 激光功率输出水平还有很大的提升空间, 通过改进调 Q 驱动源就可以获得平均功率更大、重复频率更高的激光输出。

## 参 考 文 献

- Zhou Tianhua, He ning. The laser remote sensing of underwater acoustic signal[C]. ISAPE '06. 7th International Symposium on, 2006, **7**: 1~4
- Liu Liren. Laser communications in space I optical link and terminal technology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 3~19  
刘立人. 卫星激光通信 I 链路和终端技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 3~19
- Pan Qiujuan, Fang Qinghai, Yang Yan. Key technique and its progress in satellite laser ranging at high repetition rate[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(7): 33~39  
潘秋娟, 房庆海, 杨 艳. 高重复率卫星激光测距的关键技术及其进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(7): 33~39
- H. Y. Zheng, H. Huang. Ultrasonic vibration-assisted femtosecond laser machining of microholes[J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2007, **17**(8): 58~61
- John J. Zayhowski, Alexander (Sandy) L. Wilson. Pump-induced bleaching of the saturable absorber in short-pulse Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG passively Q-switched microchip lasers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2003, **39**(12): 1588~1593
- Yao Baoquan, Duan Xiaoming, Zheng Liangliang *et al.*. Continuous-wave and Q-switched operation of a resonantly pumped Ho:YAlO<sub>3</sub> laser[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(9): 14668~14674
- Du Keming, Zhang Hengli, Shi Peng *et al.*. Electro-optically Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser with a high repetition rate and a short pulse width[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(2): 87~89
- Zou Yingyin Kevin, Chen Qiushui, Zhang Run *et al.*. Low voltage, high repetition rate electro-optic Q-switch[C]. Proc. CLEO' 2005, **2005**: 1094~1096
- Zhao Jia, Dong Lei, Zhou Zhuang *et al.*. High-repetition-rate RTP electro-optic Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(4): 647~650  
赵 佳, 董 磊, 卓 壮 等. 高重复率 RTP 电光调 Q Nd:YAG 激光特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(4): 647~650
- Yin Xin, Wang Jiyang, Zhang Huajin *et al.*. Electrooptic properties and electrooptic Q-switch of La<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>SiO<sub>14</sub> single crystal[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2002, **41**(12): 7419~7421
- H. Kong, J. Wang, H. Zhang *et al.*. Growth, properties and application as an electrooptic Q-switch of langasite crystal[J]. *J. Crystal Growth*, 2003, **254**: 360~367
- Yin Xin, Wang Jiyang, Zhang Shaojun. Study on electro-optic Q-switch of La<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>SiO<sub>14</sub> single crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 29~32  
尹 鑫, 王继扬, 张少军. La<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>SiO<sub>14</sub> 晶体电光 Q 开关的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 29~32
- Tian Zhaobing, Zhang Shaojun. Electro-optic Q-switch of an La<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>SiO<sub>14</sub> crystal [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(10): 2325~2330
- Wang Chunyu, Zang Huaguo, Li Xiaoli *et al.*. LD-pumped high repetition rate Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser by using La<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>SiO<sub>14</sub> single crystal electro-optic modulator[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(6): 329~331
- Li Xiaoli, Shao Jie, Zang Huaguo *et al.*. High repetition rate short pulse width Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 206~210  
李小莉, 邵 杰, 臧华国 等. 高重复率窄脉宽 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 206~210