

文章编号: 0258-7025(2010)03-0617-05

磷酸钛氧铷高重复率电光调 Q 特性

冯宇彤 朱小磊* 唐昊 孟俊清 臧华国 陈卫标

(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 采用连续激光二极管端面抽运的全固态激光器结构, 实验研究了新型电光晶体磷酸钛氧铷(RTP)作为 Q 开关时的电光调 Q 特性。在重复频率 30 kHz, 抽运功率 24 W 时, 得到了最大平均输出功率 6.7 W, 相应脉冲宽度 7.8 ns, 峰值功率 28.6 kW 的稳定脉冲序列输出, 脉冲能量不稳定性小于 5%, 斜率效率为 34.9%。与同样条件下硅酸镓镧(LGS)电光 Q 开关的特性进行了比较, 发现 RTP 电光 Q 开关输出指标优于 LGS 电光 Q 开关, 并且 RTP 电光晶体的驱动电压明显低于 LGS 电光晶体, 降低了系统功耗, 具备作为三维扫描成像激光雷达发射光源的潜力。

关键词 激光器; 磷酸钛氧铷晶体; 高重复率; 电光调 Q

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20103703.0617

Characteristics of RbTiOPO₄ Electro-Optic Q-Switch Operation at High Repetition Rate

Feng Yutong Zhu Xiaolei Tang Hao Meng Junqing Zang Huaguo Chen Weibiao

(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 The characteristics of RbTiOPO₄ (RTP) electro-optic (EO) Q-switch are experimentally studied in an all-solid-state laser which is end-pumped by a continuous-wave laser diode. Stable pulse train is generated at repetition rate of 30 kHz with pump power of 24 W. The maximum average output power is 6.7 W, and the pulse width is 7.8 ns with corresponding peak power of 28.6 kW. The pulse energy fluctuation is less than 5%, and the slope efficiency is 34.9%. It is found that the laser performance is better when using the RTP EO Q-switch in cavity than using La₃Ga₅SiO₁₄ (LGS) Q-switch. Furthermore, the driving voltage of RTP Q-switch is significantly lower than that of LGS. This high repetition rate, end-pumped all-solid-state laser with an RTP based EO Q-switch can be considered as a candidate for the three-dimensional (3D) imaging lidar transmitter.

Key words lasers; RbTiOPO₄ crystal; high repetition rate; electro-optic Q-switch

1 引 言

近年来, 激光二极管抽运的全固态激光器(DPSSL)得到了极大的发展, 结合调 Q 技术, DPSSL 可以得到高重复率、高峰值功率的激光输出, 广泛应用在激光雷达、精细加工以及目标指示等场合^[1~3]。传统的调 Q 方式有利用可饱和吸收体的被动调 Q 技术, 及利用电光(EO)Q 开关或声光 Q 开关的主动调 Q 技术。被动调 Q 技术的主要问题是难以实现精确的同步控制, 且输出的脉冲能量相

对较低。声光调 Q 技术开关由于速度慢, 输出的脉冲宽度值典型地在几十纳秒到几百纳秒范围, 限制了其应用范围。电光调 Q 技术则克服了上述困难, 能够实现重复频率几十千赫兹、脉冲宽度小于 10 ns 的脉冲输出^[4]。如何有效降低电光开关的工作电压, 是提升重复频率、拓展其应用的核心问题。可用于电光调 Q 的光学材料主要有铌酸锂(LN)、磷酸钛氧钾(KTP)、磷酸二氢钾(KD*P)、偏硼酸钡(BBO)、硅酸镓镧(LGS)和磷酸钛氧铷(RTP)等电

收稿日期: 2009-04-21; 收到修改稿日期: 2009-06-02

作者简介: 冯宇彤(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事微型全固态激光器方面的研究。E-mail: ytfeng@mail.siom.ac.cn

导师简介: 陈卫标(1969—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光遥感技术方面的研究。

E-mail: wbchen@mail.shenc.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: xlzhu@mail.siom.ac.cn

光晶体以及 PMN-ZT 光学陶瓷等,但大多数电光晶体由于工作电压较高,限制了驱动源重复频率的提高,因而很难满足三维扫描激光雷达对工作重复频率的要求。近年来,国内外对高重复频率电光调 Q 激光器的实验研究已有一些报道^[5~11],根据不同的电光调 Q 工作机制,输出的光学指标也各有优势,利用标准具透射谱电致调谐原理^[5]和电致偏转原理^[6]电光调 Q 激光器可以实现兆赫兹级重复频率的脉冲输出,但输出脉冲的能量都非常低。而利用普克尔效应电光调 Q 激光器可以得到较高的脉冲输出能量,其中重复频率最高的当属 2004 年文献报道的利用 PMN-ZT 光学陶瓷实现低电压的电光调 Q 实验^[8],工作频率高达 200 kHz,脉冲宽度 13 ns,但是文中未给出脉冲能量、光束质量等脉冲特性信息,目前关于光学陶瓷的理论分析和技术准备都不够成熟。2008 年,以色列 Raicol Crystals Ltd. 公司展示了可工作在 1.2 MHz 重复频率下的 RTP 电光 Q 开关,但未见有用于激光器实验研究的文献报道^[9]。国内山东大学利用 RTP 晶体电光调 Q 氙灯抽运的激光器,得到重复频率 40 kHz,脉冲宽度 15.5 ns 的输出^[10]。2005 年,中国科学院上海光学精密机械研究所的王春雨等^[11]利用 LGS 晶体,得到了重复频率 10 kHz,脉冲宽度 8.2 ns 的输出。

针对三维扫描成像激光雷达发射光源的应用需求,实验小组重点开展高重复率电光调 Q 全固态激光技术研究,在前阶段研究工作基础上,利用 LGS 电光晶体进一步提升重复频率,实现了重复频率 30 kHz,脉冲宽度 9.2 ns 的输出^[10],但是 LGS 晶体工作电压较高,驱动电源功耗过大,当纵横比为 1 时其静态半波电压理论值为 35.4 kV。而 RTP 晶体工作电压低是其一大特点,纵横比为 1 时的静态半波电压理论值仅为 8 kV,本文主要研究了高重复率下 RTP 电光晶体的调 Q 特性,在重复频率 30 kHz 时,得到了脉冲宽度 7.8 ns,平均功率 6.7 W 的激光输出。

2 实验装置及原理分析

2.1 RTP 电光晶体 Q 开关

RTP 晶体是 KTP 的同族晶体,不仅具有高的损伤阈值和高的消光比(>20 dB),插入损耗很小(<1%),并且水溶性小,几乎不潮解,用作调 Q 元件时不需密封,此外 RTP 晶体有两个特别适合于高重复率工作的特性,第一是电光系数很大,通过调整加工尺寸可以实现较低的工作电压,其半波电压一般在 1~1.5 kV,较低的工作电压降低了系统功耗,

减轻了对驱动的要求,同时也减少了系统噪声;第二是在高重复率工作时,晶体的压电效应很小^[12],但直到 2000 年才由 E. Lebiush 等^[13]首次成功将 RTP 晶体应用于电光调 Q 实验。RTP 晶体属于双轴晶体,实际中需要使用两块完全一样的晶体以补偿自然双折射,如图 1 所示。以 x 轴正向为通光方向,外加电场沿 z 轴方向,两块 RTP 晶体加电压方向互相垂直正交,入射的线偏振光与 z 轴成 45° 正入射。

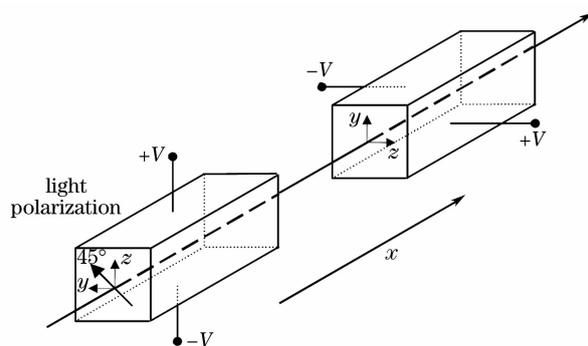


图 1 双 RTP 电光 Q 开关示意图

Fig. 1 EO Q-switch by double RTP crystal

根据文献[4],双 RTP 电光晶体正交运用时的静态半波电压为 $V_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{n_z^3 \gamma_{e2}} \frac{d}{2L}$,式中 λ 为激光波长, n_z 为 z 轴折射率, γ_{e2} 为通光方向的有效电光系数, d 为加电场方向晶体厚度, L 为单块 RTP 晶体通光方向长度。将各参数值代入得到所用 RTP 晶体的静态半波电压为 $V_{\lambda/2} = 2.225$ kV,实验中采用加压式电光调 Q,故所需静态 $\lambda/4$ 波电压为 $V_{\lambda/4} = 1.113$ kV。

2.2 实验装置

实验采用光纤耦合输出激光二极管(LD)连续端面抽运的平-凹腔结构,利用 LAS-CAD 商业软件对不同掺杂浓度、不同聚焦深度下,端面抽运激光晶体的热效应进行了数值模拟,并利用该软件对谐振腔进行了优化设计。最终选择的平-凹谐振腔参数为:谐振腔长度为 105 mm,作为后腔镜的平凹镜曲率半径为 $R=250$ mm,激光晶体为掺杂原子数分数 0.3% 的 Nd:YVO₄ 晶体,抽运光聚焦深度为 3.5 mm,谐振腔最佳动态耦合输出率 T 约为 50%。根据模拟结果,抽运功率从 5 W 增大到 25 W 时,谐振腔振荡模式在晶体内抽运光聚焦光斑处的光斑半径从 249 μm 增大至 274 μm ,与抽运光聚焦光斑大小接近,这种腔型结构既可以充分利用抽运光能量,提高转换效率,又可以同时保证只有 TEM₀₀ 模振荡。在最大抽运功率为 25 W,晶体热透镜焦距值为 450 mm 时,谐振腔的稳定性参数模拟预测值为

0.39。

实验装置如图 2 所示。其中 LD 为光纤耦合输出的半导体激光器，中心波长为 808 nm，采用热电致冷器 (TEC) 冷却，输出光纤的纤芯直径为 400 μm ，数值孔径 (NA) 为 0.22；耦合透镜组耦合效率 η 为 90%，抽运光经过耦合透镜组后在晶体中聚焦光斑直径实测值约为 500 μm ；实验中经过耦合系统后可用的最大抽运功率为 24 W；后腔镜 M_1 为平面镜，平面对抽运波长 808 nm 镀增透膜，曲率面对抽运波长镀增透膜，对激光波长 1064 nm 镀高反膜；所用的 Nd:YVO₄ 晶体为 *a* 轴切割，尺寸为 4 mm ×

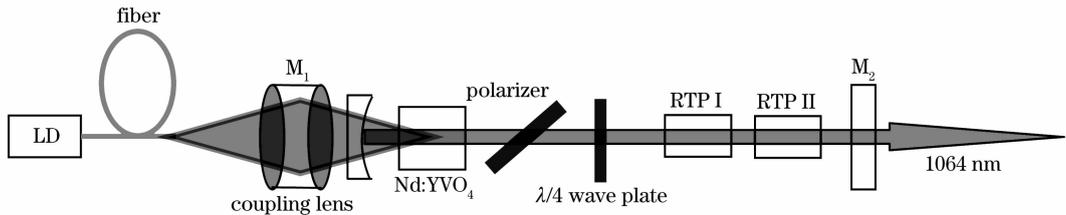


图 2 KTP 晶体电光调 Q 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of RTP EO Q-switched laser

实验采用加压式电光调 Q 方式，偏振片， $\lambda/4$ 波片和两块加电场方向正交的 RTP 晶体共同构成 Q 开关。RTP 晶体上未加电压时，经过起偏器的线偏振光往返两次经过 $\lambda/4$ 波片后偏振方向转过 90° ，不能通过起偏器形成振荡，Q 开关处于关闭状态，在 RTP 晶体上加 $\lambda/4$ 波片电压后，两块 RTP 晶体相互补偿了自然双折射，线偏振光两次经过 $\lambda/4$ 波片和电光晶体后偏振方向转过 180° ，通过起偏器后形成振荡，Q 开关处于打开状态，实现调 Q 脉冲输出。对加压式电光调 Q 来说，Q 开关打开时的延迟时间，也就是高压电脉冲前沿的上升时间越短，调 Q 效果越理想，上升时间过长会导致 Q 开关速度变慢，输出脉冲能量降低，脉冲宽度增加。实验中所用驱动电路输出高压脉冲上升时间可以小于 10 ns，脉冲持续时间可以小于 10 μs 。

3 实验结果及分析

图 3 显示了在不同重复频率下激光平均输出功率随抽运功率的变化曲线。图中的 CW 曲线表示腔内包括起偏器， $\lambda/4$ 波片时的连续输出功率，CW (with RTP) 曲线表示腔内插入两块 RTP 晶体时的连续输出功率，可见在连续输出情况下，静态插入两块 RTP 晶体对输出功率几乎不带来损耗。从图 3 可以看出，在抽运功率范围内，不同重复频率下的平均输出功率曲线均保持了较好的线性，在高功率抽

4 mm × 7 mm，其中 7 mm 为通光方向长度，两个通光面都对抽运波长和激光波长镀增透膜，并在 4 个侧面包铝箔置于传导冷却的黄铜热沉上，在热沉与安装底板间贴有 TEC 用于晶体的控温；输出镜 M_2 为平面镜，对激光波长镀透射率为 50% 的介质膜；所用的两块 RTP 电光晶体尺寸均为 5 mm × 5 mm × 8 mm，其静态 $\lambda/4$ 波电压仅为 1.113 kV。所有光学夹具和调整装置都固定在经过热处理的安装底板上，作为 TEC 温控的散热底板，热处理以释放机械件内部应力，避免实验过程中底板形变对谐振腔的影响。

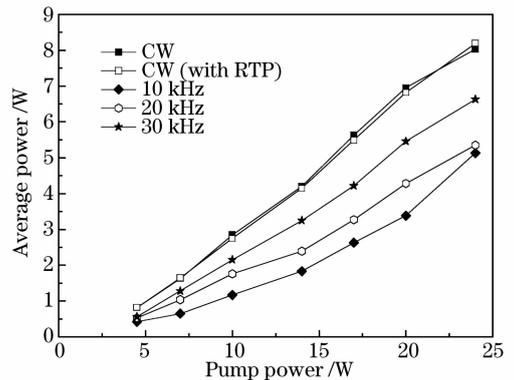


图 3 不同重复频率下平均功率随抽运功率的变化曲线

Fig. 3 Average power versus pump power at different repetition rates

运时，也没有出现饱和的趋势，随着重复频率的提高，平均输出功率增大，同时斜率效率也有所提高。在重复频率 30 kHz，抽运功率 24 W 时，得到最大平均输出功率 6.7 W，所用 Nd:YVO₄ 晶体对抽运光的吸收为 22 W，对应光-光效率为 30.4%，斜率效率为 34.9%。

对于三维扫描成像激光雷达发射光源，输出激光的脉冲宽度和峰值功率是主要的技术指标，图 4 给出了重复频率 30 kHz 时，脉冲宽度及相应峰值功率随抽运功率的变化曲线。随着抽运功率的增大，脉冲宽度随之减小，峰值功率迅速增大，在最大抽运功率 24 W 时，得到脉冲宽度 7.8 ns，相应峰值功率 28.6 kW 的脉冲输出，相应的时序波形如图 5 所示。

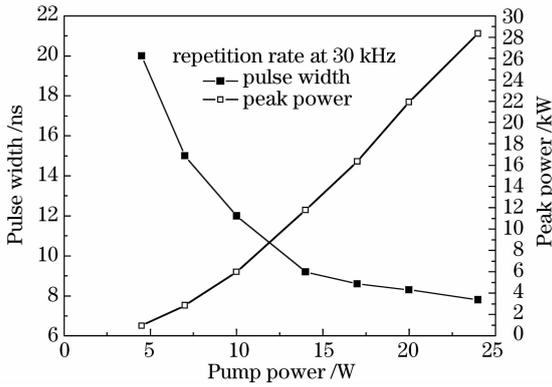


图 4 重复频率 30 kHz 时脉冲宽度及相应峰值功率随抽运功率的变化曲线

Fig. 4 Pulse width and peak power versus pump power at repetition rate of 30 kHz

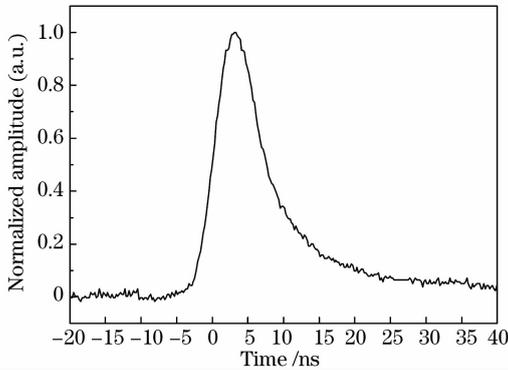


图 5 重复频率 30 kHz 时输出脉冲时序的波形图

Fig. 5 Pulse shape at repetition rate of 30 kHz

实验过程中对输出脉冲能量的稳定性通过数字示波器进行了监测,发现调 Q 脉冲序列具有较好的稳定性,示波器内置统计功能测量,能量不稳定度小于 5%。在重复频率 30 kHz,平均输出功率约 2 W 时,对输出光束的光束质量进行了测量,结果如图 6 所示,图 6(a)为测量结果曲线, $M_x^2 = 1.7$, $M_y^2 = 1.5$,图 6(b)为输出激光能量的远场分布。

实验中输出激光的平均功率由 Coherent PowerMax PM10 功率计测量,脉冲波形通过 LeCroy WaveRunner 62Xi 数字示波器监测,光束质量 M^2 因子由 SPIRICON M^2 -200 光束分析仪测量。

将获得的实验结果与在同一结构中用 LGS 电光晶体作为 Q 开关时获得的结果^[14]进行比较,发现在连续运转的情况下,LGS 晶体的插入损耗相对较大,在所有测量点中最小也有 5% 的损耗,输出功率变化曲线如图 7 所示。而 RTP 晶体几乎没有引入的插入损耗。这个实验结果,与相关文献报道的 LGS 晶体会引入 2% 左右的插入损耗^[15],而 RTP 晶体的插入损耗要小于 1% 的结论是相符的。

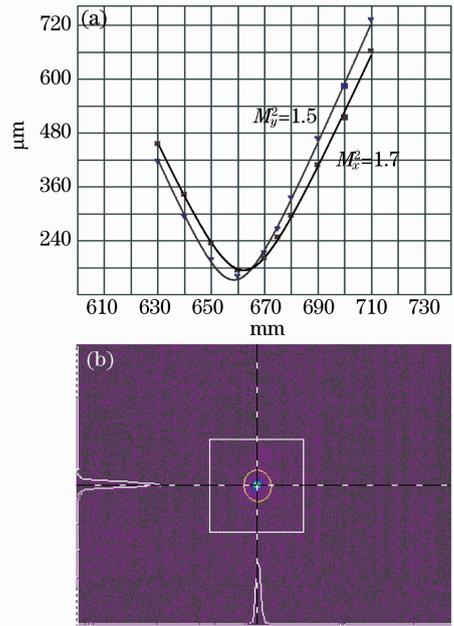


图 6 平均功率 2 W 时的光束质量因子

Fig. 6 Beam quality at output power of 2 W

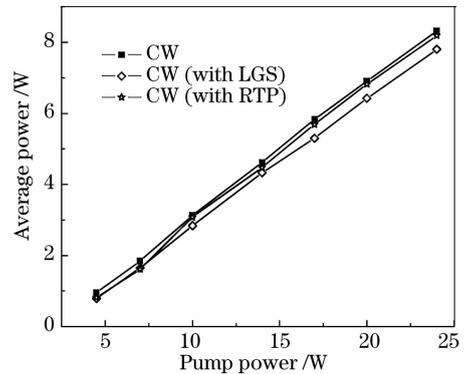


图 7 RTP 晶体和 LGS 晶体插入损耗的比较

Fig. 7 Comparison of RTP and LGS insertion loss

在重复频率 30 kHz 时,分别使用 LGS 和 RTP 电光开关得到的输出脉冲宽度及相应峰值功率随抽运功率的变化而变化的规律基本一致,只是在同样抽运功率条件下,使用 RTP 电光开关得到的脉冲宽度更窄,峰值功率更高。实验结果表明,使用 RTP 电光开关激光输出的斜率效率为 34.9%,略高于 LGS 电光开关的 32.7%。在抽运功率 24 W 时,RTP 电光开关可以得到脉冲宽度 7.8 ns,峰值功率 28.6 kW 的脉冲输出,优于 LGS 电光开关输出的脉冲宽度 9.2 ns,峰值功率 22 kW。

4 结 论

在 LD 端面抽运全固态激光器结构下,研究了 RTP 电光 Q 开关的调 Q 特性,重复频率 30 kHz,抽

运功率 24 W 时,得到了平均功率 6.7 W,脉冲宽度 7.8 ns,相应峰值功率 28.6 kW 的脉冲输出,斜率效率为 34.9%。与 LGS 电光 Q 开关相比,RTP 电光 Q 开关的输出指标优于 LGS 电光 Q 开关输出,同时驱动电压显著降低,减少了系统功耗,可以作为三维扫描成像激光雷达发射光源的技术路线。

参 考 文 献

- Chen Weibiao, Nobuo Takeuchi. Diode pumped, Cr^{4+} :YAG passively Q-switched Nd:YAG Laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(5):385~388
陈卫标, Nobuo Takeuchi. LD 抽运的 Cr^{4+} :YAG 被动调 Q Nd:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(5):385~388
- Ma Huijun, Li Xiaoli, Zhu Xiaolei *et al.*. Investigation on the characteristic of kHz all-solid-state laser for airborne lidar ocean survey [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9):1197~1201
马惠军, 李小莉, 朱小磊 等. 机载测深激光雷达千赫兹全固态激光器设计及特性研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9):1197~1201
- Chen Weibiao, Zhou Jun, Zhu Xiaolei *et al.*. Doppler lidar and it's all solid-state single frequency laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(1):57~60
陈卫标, 周 军, 朱小磊 等. 多普勒激光雷达及其单纵模全固态激光器[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(1):57~60
- W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. 438~442
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京:科学出版社, 2002. 438~442
- J. J. Zayhowski, C. Dill. Coupled-cavity electro-optically Q-switched Nd:YVO₄ microchip lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7):716~718
- Ryusuke Horiuchi, Koji Adachi, Goro Watanabe *et al.*. 1.4-MHz repetition rate electro-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(21):16729~16734
- Keming Du, Hengli Zhang, Peng Shi *et al.*. Electro-optically Q-switched Nd:YVO₄ slab laser with a high repetition rate and a short pulse width [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(2):87~89
- Yingyin Kevin Zou, Qiushui Chen, Run Zhang *et al.*. High repetition rate electro-optic Q-switch [C]. *Proc. CLEO '2005*, 2005. 1094~1096
- http://spie.org/app/program/index.cfm?fuseaction=exhibitor&exhibitorid=15817&meeting_id=148&jsenabled=1
- 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
- Chunyu Wang, Huaguo Zang, Xiaoli Li *et al.*. LD-pumped high repetition rate Q-switched Nd:YVO₄ laser by using La₃Ga₅SiO₁₄ single crystal electro-optic modulator [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(6):329~331
http://www.gkoe.com/products_cn/RTP_EO_switch.php
- E. Lebiush, R. Lavi, Y. Tzuk *et al.*. High repetition rate end-pumped electro-optic RTP Q-switch Nd:YVO₄ laser [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics Europe-Technical Digest*, 2000. 52
- Tang Hao, Zhu Xiaolei, Meng Junqing *et al.*. High repetition rate short pulse width LGS electro-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1):137~141
唐 昊, 朱小磊, 孟俊清 等. 高重复率窄脉宽 LGS 电光调 Q Nd:YVO₄ 激光器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1):137~141
- Wang Hao, Wang Qingpu, Zhang Xingyu *et al.*. La₃Ga₅SiO₁₄ as active electrooptic Q-switch in a pulsed Nd:LiYF laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7):939~942
王 浩, 王青圃, 张行愚 等. La₃Ga₅SiO₁₄ 电光调 Q 的 Nd:LiYF 激光器研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7):939~942