

文章编号: 0258-7025(2009)07-1654-06

高重复频率电光调 Q 全固态激光器研究进展

朱小磊 唐 昊 李小莉 王君涛

(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 高重复频率窄脉宽全固态激光器在激光加工领域以及空间激光通信、激光雷达、激光测距等空间应用领域都具有巨大的市场需求和广阔的应用前景。利用电光调 Q 方式可以获得窄脉宽、大能量激光脉冲输出, 且具有良好的稳定性。近年来, 随着新型电光晶体的出现, 电光调 Q 开关的工作重复频率得到了显著的提高。主要综述高重复频率电光调 Q 全固态激光器在高速 Q 开关性能及激光输出方面的研究进展, 并简要报道了研究小组在该研究领域取得的最新实验结果。

关键词 激光器; 高重复频率; 电光调 Q; 全固态

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093607.1654

Recent Progresses of LD Pumped Solid State Lasers with High Repetition Rate Electro-Optic Q-Switch

Zhu Xiaolei Tang Hao Li Xiaoli Wang Juntao

(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 High repetition rate short pulsed compact solid state lasers pumped by laser-diode (LD) are promising and compellent in many applications such as laser machining, free space laser communications, spaceborne lidar, and laser ranging. Electro-optic (EO) Q-switching has been approved an effective method to obtain stable output with high peak power, narrow pulse width and small pulse-to-pulse amplitude fluctuation. Recently, with the development of new types of electro-optic crystals, the repetition rate of EO Q-switched solid state lasers has been improved significantly. The recent progresses of high repetition rate EO Q-switched solid state lasers are introduced in detail.

Key words lasers; high repetition rate; electro-optic Q-switching; all-solid state

1 引 言

得益于激光二极管(LD)制备技术和工艺的迅猛发展, LD抽运的全固态激光器(DPSSL), 因其具有转换效率高、光束质量好、使用寿命长、结构紧凑等独特优点, 在工业生产、科学研究、军事、医疗等众多领域获得了广泛的应用。近年来, 伴随着新一轮空间探测技术发展高潮的到来, 高重复频率、窄脉宽、多波长的全固态激光器在空间激光通信、空间激光雷达、天基主动成像、激光地貌测绘等^[1~3]空间主动探测应用领域受到了极大的关注。与此同时, 短波长、高重复频率、窄脉宽的全固态紫外激光器在激

光精细加工和超精细加工^[4]行业中的应用也备受重视, 如深紫外激光光刻等, 被认为代表了技术发展方向。相对于目前普遍使用的准分子紫外激光器而言, LD抽运的全固态紫外激光器更具优势。

通常, 获得高重复率、窄脉宽(纳秒量级)激光脉冲输出的高效率固体激光器主要采用被动 Q 开关(可饱和吸收体, 如 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体)或声光主动 Q 开关作为调 Q 元件^[5,6], 其重复频率典型值为千赫兹到百千赫兹。但这两种 Q 开关技术都存在明显的不足, 即可饱和吸收体的被动 Q 开关可以获得窄脉冲, 但其输出稳定性差, 且单脉冲能量较低, 难以实现精确同步输出。属于主动调制的声光 Q 开关, 尽

收稿日期: 2009-03-12; 收到修改稿日期: 2009-04-08

作者简介: 朱小磊(1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事全固态激光器技术及激光应用系统等方面的研究。

E-mail: xlzhu@siom.ac.cn

管很好地解决了同步问题,但其开关速度较慢,所得的脉冲脉宽较大,典型值在几十纳秒到上百纳秒。而利用非线性晶体的电光效应制成的电光 Q 开关,不但具有很强的关通能力,而且响应速度达到纳秒甚至亚纳秒量级,很容易获得 10 ns 以下的稳定脉冲输出。传统的 KD^*P 、LN 和 KTP 晶体,由于受其本身的电导率值、电光系数、压电环效应等因素的制约,制成的 Q 开关的重复频率难以有效提高。随着新型电光晶体 RTP($RbTiOPO_4$),BBO($\beta-BaB_2O_4$)和 LGS($La_3Ga_5SiO_4$)的出现,电光 Q 开关的重复频率得到极大的提升,实现了几赫兹到百千赫兹范围的全覆盖。而复合腔电光调 Q 微晶片激光器技术及四极矩晶体电光偏转开关的出现,再次将电光调 Q 频率提升到兆赫兹量级。高重复频率电光调 Q 全固态激光器性能指标的不断提,其应用潜力引起极大的关注。鉴于电光调 Q 全固态激光器性能优越,可控性强,在众多应用领域,将会越来越多地取代声光调 Q 和被动调 Q 固体激光器。本文在综述高重复频率电光调 Q 全固态激光器技术研究进展的基础上,简要报道课题组近年来在该领域研究取得的阶段性实验结果。

2 研究进展

目前,由 RTP 晶体、BBO 晶体、LGS 晶体和 PMN-ZT ($Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3-PbTiO_3$) 光学陶瓷以及四极矩电光偏转晶体等电光材料制成的高速电光 Q 开关,是实现全固态激光器高重复频率电光调 Q 窄脉冲输出的主要技术手段。其中,最具代表性的是 RTP 晶体 Q 开关,因其半波电压低(约 2000 V)、电阻率高(约 $10^{12} \Omega \cdot cm$)、压电环效应小等优点,已成为国际上的研究热点。同样,山东大学研制成功的新型电光晶体 LGS,也因使用方便,压电环效应相对较小等优点引起人们的广泛关注。在众多研究机构中,以色列索雷克原子能研究中心、德国弗朗禾费激光技术所、美国波士顿应用技术公司等在高重复频率电光调 Q 全固态激光器的研究方面处于领先地位。国内有中国科学院上海光学精密机械研究所、山东大学、清华大学等单位,在这方面也做了较为深入的研究,取得了一些重要进展。

2.1 高重复频率 RTP 电光调 Q 激光器

RTP 晶体是一种性能优越的电光晶体材料,具有光损伤阈值高、消光比高、插入损耗小、透光范围宽等优点,晶体材料本身固有的电光系数大、压电环效应小的特征,使其成为制作高重复频率、高性能电

光 Q 开关的首选材料。据以色列 Raicol Crystals 公司报道^[7],RTP 晶体在 100 kHz 重复频率工作时仍未观察到明显的压电噪声,显见其性能的优越。但是,为了补偿材料的自然双折射效应,一个 RTP 晶体电光 Q 开关需要用两块性能完全一致的晶体相互旋转 90° 组合而成,增加了结构的复杂程度。随着顶部籽晶法(Top-seeded solution growth, TSSG)^[8,9]制备工艺的日渐成熟,RTP 晶体的质量和成品率显著提高,已越来越多的应用于高重复率电光调 Q 开关中。最新资料显示,英国 LEYSOP 公司已经可以提供重复频率高达 200 kHz 的 RTP 晶体电光 Q 开关^[10]。而在重复频率电光调 Q 激光器实验研究方面,代表性的工作有 E. Lebiush 等^[11]将 RTP 晶体电光调 Q 开关应用在 Nd:YVO₄ 激光器中,成功地获得单脉冲能量约 20 μJ 的激光输出,其脉冲重复频率在 20~75 kHz 可调,脉冲宽度约 8~20 ns。国内山东大学^[12,13]利用 RTP 晶体电光开关,在氙灯抽运固体激光器中实现了高重复频率电光调 Q 输出,获得重复频率 20~40 kHz,最窄脉宽 15.5 ns 的调 Q 激光脉冲输出。图 1 为该激光器实验装置。实验所用 RTP 晶体尺寸为 4 mm × 4 mm × 5.3 mm,两块 RTP 晶体正交运用时半波电压理论值为 2687 V。

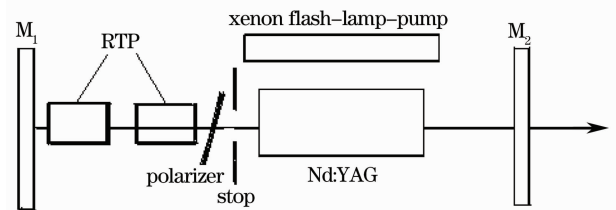


图 1 高重复率 RTP 电光调 Q 激光器实验装置图
Fig. 1 Experimental setup of high repetition rate RTP EO Q-switched laser

2.2 高重复频率 BBO 电光调 Q 全固态激光器

BBO 非线性晶体同样具有消光比高、抗损伤阈值高、吸收损耗低、压电环效应相对较小的特点,作为电光 Q 开关,被主要用于高平均功率、高重复频率全固态激光器及再生放大系统^[14]。但电光 BBO 晶体 Q 开关需要较高的半波电压,且不易通过增大晶体纵横比的方式来降低其半波电压,所以目前还未见有重复频率超过 50 kHz 的 BBO 晶体电光 Q 开关成熟产品报道。国内福建福晶科技股份有限公司开发的双 BBO 晶体结构电光 Q 开关,最高重复频率达到 50 kHz,四分之一波电压低于 4000 V,代表了目前国际先进水平。在调 Q 激光器应用方面,德国夫琅禾

费激光技术所杜可明等^[15]利用 BBO 晶体电光调 Q 开关,在其设计的部分端面抽运混合腔 Nd:YVO₄ 板条激光器中,成功地实现了重复频率 10~50 kHz 可调,脉宽最窄 6.45 ns 的激光脉冲输出。该实验装置如图 2 所示。其部分端面抽运混合腔由两个全反柱面镜 M₁, M₂ 组成,激光晶体尺寸为 1 mm×10 mm×12 mm,掺杂原子数分数为 0.3%。当重复频率为 50 kHz 时,脉宽为 11.3 ns,激光单脉冲能量达 1.66 mJ,最大平均功率 83 W,光-光转换效率 33%。在国内,李小莉等^[16]应用类似的谐振腔结构,用特殊设计的 14 mm×18 mm×1.8 mm 板条状 BBO 晶体作为电光 Q 开关,只需 2400 V 的工作电压,成功地在 Nd:YVO₄ 激光器中实现了高重复频率电光调 Q 振荡,获得了最高重复频率 25 kHz,脉宽 9.5 ns,单脉冲能量 1.2 mJ 的激光输出。

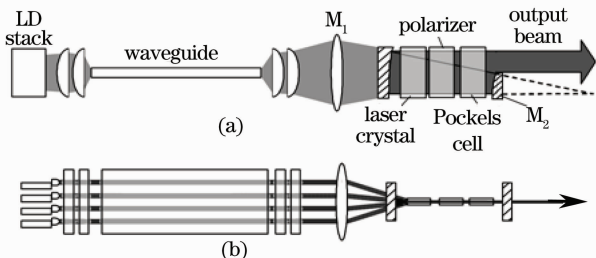


图 2 部分端面抽运混合腔高重复频率 BBO

电光调 Q 激光器示意图。(a)水平方向;(b)垂直方向

Fig. 2 Schematic of partially end-pumped high repetition rate BBO EO Q-switched laser with a hybrid resonator. (a) Horizontal direction; (b) vertical direction

2.3 高重复频率 LGS 电光调 Q 激光器

LGS 晶体是山东大学生长的一种新型电光调 Q 晶体,且物理化学性能稳定,最大的不足是 LGS 晶体存在较大旋光效应。2002 年,尹鑫等^[17]首先进行了 LGS 晶体电光开关应用的研究,提出了能消除晶体旋光性影响的电光 Q 开关设计方法。后续的实验结果表明,LGS 晶体电光 Q 开关在工作频率为 50 kHz 时仍没有观察到明显的压电环效应^[18],因而被证明是一种非常有应用前景的高速电光 Q 开关材料。2005 年,中国科学院上海光学精密机械研究所开始了 LGS 晶体电光 Q 开关在全国态激光器中应用的研究^[19],采用山东大学提供的尺寸为 8 mm×8 mm×37.5 mm 的 LGS 晶体,在端面抽运的 Nd:YVO₄ 激光器中实现了 10 kHz 调 Q 激光脉冲输出,平均功率达 4.2 W,光-光转换效率为 15%,斜率效率达 23%,激光脉冲宽度为 8.2 ns,光

束质量因子 $M^2 \leq 1.2$ 。图 3 为激光器实验装置示意图。

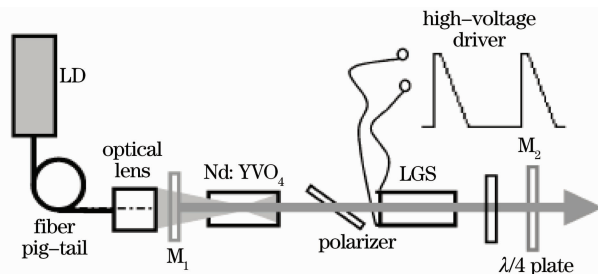


图 3 高重复频率 LGS 电光调 Q 激光器装置图

Fig. 3 Schematic diagram of high repetition rate LGS EO Q-switched laser

2.4 高重复频率光学陶瓷电光调 Q 激光器

研究表明,在压电陶瓷材料中掺入适当比例的稀土元素,不但可以使陶瓷材料对光透明,而且使陶瓷材料能产生较大的二次电光效应,因而可以被用作电光 Q 开关。1998 年,Gary Y. Wang 等^[20]报道了用掺 La 的 PZT 陶瓷材料 PLZT [(Pb,La)(Zr,Ti)O₃]制作成的电光调 Q 开关,在 Nd:YVO₄ 激光器中获得最高重复频率 10 kHz,脉宽 14 ns,激光单脉冲能量 11 μJ 的实验结果。由于 PLZT 陶瓷的二次电光系数为 $3.8 \times 10^{-16} (\text{m/V})^2$,因而其工作电压仅需 300 V,显著降低对驱动源的要求。2005 年,Y. K. Zou 等^[21]利用 PMN-ZT 光学陶瓷制作的电光调 Q 开关,在 LD 抽运的 Nd:YVO₄ 激光器中,实现了 200 kHz 重复频率的调 Q 激光脉冲输出,Q 开关的工作电压低至 48 V。该激光器装置如图 4 所示。PMN-ZT 陶瓷开关的光轴须与 Nd:YVO₄ 晶体的 c 轴成 45° 放置,以保证 Q 开关的通断性能。该激光器的独特之处在于,通过主动改变 PMN-ZT 陶瓷电光开关的电压,可以获得不同脉宽的激光脉冲输出。即当电压由 48 V 升到 106 V 时,输出激光脉冲的宽度在 10~100 ns 范围变化。该报道表明特种光学陶瓷在高重复频率电光调 Q 方面具有较大的应用潜力。

2.5 复合腔电光调 Q 微晶片激光器及电光偏转激光器

复合腔电光调 Q 微晶片激光器是基于法布里-珀罗(F-P)标准具自由光谱特性随间距大小改变而改变的原理^[22]实现高重复频率窄脉冲输出的。1995 年,J. J. Zayhowski 等^[23]成功地实现了复合腔电光调 Q 微晶片激光器的单纵模振荡输出,该激光器体积微小,约为 1 mm×1 mm×2.3 mm,结构简单,当输出重复频率达到 2.25 MHz 时,激光脉冲

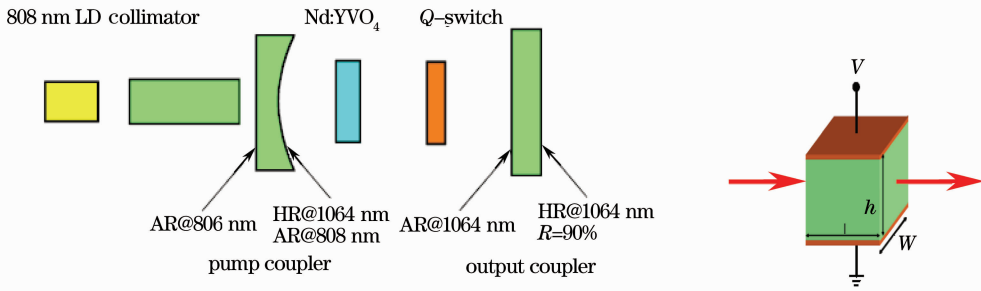


图 4 高重复频率 PMN-ZT 光学陶瓷电光调 Q 激光器及 Q 开关

Fig. 4 Configuration of high repetition rate PMN-ZT Q-switched laser

宽度为 8.8 ns, 单脉冲能量 0.16 μJ , 平均功率 360 mW, 脉冲与脉冲之间的幅度抖动小于 0.5%。在国内, 清华大学王云祥等^[24]在 2008 年也获得了低压驱动复合腔电光调 Q 微片激光器的高重复频率调 Q 输出, 该激光器结构如图 5 所示, 激光增益介质和电光晶体分别选用 Nd:YVO₄ 和 LiTaO₃, 谐振腔尺寸小于 3 mm \times 3 mm \times 2.5 mm。在 Q 开关驱动电压为 175 V 时, 短时期内得到 1 MHz 重复频率的激光脉冲输出, 脉冲宽度约 20 ns。由于该激光器对形成法布里-珀罗标准具的调 Q 晶体的两个端面要求严格, 给实际应用带来很大困难, 目前该类激光器的实际应用尚不成熟。

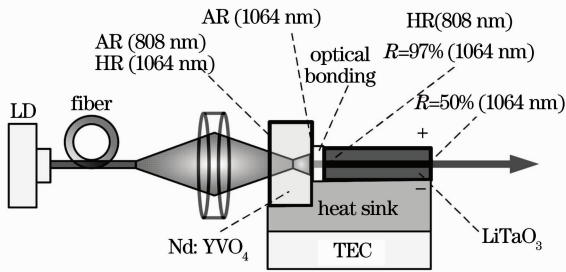


图 5 复合腔电光调 Q 微晶片激光器结构示意图

Fig. 5 Configuration of coupled-cavity EO Q-switched microchip laser

而高速电光偏转器作为调 Q 开关的原理类似于声光调制器。当在四极矩晶体上施加合适的高压时, 通过晶体的光线就会以一定的角度偏离原来的传播方向, 形成调制器的“关/通”效应。1998 年 G. J. Friel 等^[25]首先报道了用电光偏转器作为调 Q 开关的 Nd:YVO₄ 激光器调 Q 脉冲输出。2008 年, R. Horiuchi 等^[26]在 LD 抽运 Nd:YVO₄ 激光器中, 用四极矩晶体电光偏转器获得重复频率高达 1.4 MHz 调 Q 激光脉冲输出, 输出平均功率达到 2.7 W, 脉冲宽度为 39 ns, 激光器光-光转换效率为 42%, 激光谐振腔长度只有 40 mm。电光偏转器晶体尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 10 mm, 工作电压为

330 V。图 6 为该激光器工作示意图。

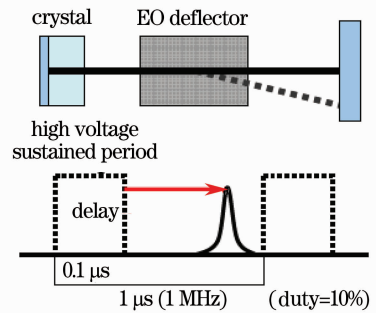


图 6 电光偏转调 Q 激光器工作示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the pulse oscillation mode

2.6 本课题组研究工作的最新进展

本课题组开展高重复频率电光调 Q 全固态激光器技术的研究, 主要围绕 KD*P 晶体 Q 开关, BBO 晶体 Q 开关, LGS 晶体 Q 开关, RTP 晶体 Q 开关展开, 并逐步深化。在前期的千赫兹脉冲激光二极管阵列 (LDA) 侧面抽运 Nd:YAG 激光器研究过程中, 用 KD*P 晶体 Q 开关获得了千赫兹绿光输出, 脉冲宽度 ≤ 7 ns, 单脉冲能量大于 10 mJ, 并提出了热致双折射效应完全补偿的新方法^[27,28]。近期采用 LD 端面抽运结构, 将重复频率提升到 1.5 kHz, 532 nm 波长单脉冲能量大于 1 mJ, 光-光转换效率大于 13%。用 BBO 晶体 Q 开关, 在 LDA 叠层端面抽运的 Nd:YVO₄ 板条激光器中, 获得 25 kHz 重复频率的激光窄脉冲输出, 平均功率大于 30 W, 光束质量因子 $M^2 < 1.6$ ^[16]。2008 年, 课题组用山东大学提供的纵横比值为 10:1 的 LGS 晶体, 四分之一波电压 ($V_{\lambda/4}$) 理论值仅为 1760 V, 采用脉冲加压式电光调 Q 方式, 在 LD 端面抽运 Nd:YVO₄ 激光器中, 获得了最高重复频率 30 kHz, 脉宽 9.2 ns 的调 Q 激光脉冲输出, 最大输出平均功率达 6.2 W, 激光输出斜率效率达 32.7%。该激光器由于引入传导冷却技术, 彻底摒弃了水循环冷却结构。而在实验设计的 V 字形激光谐振腔中, 通过在束腰位置

插入 LBO 倍频晶体,成功地获得了 30 kHz 重复频率的腔内倍频绿光激光脉冲输出,并有效地克服了 LGS 晶体旋光效应对倍频的不利影响。图 7 为该激光器结构示意图。当 LGS 电光 Q 开关工作在 20 kHz 重复频率时,绿光激光平均输出功率 2.3 W,脉冲宽度 ≤ 10 ns,光-光转换效率约为 10%。在高平均功率输出的条件下,激光的光束质量因子

$M^2 < 2^{[29]}$ 。此外,在同一个激光器实验平台上,用两块 RTP 晶体组成的电光 Q 开关,成功地实现了 30 kHz 的调 Q 脉冲序列输出,1064 nm 激光脉冲输出平均功率 ≥ 6.7 W,脉冲宽度可窄至 7.8 ns,激光输出斜率效率达 34.9%。深入的研究工作仍在进行中,详细的实验结果将在后续文章中予以报道。

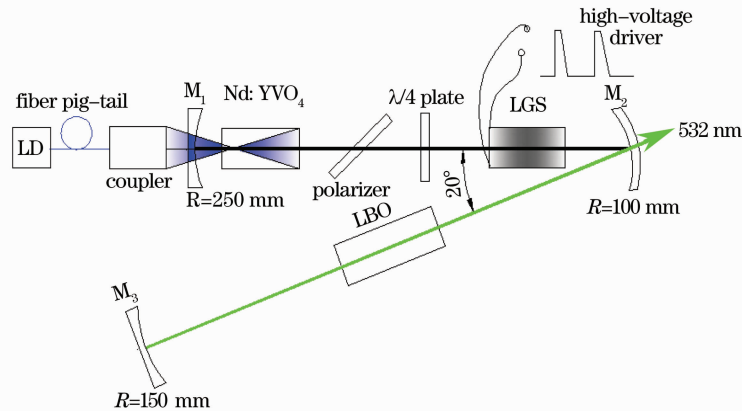


图 7 LGS 晶体电光调 Q 绿光激光器

Fig. 7 Experimental setup of high repetition rate EO Q-switched green laser

3 结 论

高重复频率电光调 Q 全固态激光器是高功率固体激光器的一个重要发展方向,具有很大的应用潜力。从目前已报道的技术指标上看,晶体 Q 开关的重复频率最高为 200 kHz,激光输出平均功率仍小于 100 W,因此该激光器具有进一步提升性能的潜力。为了获得高转换效率及高光束质量,高重复频率电光调 Q 全固态激光器主要采用端面抽运形式,增益介质以 Nd:YVO₄ 晶体为主。文献[14]中提到的 Nd:GdVO₄ 晶体,被认为是一种非常有应用潜力的增益介质,随着其制备方法的成熟,将有可能取代 Nd:YVO₄ 晶体成为最适合高重复频率运转的激光增益介质。而核心部件电光调 Q 开关,目前以 RTP 晶体, BBO 晶体和 LGS 晶体为主,但是光学陶瓷材料电光开关的发展潜力不容忽视。随着高重复频率电光调 Q 开关的可靠性技术不断提高,电光调 Q 全固态激光器凭借其输出重复频率高、脉宽窄、电光转换效率高、结构紧凑、稳定性好等优势,将被广泛地应用于激光雷达、空间通信、激光测距以及激光精细加工等诸多领域。

参 考 文 献

1 Liu Liren. Laser communications in space. I optical link and terminal technology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 3~20

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): 3~20

2 Zhou Tianhua, He Ning. The laser remote sensing of underwater acoustic signal[C]. *ISAPE '06. 7th International Symposium on*, 2006, 7:1~4

3 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

4 H. Y. Zheng, H. Huang. Ultrasonic vibration-assisted femtosecond laser machining of microholes[J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2007, **17**(8): 58~61

5 John J. Zayhowski, Alexander (Sandy) L. Wilson, Jr. Pump-induced bleaching of the saturable absorber in short-pulse Nd:YAG/Cr³⁺:YAG passively Q-switched microchip lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(12): 1588~1593

6 Baoquan Yao, Xiaoming Duan, Liangliang Zheng *et al.*. Continuous-wave and Q-switched operation of a resonantly pumped Ho:YAlO₃ laser[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(9): 14668~14674

7 http://www.raicol.com/product_details.asp

8 M. Roth, N. Angert, M. Tseitlin *et al.*. Ferroelectric phase transition temperatures of self-flux-grown RbTiOPO₄ crystals[J]. *Optical Materials*, 2004, **26**: 465~470

9 M. Tseitlina, E. Mojaevb, M. Roth. Growth of high resistivity RbTiOPO₄ crystals [J]. *J. Crystal Growth*. 2008, **310**: 1929~1933

10 <http://www.leysop.com/pockels.htm>

11 E. Lebiush, R. Lavi, Y. Tzuk *et al.*. High repetition rate end-pumped electro-optic RTP Q-switch Nd:YVO₄ laser[C]. *Proc. CLEO Europe' 2000*, 2000: 1

12 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
- 13 Jing Wang, Shengzhi Zhao, Kejian Yang *et al.*. Pulse compression and threshold decrease in high-repetition-rate doubly Q-switched intracavity optical parametric oscillator [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(9): 2521~2525
- 14 J. Kleinbauer, R. Knappe, R. Wallenstein. 13-W picosecond Nd:GdVO₄ regenerative amplifier with 200-kHz repetition rate[J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**: 163~166
- 15 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
- 16 Li Xiaoli, Shao Jie, Zang Huaguo *et al.*. High repetition rate short pulse width Nd:YVO₄ 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:YVO₄ 板条激光器[J]. 中国激光, 2008, **35**(2): 206~210
- 17 X. Yin, J. Wang, H. Zhang *et al.*. Electrooptic properties and electrooptic Q switch of La₃Ga₅SiO₁₄ single crystal [J], *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2002, **41**(Part 1): 7419~7421
- 18 Wang Jiyang, Yin Xin, Zhang Shaojun *et al.*. Growth, property and electro-optical application of lagasite crystal[J]. *Progress in Physics*, 2007, **27**(9): 344~360
- 王继扬,尹鑫,张少军等. 硅酸镓镧单晶的生长、性质及电光应用的研究[J]. 物理学进展, 2007, **27**(9): 344~360
- 19 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
- 20 Gary Y. Wang, Huai Jiang, Jing Zhao *et al.*. Low-voltage electro-optic Q switching of 1.06 μm microlasers by PLZT[C], *Proc. of CLEO'98*, 1998: 485
- 21 Yingyin Kevin Zou, Qiushui Chen, Run Zhang *et al.*. Low voltage, high repetition rate electro-optic Q-switch[C]. *Proc. of CLEO2005*, 2005: 1094~1096
- 22 L. W. Mackintosh. Double etalon Q-switching of a continuously pumped Nd:YAG laser [J]. *Appl. Opt.*, 1969, **8**(10): 1991~1997
- 23 J. J. Zayhowski, C. Dill III. Coupled-cavity electro-optically Q-switched Nd:YVO₄ microchip lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7): 716~718
- 24 Wang Yunxiang, Huang Lei, Gong Mali *et al.*. Low voltage driving coupled-cavity electro-optically Q-switched microchip lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s1): 9~12
- 王云祥,黄磊,巩马理等. 低压驱动复合腔电光调 Q 微晶片激光器[J]. 中国激光, 2008, **35**(s1): 9~12
- 25 G. J. Friel, R. S. Conroy, A. J. Kemp *et al.*. Q-switching of a diode-pumped Nd:YVO₄ laser using a quadrupole electro-optic deflector [J]. *Appl. Phys. B*, 1998, **67**: 267~270
- 26 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
- 27 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
- 28 Ji Jianghua, Zhu Xiaolei, Dai Shutao *et al.*. Depolarization loss compensated resonator for electro-optic Q-switched solid-state laser [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **270**(2): 301~304
- 29 Hao Tang, Junqing Meng, Huaguo Zang *et al.*. 20 kHz watt-level green laser with LGS crystal electro-optic Q-switcher [J]. *Chin. Opt. Lett.*, Accepted