

硅酸镓镧电光调 Q 的 Ce:Nd:YAG-KTP 高效光参变人眼安全激光器研究

韩文杰 李河均 张文平 邬双阳 窦飞飞 胡永钊

(中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450047)

摘要 在灯泵 Ce:Nd:YAG 双掺晶体水冷激光器中,用高损伤阈值的新型电光晶体硅酸镓镧($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$)作为 Q 开关,采用场效应管快速 Q 开关驱动电路,实现了 20 Hz 脉冲重复频率的稳定 $1.064\ \mu\text{m}$ 基频激光输出,在基频激光腔外设计了光参变激光谐振腔,用 KTP 晶体进行光参变转换,基于 II 类非临界相位匹配条件,实现了 $1.57\ \mu\text{m}$ 人眼安全激光输出。研究了 YAG 晶体棒安装应力对 $1.57\ \mu\text{m}$ 输出的影响,发现由应力引起的双折射效应可使光参变转换效率严重降低,分析了效率降低的原因,给出了等效应力与光参变转换效率的关系曲线,测试得到所设计激光器的光参变转换效率最高点,在 20 Hz 脉冲重复频率下,当 $1.064\ \mu\text{m}$ 激光脉冲能量为 220 mJ 时, $1.57\ \mu\text{m}$ 激光脉冲能量为 109.3 mJ,最高达到了近 50% 的光参变转换效率,脉冲宽度为 4.3 ns,束散角为 8.1 mrad,此时电抽运注入为 11.3 J,总电光效率为 0.96%,进一步增大 $1.064\ \mu\text{m}$ 激光能量时,光参变转换效率会缓慢下降。激光器输出稳定性优于 5%,结构紧凑,通过了温度、振动、冲击等主要环境试验技术指标考核,实现了工程化应用。

关键词 激光器;人眼安全激光;光参变振荡; $1.57\ \mu\text{m}$;应力双折射;硅酸镓镧;电光调 Q

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.101407

Study of Ce:Nd:YAG-KTP OPO Eye-Safe Laser Based on Langasite Electro-Optic Q-Switch

Han Wenjie Li Hejun Zhang Wenping Wu Shuangyang Dou Feifei Hu Yongzhao

(The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation,
Zhengzhou, Henan 450047, China)

Abstract A flash lamp pumped Ce^{3+} - Nd^{3+} double doped YAG crystal water cool laser is devised, in which the $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$, a novel electro-optic crystal activated by a field effect transistor (FET) fast switch circuit, is used as Q-switch. Based on above fact, steady $1.064\ \mu\text{m}$ laser pulse radiated at a repetition rate of 20 Hz is realized. An optical parametric oscillator (OPO) is designed outside the $1.064\ \mu\text{m}$ laser resonant cavity, KTP crystal is employed to actualize optical parametric conversion, based on class II non-critical phase matching $1.57\ \mu\text{m}$ eye-safe laser is accomplished. Investigation and test is carried out about the influence of fixing stress of YAG rod to the output of $1.57\ \mu\text{m}$ laser, a concernful phenomenon that double refraction induced by stress can depress the OPO conversion efficiency enormously, is discovered, the reason of efficiency fall is analyzed, the relation curve of equivalent stress and OPO conversion efficiency is presented. The highest OPO conversion efficiency is obtained at the pulse repetition rate of 20 Hz, when $1.064\ \mu\text{m}$ laser pulse energy is 220 mJ, $1.57\ \mu\text{m}$ laser pulse energy is 109.3 mJ, pulse duration is 4.3 ns, beam divergence angle is 8.1 mrad, OPO conversion efficiency reaches 50% nearly, corresponding electro-optic efficiency is 0.96% with an electric injection of 11.3 J, OPO efficiency falls slowly when $1.064\ \mu\text{m}$ laser pulse energy increases much more. The energy stability of the OPO laser is excelled 5% with a smart configuration, environmental applicability including temperature, oscillation, impact etc is tested, engineering application of the OPO laser is realized.

Key words lasers; eye-safe laser; optical parametric oscillator; $1.57\ \mu\text{m}$; stress double refraction; langasite; electro-optic Q-switch

OCIS codes 140.3540; 140.3460

收稿日期: 2012-06-13; 收到修改稿日期: 2012-07-12; 网络出版日期: 2012-08-28

作者简介: 韩文杰(1981—),男,硕士,工程师,主要从事固体激光技术、激光探测等方面的研究。

E-mail: wjhan1018@163.com

1 引言

以性能优良的非线性晶体作为转换介质,将 $1.064\ \mu\text{m}$ 激光通过光参变振荡(OPO)^[1]的非线性过程转化为 $1.57\ \mu\text{m}$ 人眼安全激光,是近年来人眼安全激光技术研究的热点,相对于其他的人眼安全激光产生手段,具有阈值低、效率高、安全性好和材料成熟度高等显著优点,成为目前获取人眼安全激光的主要技术途径而被广泛应用^[2~9]。

在工程应用中,通常需要脉冲激光长时间工作,对于 Q 开关电光晶体的抗损伤阈值和光学耐疲劳性要求很高,实际测试发现用 LiNbO_3 晶体作为 Q 开关时,难以承受脉冲重复频率 20 Hz、单脉冲能量 220 mJ、峰值功率约 28 MW、功率密度接近 $100\ \text{MW}/\text{cm}^2$ 的 $1.064\ \mu\text{m}$ 激光长时间运转,此时极易对晶体造成内部损伤,必须采用性能更加优越的电光晶体,测试了新型电光晶体 LGS 作为 Q 开关^[10~13]的良好性能。在工程应用中,光学器件的安装应力往往对激光器的稳定性有着重要影响,重点研究了 YAG 棒受应力产生的双折射效应对基频光光束质量和 OPO 转换效率的影响,分析了这些现象的光学机理,测试得到受应力影响和正常状态下的 OPO 效率曲线,并进行了最高转换效率的实验测试和参数优化设计,最后对设计的 OPO 激光器进行了气密封装和主要环境实验指标测试,结果满足工程应用要求,这些工作对于 OPO 激光器设计 and 应用都很有参考意义。

2 激光器设计

人眼安全激光器分为两个光学功能模块: $1.064\ \mu\text{m}$ 基频光谐振腔和 OPO 谐振腔,如图 1 所示,左边虚线框内为 $1.064\ \mu\text{m}$ 基频光谐振腔,采用平平腔,M1、M2 分别为高反镜和部分反射镜,用脉冲氙灯抽运 $\Phi 6\ \text{mm} \times 80\ \text{mm}$ 的 Ce^{3+} 、 Nd^{3+} 双掺 YAG 晶体棒,采用 LGS 晶体作为电光调 Q 晶体,晶体尺寸为 $8\ \text{mm} \times 8\ \text{mm} \times 38\ \text{mm}$, x 方向加电场, z 方向透光。LGS 晶体具有旋光特性,根据相关文献论述,对其开关电压经过合理计算和实际测试可确定,并插入 $\lambda/4$ 波片,利用正交偏光干涉的开关方式,此时可忽略电光效应与旋光性的交互作用影响,达到最佳的开关效果^[10]。LGS 具有很高的抗损伤阈值,插入损耗小,化学物理性质稳定,不易潮解,无相变,光学抗疲劳性强,不会因长时间的激光运转引起的热效应导致光学参数变化、开关性能下降和模式畸变等问题,因此非常适合于高脉冲能量激光的长时间运转^[11]。

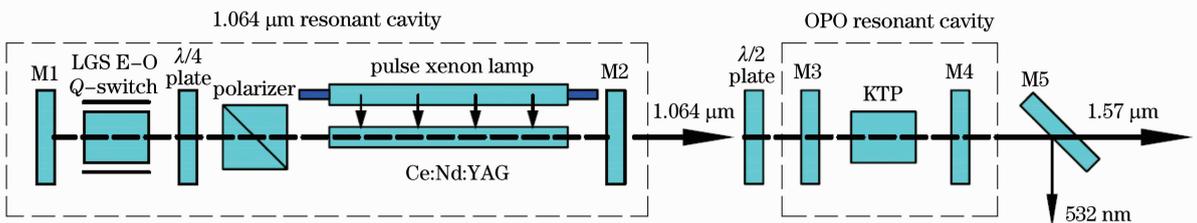


图 1 OPO 激光谐振腔原理图

Fig. 1 Schematic diagram of OPO laser oscillator

设计了新型场效应管快速升压 Q 开关驱动电路,与 LGS 晶体、谐振腔、抽运波形的光电参数达到良好匹配,图 2 为 Q 开关的高压脉冲波形,场效应管开关电路的高压脉冲幅值、上升速度稳定,实现了稳定的 $1.064\ \mu\text{m}$ 基频输出,测试得到能量稳定度优于 5%。

图 1 右边虚线框内,镜片 M3、M4 构成 OPO 谐振腔,M3 对 $1.064\ \mu\text{m}$ 高透,对 $1.57\ \mu\text{m}$ 高反,M4 对 $1.064\ \mu\text{m}$ 高反,对 $1.57\ \mu\text{m}$ 部分反射。 $1.064\ \mu\text{m}$ 基频光经 $\lambda/2$ 波片注入 OPO 腔,采用 KTP 晶体作为参量晶体,晶体尺寸为 $8\ \text{mm} \times 8\ \text{mm} \times 30\ \text{mm}$,基于 II 类非临界相位匹配条件,切割方向为 $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$,此时走离角为零,而接受角和有效非线性系数最大^[3,5,6],并且 OPO 腔短小紧凑,总长为 50 mm,紧连基频激光腔,易于获得高能量密度的基频注入,实现高的 OPO 转换效率。调节半波片与腔镜 M3,满足相位匹配条件时,可得到最大的光参变振荡输出,由于采用了单谐振(SRO)^[1]方式,加之 KTP 晶体与镜片材料对闲频光的强吸收,因此主要输出为 $1.57\ \mu\text{m}$ 激光,并伴有微弱的 532 nm 倍频光输出,通过反射镜 M5 滤出光路。独立设计的 OPO 谐振腔体现了功能模块化的设计思想,便于调试、维护与故障定位,在激光设备实际应用中得到体现。

3 实验研究

3.1 YAG 棒安装应力对 OPO 转换效率的影响

在激光器装配调试中,由于 YAG 棒安装固定结构件的加工误差和人为因素,极易对棒造成应力,测试后发现:应力作用会造成 $1.064 \mu\text{m}$ 基频光光束质量和 $1.57 \mu\text{m}$ 激光输出能量的明显下降。当棒受到固定机构的不均匀挤压作用时产生应力,应力使光学各向同性的 YAG 棒变为各向异性单轴晶体,其介质折射率变化的程度与应力成正比,并且随应力分布的变化而变化。由于这种挤压应力具有方向不确定和分布不均匀的特点,加之激光运转时热效应的叠加,因此形成的各向异性晶体具有不规则性,光轴与棒端面夹角也存在不确定性。

1) 当光轴与棒端面斜交时,在腔内谐振的线偏振光从全反镜返回,通过 LGS 晶体、 $\lambda/4$ 波片和起偏器,正入射 YAG 棒后发生双折射,分成 o 光和 e 光,两种光各自与起偏器选择的振动方向一致的振动分量形成受激辐射输出,由于两光属于同源同频光,且偏振方向一致,因此在输出后将发生相干,造成光束质量下降,在感光材料上能够观察到干涉条纹。

2) 当光轴与晶面平行时,线偏振光正入射 YAG 棒发生双折射,产生的 o 光和 e 光的波法线方向与光线方向均相同,但传播速度不同,因此通过 YAG 棒后将合成为椭圆偏振光输出,使 $\lambda/2$ 波片对基频光偏振方向旋转调节功能失效,相位匹配无法实现最佳状态,造成 OPO 效率下降。

从实际观测结果来看,以上两种双折射情形同时存在,YAG 棒受应力呈现出一种综合的双折射效应,图 3(a)、(b)为 YAG 棒受应力作用,在 20 Hz 脉冲重复频率下输出的 $1.064 \mu\text{m}$ 和 $1.57 \mu\text{m}$ 激光光斑,像纸经适度曝光,光斑呈现出明显的干涉条纹,图 3(c)、(d)为采用改进的棒紧固方式消除应力后的正常光斑。

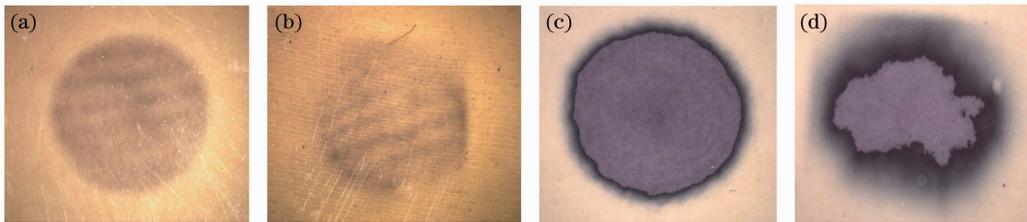


图 3 激光光斑。(a) $1.064 \mu\text{m}$, 有应力; (b) $1.57 \mu\text{m}$, 有应力; (c) $1.064 \mu\text{m}$, 消除应力; (d) $1.57 \mu\text{m}$, 消除应力

Fig. 3 Laser spot. (a) $1.064 \mu\text{m}$, with stress; (b) $1.57 \mu\text{m}$, with stress; (c) $1.064 \mu\text{m}$, without stress;

(d) $1.57 \mu\text{m}$, without stress

当应力变化时,棒的折射率分布、双折射效应以及 o 光与 e 光的相对位移随之变化,引起干涉条纹的变化,鉴于实际应力不便测试,为定量描述棒应力与 OPO 转换效率的实际关系,采用干涉条纹的间距表征棒的受力程度,间接描述了所受应力大小,图 4 给出了测试得到的条纹间距与激光输出能量及 OPO 效率的关系曲线。

图中曲线显示:随着应力增加,干涉条纹间距减小,条纹数增多,基频光脉冲能量缓慢下降,而 $1.57 \mu\text{m}$ 信号光输出能量下降很快,条纹间距由 1.2 mm 左右减小至 0.2 mm 左右时,基频光由 184 mJ 降至 175 mJ ,而信号光由 80 mJ 降至 19 mJ ,OPO 转换效率由 43.5% 降低至 10.9% ,下降幅度达到 75% 。从以上测试结果来看,基

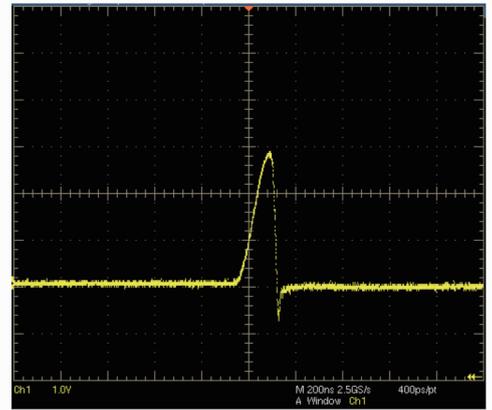


图 2 Q 开关的高压脉冲波形

Fig. 2 High-voltage pulse wave form of Q-switch

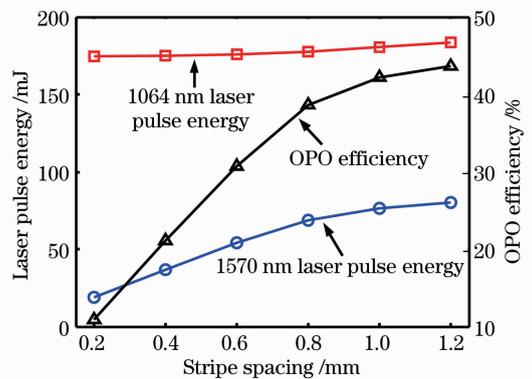


图 4 干涉条纹间距与激光能量、OPO 效率的关系曲线

Fig. 4 Relation curve chart of interference stripe spacing, laser pulse energy and OPO efficiency

频光的能量降幅很小,这与上文的原理分析一致,因为双折射引起的干涉与椭圆偏振化并不会对输出能量造成较大影响,而 $1.57\ \mu\text{m}$ 信号光降幅很大,除以上提出的相位失配的主要影响因素外,o光与e的干涉作用也对信号光输出造成一定影响,这是由于干涉相消部位的能量密度达不到 OPO 的转换阈值,而干涉增强部位的转换受到热效应、吸收及逆转换的制约^[2,4~6,8],导致总的转换效率下降。

3.2 OPO 最高转换效率测试

OPO 的转换效率受到谐振腔类型、谐振腔光学与几何参数、光能量密度、光参变晶体类型与匹配方式、热效应和抽运参数的综合影响,在腔形与光学参数确定的情况下,通常利用调整基频能量密度、改善热效应与调节电参数的方式实现最佳的转换效率。

按照研究任务对激光脉冲工作频率和脉冲能量的要求,在 20 Hz 脉冲频率下测试了激光器的工作效率,即电抽运注入能量与 $1.064\ \mu\text{m}$ 基频光、 $1.57\ \mu\text{m}$ 信号光的相互关系,在图 5 中绘制了 OPO 效率曲线,由曲线图可知当逐渐增加脉冲氙灯的注入能量时,基频光由 182 mJ 增大至 257 mJ,在此过程中,信号光能量从 78 mJ 增大至 121 mJ,但在基频注入为 219.9 mJ 时达到了最高的 OPO 光-光转换效率 49.7%,此时信号光输出为 109.3 mJ,电抽运注入为 11.3 J,总电光效率为 0.96%。当基频光能量大于 219.9 mJ 时,OPO 转换效率呈现缓慢降低的趋势。

测试了最高转换效率点的束散角和信号光输出的稳定性: $1.57\ \mu\text{m}$ 激光束散角为 8.1 mrad,采用套孔法测试;以 20 Hz 脉冲频率连续工作 5 min,统计得到脉冲能量的稳定度优于 5%,测试所用能量计为中国计量院生产的 NIM-E1000 型,可同时测量基频光和信号光,用 InGaAs-PIN 探测器和 Tektronix 公司的 TDS5054B 型数字示波器观测了信号光脉冲的波形,20 Hz 时信号光脉冲宽度为 4.3 ns,如图 6 所示。

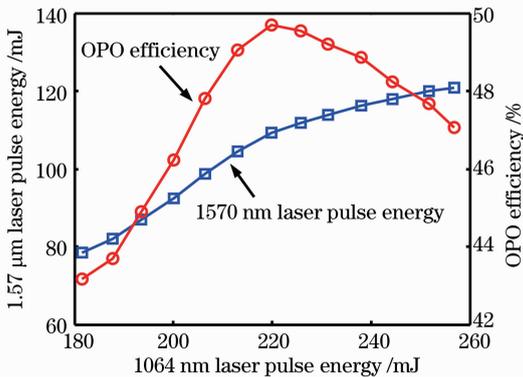


图 5 干涉条纹间距与 $1.57\ \mu\text{m}$ 输出能量、OPO 效率的关系曲线

Fig. 5 Relation curve of interference stripe spacing, $1.57\ \mu\text{m}$ output energy and OPO efficiency

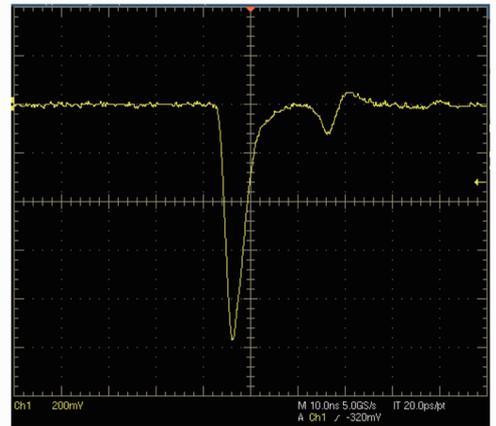


图 6 脉冲重复频率为 20 Hz 时 $1.57\ \mu\text{m}$ 激光脉冲波形

Fig. 6 $1.57\ \mu\text{m}$ laser pulse wave form at 20 Hz pulse repetition rate

4 工程化测试与应用

激光器的内部结构如图 7 所示,尺寸为 $400\ \text{mm} \times 80\ \text{mm} \times 70\ \text{mm}$,将其安装于整体铝铸件外壳内,外壳上设计气密性良好的光学窗口和机电接口,用导电胶条密封好,充入氮气。

根据应用条件的要求,按照国军标相关规定对激光器进行了环境适应性主要技术指标的测试,测试内容

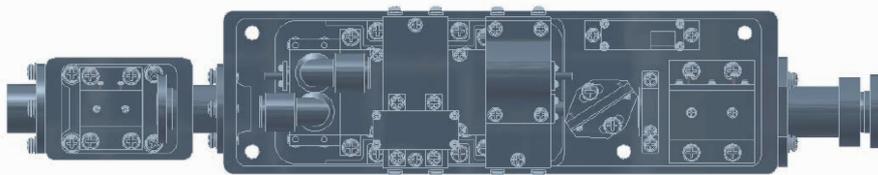


图 7 OPO 激光器内部结构图

Fig. 7 Configuration figure of OPO laser

和结果如表 1 所示,测试所用仪器仪表均在计量有效期内。

表 1 激光器环境适应性测试

Table 1 Test for the environment applicability of laser

| Test subject | Test method | Test result |
|--|---|---|
| General inspection at room temperature | Powered for 8h, tested randomly at the pulse repetition rate of 1Hz, once test is less than 10min, interval of twice is greater than 5min | Energy stability is excelled 5% |
| Keeping at low temperature | Keeping for 24h at -40°C , return to room temperature to test | Normal output |
| Operation at low temperature | Keeping for 4h at -20°C , power to test | Normal output |
| Keeping at high temperature | Keeping for 24h at $+70^{\circ}\text{C}$, return to room temperature to test | Normal output |
| Operation at high temperature | Keeping for 4h at $+60^{\circ}\text{C}$, power to test | Normal output |
| Oscillation | Carrying out sinusoidal oscillation from 5Hz to 100Hz, then to 5Hz at three orthotropic orientations of x , y , z successively, once for 20min then to test | Normal output |
| Impact | Carrying out 3 times impacts as an accelerated speed of peak value of 300 m/s^2 at three orthotropic orientations of x , y , z successively, power to test after impact of every orientation | Normal output |
| Airtightness | Filling housing with nitrogen to a pressure difference of 20kPa, monitoring pressure value for 30min with piezometer | Steady pressure difference, good airtightness |
| Moistureproof and dustproof | Observing by airtightness | Good protective |

通过环境适应性考核的 OPO 激光器被应用于某军用激光测距设备中,工作稳定可靠,提高了测距设备综合性能。

5 结 论

设计了一个结构紧凑的 YAG-KTP-OPO 激光器,采用了稳定的场效应管 Q 开关驱动电路技术,驱动 LGS 作为电光 Q 开关晶体,提高了激光器抗损伤阈值和光学耐疲劳性,保证了 $1.064\ \mu\text{m}$ 基频光长时间的稳定输出,研究了 YAG 棒应力双折射对 OPO 转换效率的影响,深入分析了双折射造成的负面效应的原因。对于各项光、机、电参数确定的 OPO 激光器,OPO 转换效率存在最高点,通过优化设计激光器参数,获得最高达 50% 的 OPO 转换效率,激光器通过了工程化测试,正常工作温度范围为 $-20^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$,抗振性能符合国军标要求,在某军用激光测距设备实现应用。

参 考 文 献

- 1 Shi Shunxiang, Chen Guofu, Zhao Wei *et al.*. Nonlinear Optics[M]. 1st edition, Xi'an, Xi'an UEST Publishing Company, 2003. 180~190
石顺祥,陈国夫,赵卫等.非线性光学[M].第一版,西安:西安电子科技大学出版社,2003. 180~190
- 2 He Jingliang, Wang Ruihua, Huang Haitao *et al.*. Efficiency and high power all-solid-state $1.5\ \mu\text{m}$ intracavity optical parametric oscillator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1789~1792
何京良,王瑞华,黄海涛等.高效大功率全固态 $1.5\ \mu\text{m}$ 腔内光参变振荡器[J].中国激光,2009, **36**(7): 1789~1792
- 3 Jin Feng, Zhai Gang, Li Jing *et al.*. Experimental study of high-repetition-rate eye-safe optical parametric oscillator[J]. *Laser Technol.*, 2006, **30**(1): 20~22
金锋,翟刚,李晶等.高重频人眼安全光参变振荡器实验研究[J].激光技术,2006, **30**(1): 20~22
- 4 Li Tao, Zhuo Zhuang, Li Xiaomin *et al.*. Laser diode-side-pumped acousto-optic Q-switched Nd:YAG/KTA eye-safe optical parametric oscillator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1305~1308
李涛,卓壮,李晓敏等.激光二极管侧面抽运声光调 Q Nd:YAG/KTA $1.57\ \mu\text{m}$ 人眼安全光参变振荡激光器[J].中国激光,2006, **33**(10): 1305~1308
- 5 Li Yufei, Qu Yu, Sun Yuming *et al.*. Diode-side-pumped AO Q-switched Nd:YAG/KTP eye-safe laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4): 591~594
李宇飞,曲瑜,孙渝明等.LD 侧泵的声光调 Q Nd:YAG/KTP 人眼安全激光器[J].光子学报,2007, **36**(4): 591~594
- 6 Qu Yu, Li Yufei, Sun Yuming *et al.*. Diode-end-pumped $1.57\ \mu\text{m}$ intracavity OPO[J]. *Infrared and Laser Engineering*,

2006, **35**(6): 683~686

曲 瑜, 李宇飞, 孙渝明 等. LD 端面泵浦的 1.57 μm 内腔式 OPO[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(6): 683~686

7 Bao Zhaorigetu, Zhou Shouhuan, Zhao Haixia *et al.*. High beam quality 1.57 μm OPO[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5): 395~397

包照日格图, 周寿桓, 赵海霞 等. 高光束质量 1.57 μm 的光参变振荡器[J]. 中国激光, 2003, **30**(5): 395~397

8 Liu Jiawei, Gao Chunqing, Gao Mingwei *et al.*. Eye-safe optical parametric oscillator with pulse string output[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, **30**(12): 1444~1447

刘嘉巍, 高春清, 高明伟 等. 脉冲串输出人眼安全光学参量振荡器研究[J]. 北京理工大学学报, 2010, **30**(12): 1444~1447

9 Pei Bo, Bao Zhaorigetu, Zhou Yun *et al.*. Experimental investigation of beam divergence in intracavity KTP OPOs[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(1): 13~15

裴 博, 包照日格图, 周 昀 等. 内腔式 KTP OPO 发散角的实验研究[J]. 中国激光, 2002, **29**(1): 13~15

10 Yin Xin, Wang Jiyang, Zhang Shaojun. Study on electro-optic Q-switch of $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ single crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 29~32

尹 鑫, 王继扬, 张少军. $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ 晶体电光 Q 开关的研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(1): 29~32

11 Tang Hao, Zhu Xiaolei, Meng Junqing *et al.*. High repetition rate short pulse width LGS electro-optic Q-switched $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 137~141

唐 昊, 朱小磊, 孟俊清 等. 高重复频率窄脉宽 LGS 电光调 Q $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 激光器[J]. 光学学报, 2010, **30**(1): 137~141

12 Tian Zhaobing, Zhang Shaojun, Li Shichen. Study of propagation of light in active crystal $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ with electric field added[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1539~1542

田召兵, 张少军, 李世忱. 加电旋光晶体 $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ 中光的传播方程的研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(11): 1539~1542

13 Zhang Shaojun, Tian Zhaobing, Yin Xin *et al.*. Study of a $\text{Nd}:\text{YAG}$ laser with voltage-decreased electro-optical Q-switch of optical activity crystal $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 689~692

张少军, 田召兵, 尹 鑫 等. 退压式 $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ 晶体电光调 Q $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光器激光性能研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(5): 689~692