

2.05 μm 单谐振纳秒脉冲光参量振荡器特性研究

谢小兵^{1,2} 李世光^{1*} 朱小磊¹ 张俊旋¹ 董怡静^{1,2} 陈卫标¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 报道了 1064 nm 单频激光抽运的 KTP 晶体外腔单谐振光参量振荡器(OPO), 获得了波长为 2.05 μm 的纳秒激光脉冲输出。在平-平腔中, 将 2 块 II 类相位匹配 KTP 晶体按走离补偿方式放置, 在 400 Hz 重复频率下, 抽运单脉冲能量达到 5 mJ 时获得了单脉冲能量为 0.9 mJ 的 2.05 μm 信号光输出, 其脉宽约为 3.7 ns, 对应抽运光-信号光转换效率约为 18%, 光束质量因子 M^2 在 x 、 y 方向分别为 2.08、3.03。

关键词 非线性光学; 光参量振荡器; 2 μm 激光器; KTP 晶体

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1208002

Characteristics of Single Resonant Nanosecond Pulse Optical Parametric Oscillator with Output Wavelength of 2.05 μm

Xie Xiaobing^{1,2} Li Shiguang¹ Zhu Xiaolei¹ Zhang Junxuan¹
Dong Yijing^{1,2} Chen Weibiao¹

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A KTP crystal extra-cavity single-resonant optical parametric oscillator (OPO) pumped by 1064 nm single-frequency laser is reported, and the nanosecond laser pulse output with wavelength of 2.05 μm is obtained. In the plane-parallel cavity, two type II phase-matched KTP crystals are placed in walk-off-compensated mode. When the pump single pulse energy reaches 5 mJ at repetition frequency of 400 Hz, a 2.05 μm signal laser output with single pulse energy of 0.9 mJ is obtained, whose pulse width is about 3.7 ns, the corresponding conversion efficiency is about 18% from pump light to signal light, and the beam quality factor M^2 are 2.08, 3.03 in x , y directions, respectively.

Key words nonlinear optics; optical parametric oscillator; 2 μm laser; KTP crystal

OCIS codes 190.4410; 190.4970; 140.3070; 140.3580

1 引言

2 μm 波长激光处于 H_2O 和 CO_2 分子吸收带, 易被生物组织吸收, 是生物医疗领域的理想光源, 也是 3~5 μm 波段中红外光参量振荡器(OPO)的有效抽运源^[1-3]。此外, 2 μm 激光属于人眼安全波段, 且位于大气传输窗口, 对大气和烟雾穿透能力极强, 在大气环境监测、激光测距、激光雷达、光电对抗、光通信等领域有

收稿日期: 2016-07-22; 收到修改稿日期: 2016-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(61505230)

作者简介: 谢小兵(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事非线性频率变换技术方面的研究。

E-mail: xiexiaobing2008@126.com

导师简介: 朱小磊(1966—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事固体激光器技术及激光器应用系统等方面的研究。

E-mail: xlzhu@siom.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: sgli@siom.ac.cn

十分广泛的应用前景^[4-6]。尤其在积分路径差分吸收(IPDA)探测 CO₂ 气体浓度的激光雷达领域,高能量纳秒脉冲 2.05 μm 激光源已成为研究热点^[7-8]。

目前,获得高能量纳秒脉冲 2.05 μm 激光输出的经典方法主要有两种^[9-10],一种是通过半导体激光(LD)直接抽运掺 Tm 与 Ho 离子激光晶体的调 Q 激光器获得;另一种是使用 1 μm 波段激光抽运非线性晶体 OPO 获得。前者由于掺 Tm 与 Ho 的激光晶体为准三能级介质,通常需要低温制冷运转,且受限于 2 μm 波段调 Q 技术,高重复频率工作时很难获得高转换效率的高能量激光脉冲输出;后者由于现有 1 μm 抽运源技术成熟,结构简单紧凑,可实现高能量、高转换效率、2 μm 波段可调谐输出,已受到越来越多的关注^[6,11-12]。

典型的 OPO 结构可分为内腔式、外腔式两种,内腔式 OPO 是将参量晶体放在调 Q 运转的抽运激光谐振腔内,这种复合腔结构易导致激光输出稳定性下降、光参量振荡晶体易光损伤。外腔式 OPO 结构抽运源与 OPO 腔相互独立,且结构简单,OPO 输出光谱、脉冲波形、光束质量易于控制,适合工程化。伴随着非线性晶体质量的提高及光参量振荡技术的发展,纳秒脉冲 2.05 μm 外腔式 OPO 已经得到广泛发展。2009 年,法国航空航天实验室的 Raybaut 等^[8]提出基于 MgO:PPLN 晶体的新型纠缠腔光参量振荡(ECOPO)腔的双谐振光参量振荡技术,输入抽运能量为 0.7 mJ,实现了重复频率为 30 Hz、脉宽约为 12 ns、单脉冲能量约为 10 μJ 的单纵模近衍射极限 2.05 μm 激光输出;2014 年,该研究小组又将谐振腔升级为复合腔光参量振荡(NesCOPO)腔,抽运输入 0.5 mJ 时获得 30 μJ 的 2.05 μm 激光脉冲输出^[13]。2013 年,西南技术物理研究所邓华荣等^[6]报道了 1.06 μm 激光双程抽运的掺氧化镁周期极化铌酸锂晶体(PPMgLN)晶体光参量振荡实验结果,在重复频率为 8 kHz 时获得 0.88 mJ 的 2.05 μm 激光输出,转换效率达到 41.3%。深入的研究表明,基于 PPLN 晶体的 OPO 虽然振荡阈值低,转换效率高,但受制于其生长工艺,商业化的 PPLN 晶体厚度最大仅为 3 mm,并且损伤阈值偏低,限制了其在高能量脉冲 OPO 中的应用。而 KTP 晶体抗损伤阈值高,有效非线性系数适当,设计 II 类相位匹配 KTP 晶体走离补偿放置的 OPO 结构,能够获得高转换效率、高能量 2.05 μm 波长信号光激光脉冲输出^[14]。2002 年,挪威国防研究院的 Arisholm 等^[15]采用重复频率为 20 Hz、脉宽为 25 ns 的 1.06 μm 调 Q 激光抽运内置 4 块 KTP 晶体的环形腔单谐振 OPO,在抽运脉冲能量为 10 mJ 时,获得了 2.5 mJ 的 2.06 μm 激光输出,抽运光-信号光转换效率约为 25%,光束质量因子 M^2 小于 1.4。2004 年,Arisholm 等^[16]报道了基于单块 KTP 晶体的脉宽为 6 ns 的 1.06 μm 激光双程抽运平-平腔单谐振 OPO,重复频率为 10 Hz 时得到 1.9 mJ 的 2.08 μm 激光输出,对应抽运光-信号光转换效率 24%, M^2 优于 3.4。

本文以 1064 nm 单频脉冲全固态 Nd:YAG 激光器作为抽运源,设计走离补偿 KTP-OPO 结构,研究了不同参量晶体长度、不同输出镜透射率条件下的转换效率变化规律。在重复频率为 400 Hz、抽运单脉冲能量约为 5 mJ 时,实验实现了最大单脉冲能量为 0.9 mJ 的 2.05 μm 信号光输出,脉宽约为 3.7 ns,对应抽运光-信号光转换效率为 18%,信号光 M^2 在水平、垂直方向分别为 2.08、3.03。

2 实验装置

实验设计的 1064 nm 单频激光抽运外腔式单谐振 KTP-OPO 装置如图 1 所示,图中 PBS 为偏振分束器。抽运源为自行研制的基于 RTP 电光晶体调谐腔长的种子注入单频 1064 nm 脉冲 Nd:YAG 全固态激光器^[17],当输出单脉冲能量为 5.3 mJ 时, M^2 优于 1.2,脉宽约为 12.7 ns,激光脉冲波形如图 2(a)所示。

KTP 晶体采用 XZ 面内 II 类相位匹配切割,切割角为: $\theta=52.7^\circ$, $\varphi=0^\circ$,设计匹配温度为 300 K。晶体 2 个通光端面镀抽运光、信号光和空闲光增透膜。为补偿走离效应,将 2 块等长的 KTP 晶体在腔内以走离补偿方式串联放置,并通过铝箔包裹压在热沉上实现传导散热。实验采用 2 组截面尺寸均为 5 mm×5 mm 的 KTP 晶体,其长度分别为 15 mm、20 mm。考虑到降低抽运阈值,OPO 的腔长分别为 54 mm、61 mm。OPO 振荡腔采用单谐振平-平腔结构,输入腔镜 M_1 对抽运光高透(HT),对信号光高反(HR),对空闲光透射率大于 50%,输出耦合镜 M_2 对抽运光高透。

使用焦距(f)为 400 mm 的平凸透镜将抽运光聚焦到 KTP 晶体中,用 CCD 测得聚焦后晶体中心处的抽运光斑直径为 659.6 μm,如图 2(b)所示。为了对 OPO 输出的信号光性能进行准确测试,输出光路中插入分色镜 M_3 、 M_4 ,以有效滤除剩余抽运光和空闲光。

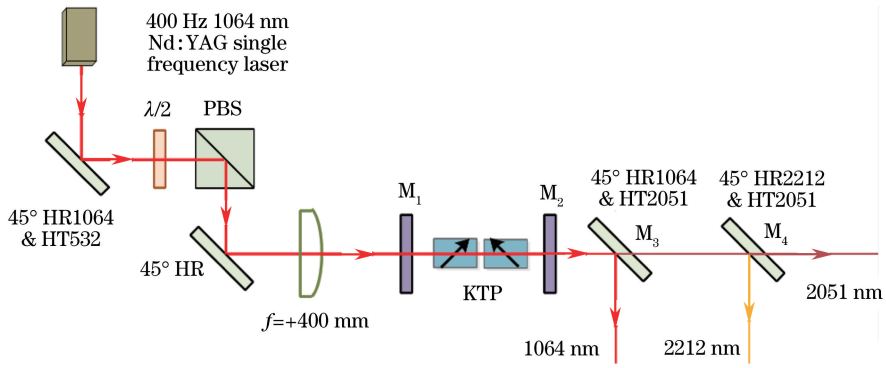


图 1 OPO 实验装置

Fig. 1 OPO experimental setup

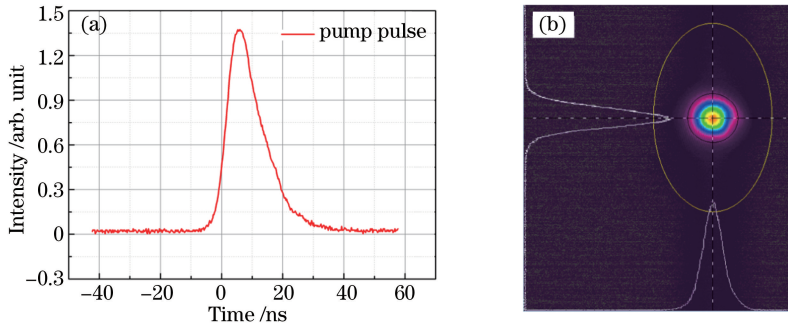


图 2 (a)输入抽运光脉冲波形;(b)晶体中心处抽运光斑

Fig. 2 (a) Input pump laser pulse profile; (b) pump laser spot in the crystal center

3 实验结果与分析

在图 1 所示的实验装置上,依次针对单块长度为 15 mm、20 mm 的 KTP 晶体对开展 OPO 振荡实验,比较了不同透射率条件下 OPO 输出 $2.05 \mu\text{m}$ 信号光脉冲能量和抽运光-信号光转换效率的变化规律。图 3 (a)、(b)分别为不同 KTP 晶体长度、不同透射率时 OPO 输出信号光脉冲能量、抽运光-信号光转换效率与输入抽运脉冲能量的关系曲线。OPO 输出信号光脉冲能量随着输入抽运光脉冲能量的增加而逐渐增大,抽运光-信号光转换效率也随着腔内注入抽运能量的增加而提高。对于单块长度为 15 mm 的 KTP-OPO,在输出镜透射率(T)为 22%时,OPO 振荡输出斜率效率最大,且在输入抽运脉冲能量为 5 mJ 时, $2.05 \mu\text{m}$ 信号光最高输出脉冲能量为 0.9 mJ,对应最大抽运光-信号光转换效率为 18%;而对于单块晶体长度为 20 mm 的 KTP-OPO,在输出镜透射率为 32%时,OPO 输出斜率效率也最大,且在输入抽运脉冲能量约为 5.1 mJ 时,

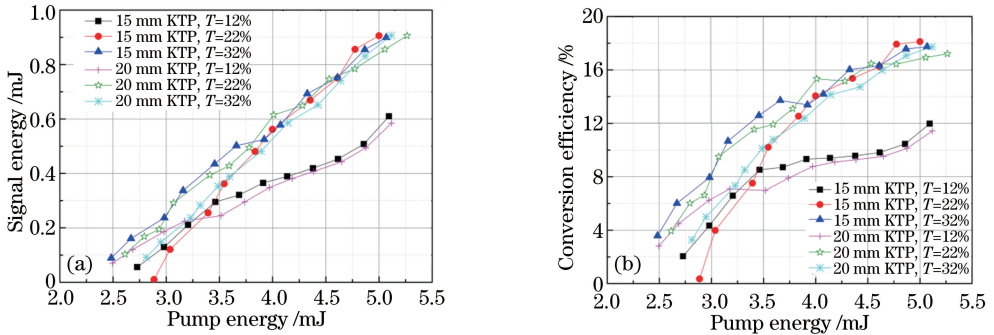


图 3 (a) OPO 输出信号光能量及(b) OPO 抽运光-信号光转换效率与输入抽运光能量关系曲线

Fig. 3 Relationship curves of (a) OPO output signal laser energy and (b) OPO pump-to-signal conversion efficiency versus input pump laser energy

信号光最高输出单脉冲能量为 0.9 mJ, 对应最大抽运光-信号光转换效率为 17.7%。此外, 当输出耦合镜透射率同为 12%、22% 时, 单块晶体 20 mm 长 KTP-OPO 的抽运阈值要比单块晶体 15 mm 长 KTP-OPO 的抽运阈值低, 可见, 增加增益长度有利于降低 OPO 振荡阈值。

实验中发现, 对于单块晶体 20 mm 长的 KTP-OPO, 输出镜透射率为 22% 时, 阈值抽运脉冲能量约为 2.3 mJ, 相应的阈值抽运功率密度为 108 MW/cm²。在最高输入约 2.3 倍阈值抽运脉冲能量, 即 5.3 mJ 时, 输出 2.05 μm 信号光脉冲能量为 0.91 mJ, 对应抽运光-信号光转换效率为 17.2%, 用 YokoGaWa AQ6375 (分辨率 0.05 nm) 光谱仪测得 OPO 输出信号光中心波长为 2051.3859 nm, 谱宽为 0.098 nm, 实验探测到的光谱图如图 4(a) 所示。采用 Newport 公司的 2 μm InGaAs 光电探测器 (818-BB-51F, 12.5 GHz) 测量信号光脉冲波形, 此时输出信号光脉冲与剩余抽运光脉冲波形如图 4(b) 所示, 与输入抽运光相比, 输出信号光脉宽下降到 3.7 ns 附近, 输出信号光波形有微弱的强度调制, 表明输出信号光不是单纵模的, 这与光谱仪测量结果相一致。

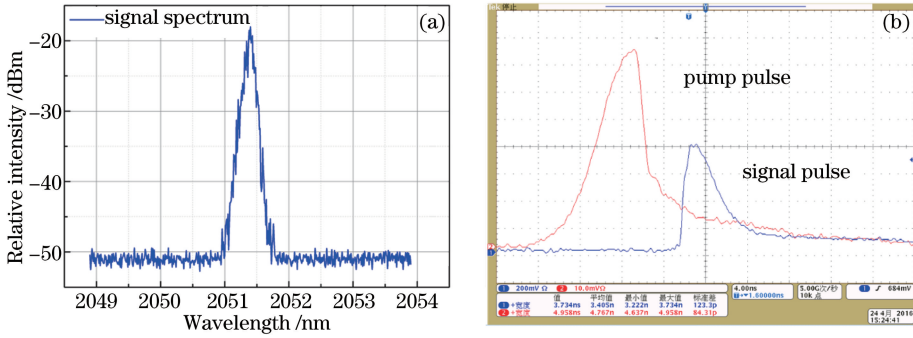


图 4 (a) 输出信号光光谱; (b) 输出信号光脉冲与剩余抽运光脉冲

Fig. 4 (a) Output signal laser spectrum; (b) output signal laser pulse and residual pump laser pulse

将输入抽运脉冲稳定在 5 mJ, 对 OPO 输出信号光脉冲能量稳定性进行了测量, 在 11 min 观测时间内, 能量稳定性的均方根值(RMS)约为 11%, 可见, 实验中 OPO 输出信号光脉冲能量表现出较大的抖动量。认为 OPO 输出能量起伏大的原因主要是在简并点附近 KTP-OPO 的增益带宽很大, 易导致输出信号光波长漂移, 造成输出脉冲能量抖动。

使用 Spiricon 公司的中红外 CCD(PV-IV-C-A) 测量激光光斑, 并用双曲线拟合法对 OPO 输出的 2.05 μm 信号光的光束质量进行了测量。让 OPO 输出信号光通过焦距为 400 mm 的聚焦镜, 测量聚焦后激光束腰前后不同位置处的光斑大小, 根据光束传输方程对光斑大小进行双曲线拟合, 得到信号光水平、垂直方向的 M^2 分别为 2.08、3.03, M^2 的测量结果和距离 OPO 输出镜 595 mm 处的近场光斑如图 5(a)、(b) 所示, 信号光近场光斑大小为 5.86 mm × 5.52 mm。输出光斑为椭圆形, 且垂直方向光斑发散角更大, 这是因为 KTP 晶体放置时其走离效应仅限于水平方向, 水平方向的走离效应限制了能够振荡的横向光束尺寸, 相当于水平方向的 OPO 接收角减小了, 因此输出信号光水平方向呈现较好的高斯分布, 发散角更小; 而垂直方向信号光斑呈现一定的衍射调制, 这是多横模振荡造成的, 相应的光束质量也较差。

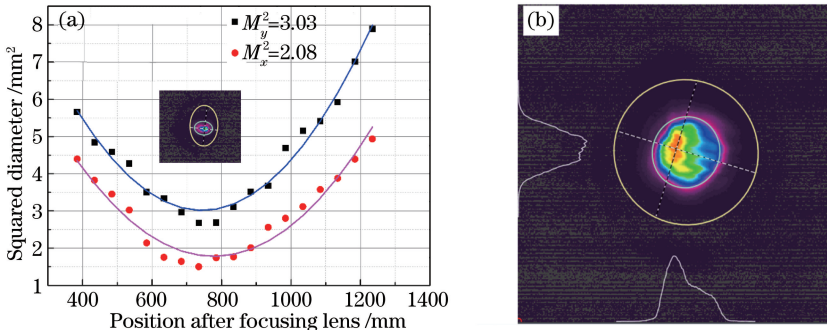


图 5 OPO 输出信号光 (a) 光束质量及 (b) 近场光斑

Fig. 5 (a) Beam quality and (b) near-field spot of OPO output signal laser

4 结 论

采用自行研制的 1064 nm 单频纳秒脉冲全固态 Nd:YAG 激光器作为抽运源,设计了一台单谐振平-平腔 KTP-OPO,并对 OPO 输出的 2.05 μm 信号光脉冲、光斑、转换效率等特性进行了详细分析。在重复频率为 400 Hz、抽运脉冲能量为 5 mJ 时,得到最大单脉冲能量为 0.9 mJ 的 2.05 μm 信号光输出,脉宽约为 3.7 ns,对应抽运光-信号光转换效率为 18%,信号光在水平、垂直方向的 M^2 分别为 2.08、3.03。该装置有望利用种子注入技术实现高能单频 2.05 μm 波长的 OPO 输出,可应用到采用 IPDA 技术测量大气 CO_2 浓度的激光雷达系统中。

参 考 文 献

- Li L, Zhang B, Yin K, *et al.* 1 mJ nanosecond all-fiber thulium-doped fiber laser at 2.05 μm [J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18098-18105.
- Zhu Yachen, Lan Ge, Li Tong, *et al.* 2 μm KTiOAsO₄ optical parametric oscillator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(11): 2059-2063.
朱雅琛, 兰 戈, 李 彤, 等. 脉冲式 2 μm TiOAsO₄ 光参变振荡器[J]. *光学学报*, 2007, 27(11): 2059-2063.
- Wang Li, Yang Jingwei, Cai Xuwu, *et al.* 2.09 μm nanosecond holmium laser pumped ZnGeP₂ optical parametric oscillator[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0102008.
王 礼, 杨经纬, 蔡旭武, 等. 2.09 μm 纳秒钬激光抽运的磷锗锌光参量振荡器[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0102008.
- Xie Gang, Peng Yuefeng, Lu Yanhua, *et al.* High efficiency 23.6 W 2 μm laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(11): 1488-1491.
谢 刚, 彭跃峰, 鲁燕华, 等. 23.6 W 高效率 2 μm 激光器[J]. *中国激光*, 2007, 34(11): 1488-1491.
- Peng Yuefeng, Xie Gang, Wang Weimin, *et al.* Intracavity optical parametric oscillator high-repetition-rate 2 μm laser with 46 W output power[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(1): 33-36.
彭跃峰, 谢 刚, 王卫民, 等. 46 W 腔内光参量振荡器高重复频率 2 μm 激光器[J]. *中国激光*, 2009, 36(1): 33-36.
- Deng Huarong, Zhang Long, Xie Yuzhou, *et al.* Low threshold 2 μm laser based on optical parametric oscillator using PPMgLN[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0702014.
邓华荣, 张 龙, 谢宇宙, 等. PPMgLN 用于光参量振荡实现低阈值 2 μm 激光[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0702014.
- Koch G J, Beyon J Y, Gibert F, *et al.* Side-line tunable laser transmitter for differential absorption lidar measurements of CO_2 : Design and application to atmospheric measurements[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(7): 944-956.
- Raybaut M, Schmid T, Godard A, *et al.* High-energy single-longitudinal mode nearly diffraction-limited optical parametric source with 3 MHz frequency stability for CO_2 DIAL[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(13): 2069-2071.
- Wu C T, Ju Y L, Chen F, *et al.* Research on 2 μm solid-state lasers[J]. *Laser Physics*, 2012, 22(4): 635-647.
- Wu Yue, Zhai Gang, Yao Zhihai. The development of 2 μm wave band laser[J]. *Laser Journal*, 2008, 29(4): 1-2.
吴 月, 翟 刚, 姚治海. 2 μm 波段激光器的发展状况[J]. *激光杂志*, 2008, 29(4): 1-2.
- Meng Dongdong, Tang Gangfeng, Shen Zhaoguo, *et al.* 2.12 μm laser pumped by Zig-Zag slab[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(5): 991-995.
孟冬冬, 唐刚锋, 沈兆国, 等. Zig-Zag 板条泵浦的 2.12 μm 激光器[J]. *应用光学*, 2012, 33(5): 991-995.
- Wang Zijian, Jin Guangyong, Yu Yongji, *et al.* 2.1 μm optical parametric oscillator based on high-repetition Q-switch Nd:YVO₄ laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2638-2642.
王子健, 金光勇, 于永吉, 等. 高重复声光调 Q Nd:YVO₄ 激光器 2.1 μm 光参量振荡器[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(9): 2638-2642.
- Barrientos B J, Mammez D, Cadiou E, *et al.* Multispecies high-energy emitter for CO_2 , CH_4 , and H_2O monitoring in the 2 μm range[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(23): 6719-6722.
- Walter Koehler. Solid-state laser engineering[M]. Rev 6th ed. New York: Springer, 2010: 649-651.
- Arisholm G, Lippert E, Rustad G, *et al.* Efficient conversion from 1 to 2 μm by a KTP-based ring optical parametric oscillator[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(15): 1336-1338.
- Arisholm G, Nordseth O, Rustad G. Optical parametric master oscillator and power amplifier for efficient conversion of high-energy pulses with high beam quality[J]. *Optics Express*, 2004, 12(18): 4189-4197.
- Zhang J X, Zhu X L, Ma X H, *et al.* Stable seeder-injected Nd:YAG pulsed laser using a RbTiOPO₄ phase modulator[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(11): 111404.