

文章编号: 1007-6654(2015)01-0093-06^①

520 nm 泵浦 780 nm+1560 nm 双共振光学参量振荡器

郭善龙, 葛玉隆, 张孔, 何军, 王军民[†]

(量子光学与光量子器件国家重点实验室(山西大学), 山西大学光电研究所, 山西 太原 030006)

摘要: 我们在实验中演示了 520 nm 单频绿光泵浦的基于周期极化磷酸钛氧钾 (PPKTP) 晶体的 780 nm+1560 nm 双共振光参量振荡器, 高效制备 780 nm+1560 nm 连续可调谐双色下转换光场。该参量振荡器可输出 93.3 mW 的 1560 nm 单频激光和 44.6 mW 的 780 nm 单频激光。通过改变 PPKTP 晶体的温度所得到的波长粗调范围为: 信号光 1529.81 nm ~ 1573.83 nm (~44 nm), 闲置光 788.26 nm ~ 777.20 nm (~11 nm); 通过连续调谐 520 nm 泵浦激光频率初步得到的闲置光在 780.24 nm (铷原子 D₂ 线) 处频率连续调谐范围约 1.6 GHz。

关键词: 双共振光学参量振荡器; 铷原子 D₂ 线; PPKTP 晶体

中图分类号: O431; TN248

文献标识码: A

DOI: 10.3788/ASQO20152101.0093

0 引言

连续光参量振荡器(OPO)拥有较宽的波长调谐范围和窄的输出激光线宽优势,在量子光学^[1,2]和原子物理^[3]中有着广泛的应用。近年来,伴随单频固体激光器以及准位相匹配晶体技术的快速发展,单共振光参量振荡器(SROPO)已经可以产生几瓦的单频参量光输出。但是该类参量振荡器通常需要较高的泵浦输入功率(比如 10 W)。而在一些实际应用中,往往在一个较低的输出参量光功率下就可以满足要求(<100 mW),这样,拥有低的泵浦阈值功率和连续频率可调谐优势的双共振光参量振荡器(DROPO),成为具有实用价值的实验器件。

Smith 等人^[4]历史上首次报道 DROPO 实验。由于当时实验采用多模激光器作为泵浦光源,同时 OPO 的腔长无法主动稳定,因而 OPO 输出极

不稳定且很难实现调谐,并没有取得人们大量的关注。之后,得益于单频激光器、非线性晶体制备技术的快速发展,以及腔型的设计及锁腔技术的成熟,连续光 DROPO 重新引起了人们的注意。Nabors 等人^[5]报道了整块腔 OPO 的单频参量光生成,其阈值低至 12 mW,下转换激光功率为 8.15 mW。同样采用整块腔 OPO 的结构, Breitenbach 等人^[6]报道了 81% 转换效率的下转换光场输出,其阈值为 28 mW,在输入泵浦功率 4 倍于阈值的功率水平上,获得信号光和闲置光总和为 105 mW。山西大学光电研究所李永民小组^[7]采用 526.5 nm 全固态激光器做泵浦光源,在 390 mW 泵浦光源作用下,利用两镜腔 OPO 获得信号光与闲置光输出功率总和为 245 mW。除了在 DROPO 高效转换效率方面的工作之外,人

① 收稿日期: 2014-12-17; 修回日期: 2015-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(61475091; 11274213; 61205215; 61227902); 山西省太原市科技明星专项(12024707); 山西省回国留学人员科研经费资助项目(2012-015)

作者简介: 郭善龙(1984-),男,山西山阴人,在读博士研究生,主要从事激光技术和非线性光学方面的研究。

† 通信作者: E-mail: wwjjmm@sxu.edu.cn

们在其调谐特性上也做了大量工作。Henderson 等人^[8]演示了通过改变 OPO 的腔长和泵浦光的频率,实现了信号光和闲置光分别达 17 GHz 和 10 GHz 的频率范围的调谐。此外, Masaki 等人^[9]也通过改变 OPO 中晶体的温度,实现了输出激光从 0.788 μm 到 1.64 μm 的连续波长调谐。理想的情况下(腔内线性损耗为零),DROPO 转换效率可以达到 100%,而在实际情况下,OPO 腔的最大转换效率主要受限于腔自身的逃逸率 $\eta_{\text{逃逸}} = T_j / (T_j + A_j)$ 。其中 T_j 表示输出耦合镜的透射率, A_j 则表示泵浦光在腔内传播一周之后的线性损耗。逃逸率表示了该 DROPO 腔最大的转化效率,逃逸率越大,对应于 OPO 的转换效率也就越高。为了提高转换效率,OPO 腔通常需要一个较高的逃逸率,也就是说, A_j 应当远小于 T_j 。整体腔和半整体腔 OPO 就是为了实现这一目的而设计。加工这种结构的腔的技术挑战在于其需要接近理想的光学端面和精确的通光端面曲率半径设计,同时由于其高度的集成性,限制了灵活改变各个耦合腔镜的反射率,对整个产品生产费用和实验操作的便利性带来较大考验。一个可以参考的方案是线性的分离腔结构(两面腔镜和一块晶体组成)。通过对各个器件精致的加工,这种腔结构也可以达到较高的逃逸率。主要可用的技术手段包括两方面,首先采用拥有精细加工工艺水准的超镜作为腔镜的基片,其次采用高质量的光学镀膜,以减少腔镜和晶体端面通光面上各个表面的残余反射和吸收。

我们的实验工作的主要目的是要进一步研究高效生成 780 nm 铷原子 D_2 跃迁线和光纤通讯低损耗窗口的 1560 nm 可连续频率调谐的 DROPO。实验中利用了当前光纤通讯波段发展成熟的掺铒光纤放大器(EDFA)作为种子光放大光源,分别经非线性倍频,和频得到 520 nm 连续绿光。以该绿光光源作为 OPO 的泵浦源,结合新型高效准位相匹配周期极化磷酸钛氧钾

(PPKTP)晶体,得到满足进一步实验需求的下转换光场。实验中该 OPO 的阈值约为 50 mW,在 242 mW 绿光泵浦条件下,输出 93.3 mW 的 1560 nm 单频激光和 44.6 mW 的 780 nm 单频激光。此外,实验中还对 OPO 输出的信号光和闲置光的波长调谐特性做了研究,并扫描出了对应于⁸⁷Rb 原子 D_2 线(780.24 nm)的饱和吸收光谱。

1 实验装置和结果

图 1 为 DROPO 实验产生装置示意图。泵浦光源是经由单共振和频得到的 520.1 nm 激光。非线性和频过程的基频光源是由 1560 nm 激光和其倍频光 780 nm 激光^[10],经 PPKTP 晶体和频得到(其中 780 nm 激光在和频腔内谐振加强)。倍频 780 nm 激光采用四镜环形腔谐振倍频获得,该方案相对于单次穿过倍频而言,增加了基频光在谐振腔内的功率密度,因而拥有更高的非线性转换效率^[11-14]。实验系统中和频腔由两面凹面镜(曲率半径 $r=100$ mm)和一面平面镜组成。通过倾斜输入耦合镜 M3 的角度,我们可以实现输入镜对入射光反射率的连续调谐,以满足在不同入射基频光功率水平下和频腔的阻抗匹配。在我们的实验条件下,测试到对应于最佳输入耦合镜的反射率为 93%。通过优化 PPKTP 和频晶体的匹配温度,得到其最佳相位匹配温度为 65.8 $^{\circ}\text{C}$ 。该温度下,我们可以得到 520 nm 绿光的最大输出功率约 268 mW。得到的绿光激光经过模式匹配透镜进行模式匹配后注入 OPO 腔内。OPO 是由两面曲率半径为 30 mm 的凹面镜和一块 PPKTP 晶体组成,腔位于晶体中心的腰斑为 50 μm 。其输入耦合镜对 1.5 μm 和 0.78 μm 这两个波段同时高反($R>99.8\%$),并且对 520 nm 泵浦光高透($T>96\%$);输出耦合镜对 520 nm 波段高反,对 1.5 μm 和 0.78 μm 这两个波段均保持部分透射率($T \sim 5.5\%$)。

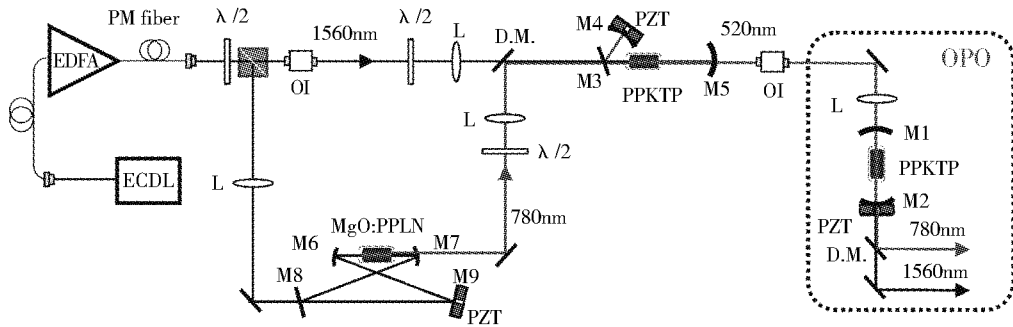


Fig. 1 Schematic of OPO experimental setup ECDL; external cavity diode laser; EDFA; Er-doped fiber amplifier; PM; polarization-maintaining fibers; OI; optical isolator; PZT; piezoelectric ceramics; DM; dichroic mirror

图1 OPO实验系统示意图。ECDL:外腔反馈式半导体激光器;EDFA:掺铒光纤放大器;PM fiber:保偏光纤;OI:法拉第光隔离器;PZT:压电陶瓷;D.M.:双色镜

OPO 实验中采用的 PPKTP 晶体尺寸为 $1 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 其极化周期 $\Lambda = 9.1 \mu\text{m}$ (Raicol Crystals)。PPKTP 晶体拥有较高的非线性转化系数 ($d_{\text{eff}} \sim 10 \text{ pm/V}$), 较宽的温度带宽, 而且可以在室温下操作, 是适于 OPO 实验的优良非线性晶体。为了降低 OPO 的内腔线性损耗, PPKTP 晶体的两个通光端面都镀有 520 nm , 780 nm 和 1560 nm 的三色减反膜。晶体放置于自制的紫铜控温炉中, 并采用聚砜材料作为控温炉外层的保温罩, 晶体控温炉的精度可达 $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$ 。OPO 腔后放置一面双色分束镜, 用于将 $1.5 \mu\text{m}$ 和 $0.78 \mu\text{m}$ 下转换光场分开。

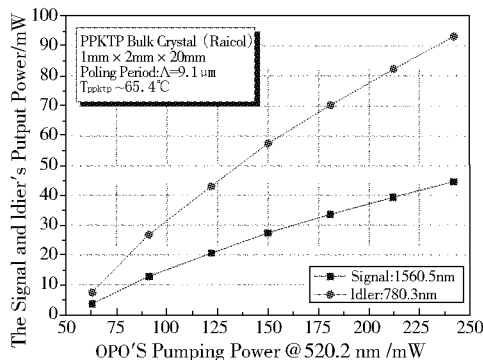


Fig. 2 The output power of the signal (solid squares) and idler (solid circles) versus pump laser power

图2 信号光和闲置光输出功率随泵浦光输入功率的变化关系。

实验中锁定 OPO 腔长, 同时控制晶体的温度恒定, 即可实现稳定的 $1.5 \mu\text{m}$ 和 $0.78 \mu\text{m}$ 的连续下转换光场输出。图 2 表示了闲置光波长为 780.3 nm 时所测量到的信号光和闲置光各自输出功率随泵浦光输入功率的变化。实验中 OPO 的阈值为 50 mW 。在晶体温度为 $65.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 下, 输入泵浦光功率 242 mW , 最高可以得到 44.6 mW 的 780.3 nm 闲置光和 93.3 mW 的 1560.5 nm 信号光, 对应非线性转换效率可达 57% 。在整个泵浦光输入功率范围内并没有看到 OPO 出现多模运转的现象。

由于 OPO 过程的发生需要同时满足能量守恒和动量守恒两个条件, 对每一个确定的晶体温度下, 满足能量守恒的下转换光子对均可在 OPO 腔内优先起振。这样, 实验中我们通过调谐 OPO 腔内 PPKTP 晶体的温度就可以实现其不同的下转换波长组合的输出, 从而实现 OPO 的波长的粗调谐。图 3 中红色圆点和黑色方块表示了 OPO 的波长调谐特性。在锁定 OPO 腔长下, 我们以 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 为步长, 在 $26.5 \sim 80.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度范围内改变 PPKTP 晶体的温度。采用激光波长计 (Advantest TQ8325) 分别测量了 OPO 输出的下转换光的波长粗调范围: 信号光 $1529.81 \text{ nm} \sim 1573.83 \text{ nm}$ ($\sim 44 \text{ nm}$), 闲置光 $788.26 \text{ nm} \sim 777.20 \text{ nm}$ ($\sim 11 \text{ nm}$)。图 3 中实线为理论曲线。理论曲线可以通过 KTP 晶体的色散方程和

准位相匹配条件获得，

$$\Delta k = k_p - k_s - k_i - \frac{2\pi}{\Lambda} = 0. \quad (1)$$

其中 Λ 是用于 OPO 的 PPKTP 晶体的极化周期， k_p, k_s, k_i 分别为泵浦光，信号光和闲置光的波矢量。

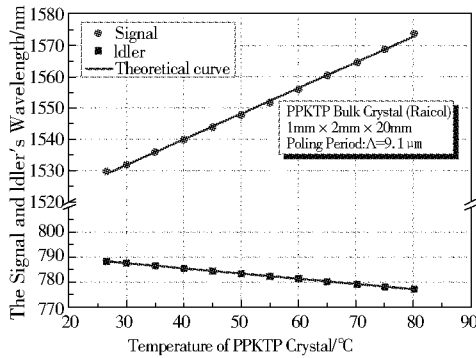


Fig. 3 The wavelength tuning characteristic of signal and idler with different crystal temperatures

图 3 信号光和闲置光在不同晶体温度下的波长调谐特性

虽然实验中通过改变晶体的工作温度和 OPO 的腔长，可以实现输出下转换光场的粗调谐，而在许多实际应用领域中，比如像高精密光谱，精细频率调谐有着更加广泛的应用。通常很难直接通过改变温度或者 OPO 的腔长实现输出光频率精细的调谐和稳定输出功率的下转换光场，而泵浦激光频率的连续调谐为达到上述光频率精细调谐提供了另一种途径。图 4 表示了 520 nm 泵浦光在一个自由光谱区为 750 MHz 的共焦 F-P 干涉仪监视下的扫频结果。组成该干涉仪两面腔镜均对 520 nm 激光高反 ($R > 99.8\%$)，两凹面镜曲率半径均为 100 mm。实验中通过调谐种子激光器 (ECDL) 的压电陶瓷，以达到周期性调制种子激光输出频率的目的，并最终实现了注入 OPO 520 nm 泵浦光的频率调谐。从图 4 中可以看到，通过作用于 ECDL 压电陶瓷三角波的调制，可以实现对 OPO 泵浦光至少 1.8 GHz 的连续频率调制。其调谐范围的进一步提高受限于实验系统中倍频腔以及和频腔各自 PZT 伸长量最大可承受电压的限制。

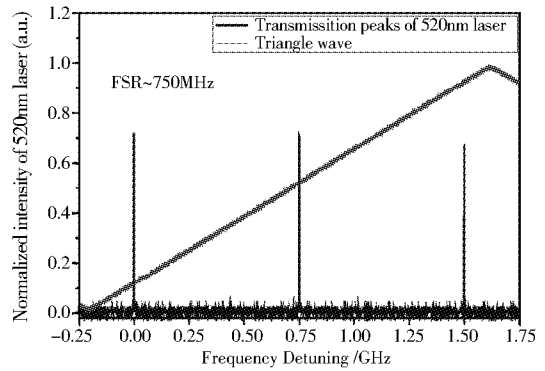


Fig. 4 Continuous frequency tuning result of 520 nm pump laser monitored by F-P confocal cavity

图 4 共焦 F-P 腔监视的 520 nm 泵浦光连续频率调谐结果。在锁定倍频腔以及和频腔的前提下，通过调谐 ECDL 的频率，得到 520 nm 激光的调谐结果。该共焦 F-P 腔的自由光谱区为 750 MHz。

将 520 nm 泵浦光注入至 OPO 腔，控制其 PPKTP 晶体温度至 65.4 °C (此时对应于闲置光波长 ~ 780.24 nm)，同时锁定 OPO 腔长。调谐种子激光器 ECDL 的压电陶瓷电压，此时可以得到对应于 ^{87}Rb 原子 $5S_{1/2} (F_g=2) - 5P_{3/2} (F_e=1, 2, 3)$ 超精细跃迁的饱和吸收光谱 (SAS)，如图 5 所示。从实验结果可以看到，通过调节 OPO 输入泵浦光源频率，可以得到 780.24 nm 闲置光连续频率调谐范围大于 1.6 GHz。

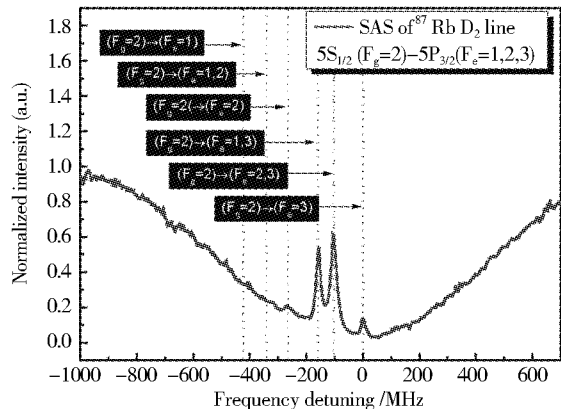


Fig. 5 The D_2 Line saturated absorption spectra of ^{87}Rb atoms scanned of OPO down-conversion output idler laser

图 5 OPO 下转换输出闲置光场频率调谐得到的 ^{87}Rb 原子 D_2 线饱和吸收谱

此外,实际应用中 OPO 输出光场的功率稳定性也是一项重要的指标。在 OPO 泵浦光输入功率 240 mW 下,我们采用光电探测器(PED 801—LN)监视其 780 nm 闲置光场典型的功率起伏特性。实验结果如图 6 所示,在 ~ 30 min 监察时间范围内,残余功率起伏 $\sim 2.6\%$ (RMS)。该功率起伏主要来源于注入 OPO 泵浦光功率的起伏以及 PPKTP 晶体温度小范围的起伏。

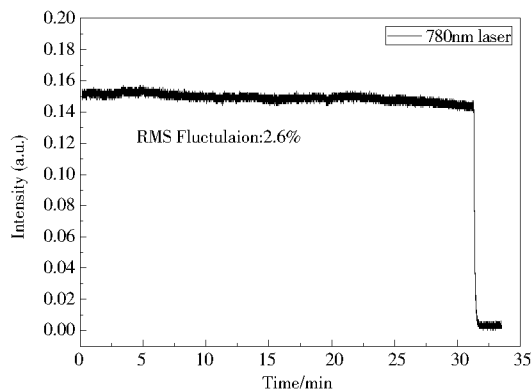


Fig. 6 The measured typical power fluctuation result of OPO'S idler

图 6 OPO 输出闲置光场典型功率起伏测量结果

2 结论和展望

我们在实验上演示了基于 PPKTP 晶体的高效率、连续频率可调谐的 DROPO 系统。该系统拥有的阈值功率为 50 mW。以 520 nm 和频连续激光作为 OPO 系统的泵浦光源,得到 93.3 mW 的 1560 nm 激光和 44.6 mW 的 780 nm 激光。30 分钟监视时间内,780nm 下转换光场的残余功率起伏 $\sim 2.6\%$ (RMS)。实验中得到的双色 OPO 系统分别对应于铷原子 D_2 超精细跃迁线(780.24 nm)和光纤传输低损耗波段(1560 nm)。以铷原子介质作为光信息存储介质,并以光纤传输作为量子信息通道,可以实现量子信息的长程传输,是量子信息处理可选的有效方案之一。后续实验中将进一步测量并增强该对孪生光束的量子纠缠特性,而通常采用平衡零拍探测方案对下转换光场的强度噪声和位相噪声进行测量时,需要提供与之相应的待测光(780 nm 和 1560 nm)的本地振荡光^[15]。本实验中用于和频光源制备的 780 nm+1560 nm 两束基频光源,可以同时兼顾下转换光场纠缠测量所需的本地振荡光的需求。

参考文献:

- [1] Li Y M, Guo X M, Bai Z L, *et al.* Generation of Two-color Continuous Variable Quantum Entanglement at 0.8 and 1.5 μm [J]. *Appl Phys Lett*, 2010, **97** (3): 030017.
- [2] Li Y M, Guo X M, Wang X Y, *et al.* Observation of two-color Continuous Variable Quantum Correlation at 0.8 and 1.5 μm [J]. *J Opt Soc Am B*, 2010, **27** (4): 842-843.
- [3] Tanimura T, Akamatsu D, Yokoi Y. Generation of a Squeezed Vacuum Resonant on a Rubidium D_1 Line with Periodically Poled KTiOPO_4 [J]. *Opt Lett*, 2006, **31** (15): 2344-2346.
- [4] Smith R G, Geusic J E, Levinstein H J, *et al.* Continuous Optical Parametric Oscillation in $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ [J]. *Appl Phys Lett*, 1968, **12** (9): 308-310.
- [5] Nabors C D, Eckardt R C, Kozlovsky W J, *et al.* Efficient, Single-axial-mode Operation of a Monolithic $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ Optical Parametric Oscillator [J]. *Opt Lett*, 1989, **14**(20): 1134-1136.
- [6] Breitenbach G, Schiller S, Mlynek J. 81% Conversion Efficiency in Frequency-stable Continuous-wave Parametric Oscillation [J]. *J Opt Soc Am B*, 1995, **12**(11): 2095-2101.
- [7] Liu C C, Guo X M, Bai Z L, *et al.* High-efficiency Continuously Tunable Single-frequency Doubly Resonant Optical Parametric Oscillator [J]. *Appl Opt*, 2011, **50** (10): 1477-1481.
- [8] Henderson A J, Roper P M, Borschowa L A, *et al.* Stable, Continuously Tunable Operation of a Diode-pumped Doubly Resonant Optical Parametric Oscillator [J]. *Opt Lett*, 2000, **25**(17): 1264-1266.
- [9] Tsunekane M, Taguchi N, Inaba H. Continuous-wave, Broadband Tuning from 788 to 1640 nm by a Doubly Resonant,

- MgO:LiNbO₃ Optical Parametric Oscillator [J]. *Appl Phys Lett*, 1998, **72**(26):3414-3416.
- [10] Ge Y L, Guo S L, Han Y S, *et al.* Realization of 1.5 W 780 nm Single-frequency Laser by Using Cavity-enhanced Frequency Doubling of an EDFA Boosted 1560 nm Diode Laser [J]. *Opt Commun*, 2015, **334**(1): 74-78.
- [11] 杨建锋, 杨保东, 高静, 等. 1 560 nm 连续光半导体激光器经 PPLN 倍频及经铷吸收光谱稳频 [J]. 量子光学学报, 2010, **16**(1):41- 47.
- [12] 郭善龙, 韩亚帅, 王杰, 等. 1 560 nm 激光经 PPLN 和 PPKTP 晶体准相位匹配倍频研究 [J]. 光学学报, 2012, **32**(3): 0319001.
- [13] Guo S L, Wang J M, Han Y S, *et al.* Frequency Doubling of cw 1 560 nm Laser with Single-pass, Double-pass and Cascaded MgO:PPLN Crystals and Frequency Locking to Rb D₂ line [J]. *Proc SPIE*, 2013, **8772**:87721B.
- [14] Guo S L, Ge Y L, Han Y S, *et al.* Investigation of Optical Inhomogeneity of MgO:PPLN Crystals for Frequency Doubling of 1 560 nm Laser [J]. *Opt Commun*, 2014, **326**(1):114-120.
- [15] Guo X M, Xie C D, Li Y M. Generation and Homodyne Detection of Continuous-variable Entangled Optical Beams with a Large Wavelength Difference [J]. *Phys Rev A*, 2011, **84**(2):020301.

Doubly-resonant 780 nm+1 560 nm Optical Parametric Oscillator Pumped by 520 nm Laser

GUO Shan-long, GE Yu-long, ZHANG Kong, HE Jun, WANG Jun-min

(*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices*

(*Shanxi University*) and *Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

Abstract: We experimentally demonstrated a high-efficiency doubly-resonant optical parametric oscillator (DROPO) of 780 nm+1 560 nm continuously tunable two-color down-conversion optical fields pumped by 520 nm single-frequency green laser based on the periodically-poled KTiOPO₄ (PPKTP) crystal. This DROPO can provide 93.3 mW at 1560 nm and 44.6 mW at 780 nm single-frequency lasers. Coarse wavelength tuning are 1 529.81 nm~1 573.83 nm (~44 nm) for signal and 788.26 nm~777.20 nm (~11 nm) for idler via changing the PPKTP crystal's temperature; the preliminary continuous frequency tuning range is ~1.6 GHz around 780.24 nm via continuously tuning 520 nm pump laser's frequency.

Key words: doubly-resonant optical parametric oscillator (DROPO); rubidium D₂ line; PPKTP crystal