文章编号: 1007-6654(2015)01-0093-06⁽²⁰⁾

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+1 560 nm 双共振光参量振荡器,高效制备 780 nm+1 560 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 1 560 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 1 529.81 nm ~ 1 573.83 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 D_2 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 **DO**

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 **DOI:** 10. 3788/ASQO20152101.0093

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 化光场输出,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

20 收稿日期: 2014-12-17;修回日期: 2015-01-15

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

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)

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;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_i 应当远小于 T_i 。 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 D₂ 跃迁线和光纤通讯 低损 耗窗口的 1 560 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 1 560 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⁸⁷ Rb 原子 D₂ 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 1 560 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 ℃。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-m aintaining fibers; OI: optical isolator; PZT: piezoelectric creamics; DM: dichromic 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 mm×2 mm×20 mm,其极化周期 Λ =9.1 μ m (Raicol Crystals)。PPKTP 晶体拥有较高的非线 性转化系数(d_{eff} ~ 10 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 1 560 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 ℃。OPO 腔后放置一面双色分束镜,用于将 1.5 μ m 和 0.78 μ m 下转换光场分开。



Fig. 2 The output power of the signal (solid squares) and idler (solid circles) Lasers 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 μm 和 0.78 μm 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 °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 1 560.5 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 °C 为步长,在 26.5 ~ 80.2 °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 1 529.81 nm ~ 1 573.83 nm (~ 44 nm),闲置光 788.26 nm ~ 777.20 nm (~ 11 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,

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

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。



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。





图 5 OPO下转换输出闲置光场频率调谐得到的 ⁸⁷ Rb原子 D₂ 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 ~ 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

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 1 560 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 D₂ 超精细跃迁线 (780.24 nm) 和光纤传输低损耗波段(1 560 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+1 560 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:

- 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 D₁ Line with Periodically Poled KTiOPO₄[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 Ba₂ NaNb₅ O₁₅ [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 MgO: LiNbO₃ 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,

图 6 OPO 输出闲置光场典型功率起伏测量结 果

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.1560 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.1560 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