

用于 795 nm 压缩光源的单频激光系统的优化设计

李志秀 杨文海 王雅君* 郑耀辉

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

摘要 采用自制的 795 nm 连续单频可调谐钛宝石激光器抽运周期极化磷酸氧钛钾(PPKTP)晶体,通过外腔谐振倍频技术获得了功率为 103 mW,倍频转换效率为 39.6%、光束质量因子 $M^2 < 1.43$ 的 397.5 nm 紫光输出;与角度匹配的三硼酸铋(BIBO)晶体内腔倍频情况相比,紫光与光学参量放大器(OPA)的模式匹配效率由 76% 提高到了 99% 以上。同时,在平衡零拍探测系统中,通过在本底光光路中插入与 OPA 腔型相同的模式清洁剂,使得本底光与信号光的空间模式完全相同,从而将两束光的干涉效率提高到了 99% 以上,提高了平衡零拍系统的探测效率。通过对自制的 795 nm 和 397.5 nm 单频激光系统的优化设计,使该光源满足了小型化 795 nm 连续变量压缩源样机研制的要求。

关键词 激光光学;单频激光;外腔倍频;模式清洁剂;模式匹配;干涉效率

中图分类号 TN241 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0902002

Optimal Design of Single-Frequency Laser System for 795 nm Squeezed Light Source

Li Zhixiu Yang Wenhai Wang Yajun Zheng Yaohui

State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract By using an extra-cavity-enhanced frequency doubler with a periodically poled KTiOPO₄ (PPKTP) crystal, which is pumped by a home-made continuous-wave single-frequency tunable Ti: sapphire laser at 795 nm wavelength, the 397.5 nm violet laser is obtained experimentally with the output power of 103 mW, conversion efficiency of 39.6%, and the beam quality factor $M^2 < 1.43$. Compared with the intracavity enhanced frequency doubling with the angle matched Bismuth Triborate (BIBO) crystal, the mode matching efficiency of the 397.5 nm lasing to the optical parametric amplifier (OPA) cavity is increased from 76% up to 99%. Meanwhile, in the balanced homodyne detection system, a mode cleaner with the same cavity parameters as OPA, is inserted into the local oscillator to make sure the local oscillator and the signal fields have the identical spatial modes. As a result, the interference efficiency of the two input fields is more than 99%, and the efficiency of the balanced homodyne detection system is improved. By optimizing the design of the 795 nm and 397.5 nm laser system, the laser source can meet the requirement of studying the compact continuous-variable squeezed light source at 795 nm.

Key words laser optics; single frequency laser; extra-cavity enhanced frequency doubling; mode cleaner; mode matching; interference efficiency

OCIS codes 140.3515; 190.4970; 140.3460

收稿日期: 2015-01-26; 收到修改稿日期: 2015-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(61227015)、山西省基础研究项目(2015021022)

作者简介: 李志秀(1989—),女,硕士研究生,主要从事光量子器件与全固态激光技术方面的研究。

E-mail: lizhixiu1083@163.com

导师简介: 郑耀辉(1979—),男,博士,教授,主要从事光量子器件与全固态激光技术方面的研究。

E-mail: yhzheng@sxu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: wangyajun_166@163.com

1 引 言

压缩态光场是一种重要的非经典光场,由于其量子噪声突破了标准散粒噪声极限,被广泛应用于引力波的探测^[1]、光学精密测量^[2-3]、纠缠态光场的产生^[4]、非经典光谱学^[5]、量子非破坏测量^[6]、量子信息科学^[3]等诸多研究领域。尤其在量子信息科学方面,量子纠缠交换^[7]、量子离物传态^[8]、量子密集编码^[9]、量子保密通信^[10]等是当今国际科学技术界十分关注的前沿研究课题。其中,制备与原子吸收线相对应的压缩态光场,并将光场的量子态存储在原子系综中,是实现量子信息网络的关键^[11-13]。⁸⁷Rb原子具有 Λ 型能级结构,是一种理想的量子信息存储介质,其 D_1 吸收线波长处于795 nm附近,因此,制备与⁸⁷Rb原子 D_1 吸收线相匹配的795 nm压缩态光场是一项重要的研究课题。目前795 nm压缩态光场的制备均是在实验系统中完成的^[14-16]。近年来,为了满足实用化的应用需求,本课题组开展了小型化、集成化的795 nm压缩源样机研制工作,而压缩源的研制首先需要获得优质的单频激光光源^[17]:1) 397.5 nm倍频光作为光学参量放大器(OPA)的抽运光,需具有较好的光束质量,以获得与OPA腔的高效率模式匹配,降低参量下转换的阈值功率,有利于高压缩度光场的产生;2) 795 nm基频光作为平衡零拍探测时的本底光,需与信号光具有完全相同的空间横模参数(相同的腰斑与发散角),以获得接近100%的干涉效率,有利于对压缩态光场进行高效率探测。

目前,商用的连续波输出可调谐钛宝石激光器已经相当成熟,有多种型号的激光器可供选择^[18-20]。为了满足自主研制的小型化795 nm压缩源样机的应用需求,自制了一台高功率、窄线宽、低噪声的连续单频可调谐钛宝石激光器作为激光源^[21-23],输出795 nm红外光功率为1.27 W、连续频率调谐范围为48 GHz。为了尽量简化795 nm压缩源样机的结构,采用激光器内腔倍频的方法获得紫光。在激光器腔内插入准相位匹配的周期极化磷酸氧钛钾(PPKTP)晶体作为倍频晶体,短时间内获得了高光束质量的紫光输出,但是由于腔内功率密度高,引起了晶体中光致折射率变化和灰迹现象^[24]的出现,导致光斑沿着晶体 z 轴方向产生像散,使得输出激光光斑逐渐趋于椭圆,同时在中心光斑上下产生衍射条纹,光束质量逐渐变差,光-光转换效率和输出功率下降,无法获得长期稳定运转的397.5 nm紫光输出。换用角度匹配的三硼酸铋(BIBO)或三硼酸锂(LBO)倍频晶体,获得了稳定运转的功率约90 mW的紫光输出。但是由于角度匹配的BIBO(或LBO)晶体在紫光波段存在严重的光束走离效应,使得输出紫光的光束质量较差,与OPA腔的模式匹配效率仅为76%,无法满足与OPA腔模式匹配的要求。

基于以上原因,本文利用周期极化PPKTP晶体作为倍频晶体,通过采用外腔谐振倍频技术^[25-28]对自制的钛宝石激光器输出的795 nm红外光进行外腔倍频,获得了光束质量因子 $M^2 < 1.43$ 、功率为103 mW的397.5 nm紫光输出,紫光与OPA腔的模式匹配效率由76%提高到了99%以上。同时,为了提高平衡零拍探测中本底光与信号光的干涉效率,通过在本底光光路中插入与OPA腔型相同的模式清洁剂,使输出的本底光与信号光空间横模参数完全相同,从而将两束光的干涉效率由93%提高到了99%以上。最终,通过对795 nm红外光和397.5 nm紫光光源的优化设计,该单频激光系统满足了795 nm小型化连续变量压缩源样机的设计要求。

2 理论分析

非线性光学参量过程是获得压缩态光场的有效方法,平衡零拍技术是对光场压缩度进行探测的重要手段。根据光学参量振荡腔量子噪声的理论分析,压缩正交分量量子噪声的理论表达式可以表示为^[29]

$$V_{ar}(\Omega) = 1 - \eta_{esc} \eta_{det} \eta_{hom} \frac{4\sqrt{P/P_{thr}}}{(\Omega/\gamma)^2 + (1 + \sqrt{P/P_{thr}})^2}, \quad (1)$$

式中 η_{esc} 是光学参量腔的逃逸效率, η_{det} 是光电二极管的探测效率, η_{hom} 是零拍效率, P 和 P_{thr} 分别是抽运功率和阈值功率, γ 是光学参量腔的衰减率, Ω 是归一化频率。其中, $\eta_{esc} = T/(T + L_{cav})$, $P_{thr} \propto (T + L_{cav})^2$, $\gamma \propto T + L_{cav}$, T 为输出耦合透射率, L_{cav} 为内腔损耗率。

由(1)式可知,阈值功率 P_{thr} 是影响压缩正交分量量子噪声的重要参数。阈值功率 P_{thr} 与输出耦合透射率和内腔损耗率之和的平方成正比,在输出耦合透射率一定的情况下,内腔损耗率越小,阈值功率越低。内腔损耗率 L_{cav} 除了与非线性晶体材料的特性和晶体表面的镀膜有关外,还与抽运光与光学参量腔的模式匹配效率有关,模式匹配效率越高,则内腔损耗率越小,阈值越低。如果抽运光与光学参量振荡腔的模式匹配效率

较低,在获得相同参量增益的情况下,需要更高功率的抽运光注入,这不仅对抽运光的功率提出更高的要求,而且高的抽运功率会引起非线性晶体中严重的热效应,使得抽运光与OPA腔的模式匹配效率进一步下降,非线性损耗增加;同时,低的模式匹配效率可能导致抽运光激发腔内的高阶横模振荡,从而影响压缩态光场的产生。因此,抽运光与光学参量振荡腔的模式匹配效率是影响高压压缩度光场产生的关键因素。

影响压缩正交分量量子噪声的另一个重要参数是零拍效率 η_{hom} ,在利用平衡零拍探测技术对光场压缩度进行探测时,本底光与信号光在50/50光学分束器(BS)上进行相干耦合,耦合的空间模式匹配程度用干涉可见度 V 来表征,其中 $V=(I_{\text{max}}-I_{\text{min}})/(I_{\text{max}}+I_{\text{min}})$ (I_{max} 和 I_{min} 分别为扫描信号光与本底光的相对位相时干涉光强极大值和极小值),零拍效率 $\eta_{\text{hom}}=V^2$ 。因此,为了对光场压缩度进行有效探测,需调节信号光与本底光的干涉度接近100%。

由以上分析可知,要获得高质量的压缩态光场并对其进行有效探测,需要尽量提高抽运光与OPA腔的模式匹配效率,以及平衡零拍探测中本底光与信号光的干涉效率。

3 实验装置与结果分析

3.1 实验装置

图1所示的用于795 nm压缩光源的单频激光系统,(a)为光路示意图,(b)为其实物图。单频激光系统主要包括激光器(Ti:Sapphire Laser)、倍频腔(SHG)和模式清洁器(MC);OPA腔用来验证倍频光与OPA腔的模式匹配效率,以及输出信号光(验证本底光与信号光的干涉效率)。在光学系统的设计中,所有的光学谐振腔均采用整块殷钢材料进行加工,且通过有机玻璃罩与外界隔离,采用聚矾套对晶体控温炉进行保温,并将所有光学元件集成于一整块铸铝底板上,以减少外界气流扰动等对腔体的影响,提高光学谐振腔的稳定性。

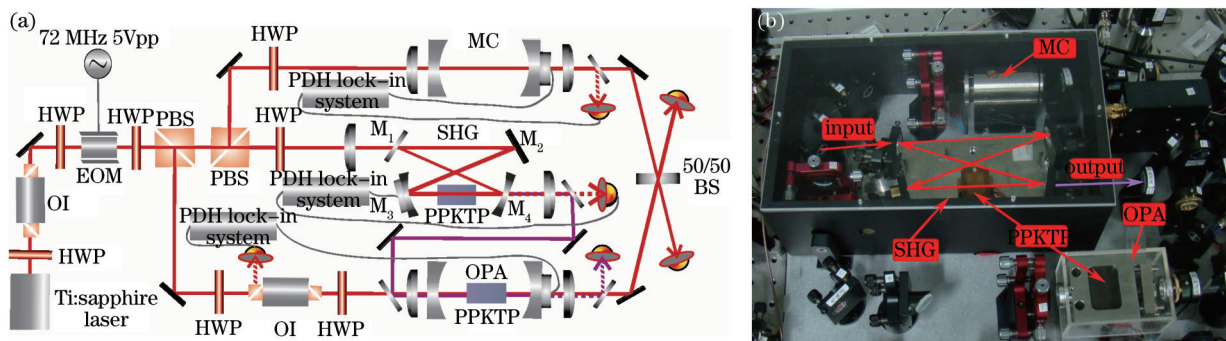


图1 用于795 nm压缩光源的单频激光系统。(a)光路简图;(b)实物图

Fig.1 Single-frequency laser system for 795 nm squeezed light source. (a) Light path diagram; (b) photograph

实验中,激光器采用自制的连续单频可调谐钛宝石激光器^[21],在12 W单频绿光激光器^[30]抽运的条件下,795 nm红外光输出功率为1.27 W,连续频率调谐范围为48 GHz。激光器输出的795 nm红外光分为三束,分别作为倍频腔的抽运光、OPA腔的种子光和平衡零拍探测的本底光。

倍频腔采用“8”字形环形谐振腔结构,如图1所示,由两面平面镜 M_1 (S_1 :表面1, S_2 :表面2, S_1 :AR795 nm; S_2 : $T_{795\text{ nm}}=15\%$, T :透射率)、 M_2 (S_1 : $R_{795\text{ nm}}>99\%$, R :反射率)和两面曲率半径为100 mm的平凹镜 M_3 (凹面 S_1 : $R_{795\text{ nm}}>99\%$)、 M_4 (凹面 S_1 : $T_{397.5\text{ nm}}>99\%$, $R_{795\text{ nm}}>99\%$;平面 S_2 :AR795/397.5 nm)构成。倍频腔的光学腔长为563 mm,其中两平凹镜间距离为128 mm,压电陶瓷固定在 M_3 上用来实现腔长的扫描与锁定。倍频晶体采用准相位匹配的PPKTP晶体,晶体的尺寸为1 mm×2 mm×10 mm,通光面镀膜为AR795/397.5 nm。PPKTP晶体用铝箔包裹置于紫铜控温炉中,采用自制的精度为0.003 °C的温度控制仪(型号:YG-4S,宇光公司)将其温度控制于相位匹配温度点55.9 °C。倍频腔腔模腰斑半径为39 μm,通过透镜组对795 nm抽运光整形聚焦,使抽运光与倍频腔的本征腔模实现模式匹配,并通过Pound-Drever-Hall (PDH)稳频技术^[31]将倍频腔腔长锁定在抽运光共振频率处,以获得稳定的397.5 nm紫光输出。

由倍频腔输出的紫光作为OPA腔的抽运光,与OPA腔进行模式匹配。OPA腔由两面曲率半径为30 mm的平凹镜构成,输入耦合镜镀膜为: $R_{795\text{ nm}}>99\%$ 、 $T_{397.5\text{ nm}}=5\%$,输出耦合镜镀膜为: $R_{397.5\text{ nm}}>99\%$ 、 $T_{795\text{ nm}}=5\%$ 。OPA腔光学腔长为55 mm,对应抽运光的腔模腰斑半径为34 μm。采用I类周期极化PPKTP晶体作为参量下转

换晶体,尺寸为1 mm×2 mm×10 mm。实验中,利用聚焦透镜使紫光与OPA腔的本征腔模实现模式匹配,将从输出耦合镜透射的紫光导入探测器,探测器输出的直流信号接入示波器中,用来监视紫光的模式。

在利用平衡零拍技术对光场压缩度进行探测时,在本底光光路中插入模式清洁器(腔型参数与OPA腔相同),其中输入镜镀基频光高反膜,输出镜对基频光的透过率为1%。模式清洁器腔长为55 mm,精细度为600。利用PDH锁腔技术^[31]将模式清洁器和OPA腔的腔长锁定在795 nm基频光的共振频率处。模式清洁器输出的本底光与OPA腔输出的信号光经过相同的聚焦透镜聚焦、传输相同的距离后,在50/50 BS上发生干涉,BS输出的两束干涉信号可用于对压缩态光场的探测。

3.2 结果分析

如引言中所述,在自制的钛宝石激光器^[21]腔内插入BIBO倍频晶体获得了约90 mW的紫光输出,利用光束质量分析仪(型号:DataRay, M2DU)测量其光束质量,结果如图2中(a)所示。可以看出,紫光走离效应严重, M^2 因子无法测量。利用内腔倍频紫光作为OPA腔的抽运光,与OPA腔进行模式匹配,通过扫描OPA腔的腔长,紫光经过OPA腔的透射峰曲线如图2中(b)所示,经计算模式匹配效率仅为76%(模式匹配效率定义为主峰的峰值大小对一个自由光谱区内主峰与所有次峰的峰值大小之和的比值;经计算,此时OPA阈值功率大于607 mW;实验中,注入OPA的紫光功率仅为90 mW,因而并未观察到OPA的阈值)。由理论分析部分可知,抽运光与OPA腔的模式匹配效率较低不利于高压缩度光场的产生。

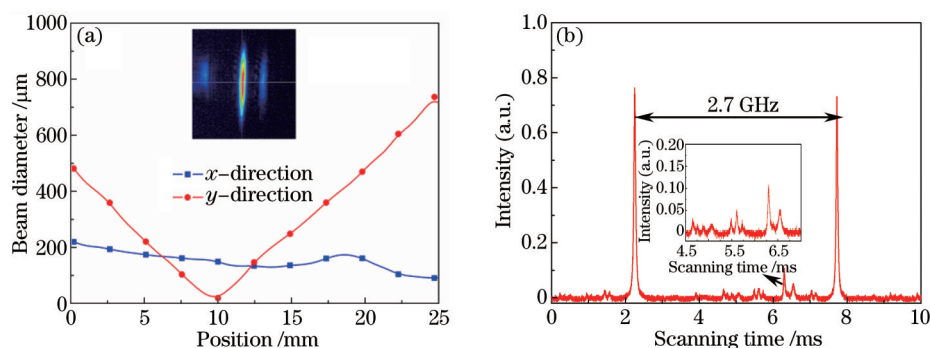


图2 (a) 内腔倍频紫光光束质量与光斑模式; (b) 内腔倍频紫光通过OPA腔的透射峰曲线

Fig.2 (a) Beam quality M^2 values and the spatial beam profile for the output intra-cavity frequency doubling violet beam; (b) intra-cavity frequency doubling violet beam transmission of the OPA cavity

为了获得高光束质量的397.5 nm紫光,避免功率密度高对倍频晶体的损坏和角度匹配时的光束走离效应,利用周期极化的PPKTP晶体作为倍频晶体,采用四镜环形谐振腔对795 nm红外光进行外腔倍频。当红外光注入功率为260 mW时,获得103 mW的397.5 nm紫光输出,倍频转换效率为39.6%。外腔倍频紫光光束质量如图3中(a)所示,左侧为光束质量分析仪测得的光斑,右侧为相机拍摄的实际光斑。从图中可以看出,外腔倍频紫光具有较好的光束质量,其光斑在水平方向和垂直方向的强度分布均呈标准的高斯分布,两个方向的 M^2 因子均小于1.43。随后,将外腔倍频紫光注入OPA腔中,与OPA腔进行模式匹配,结果如图3中(b)所

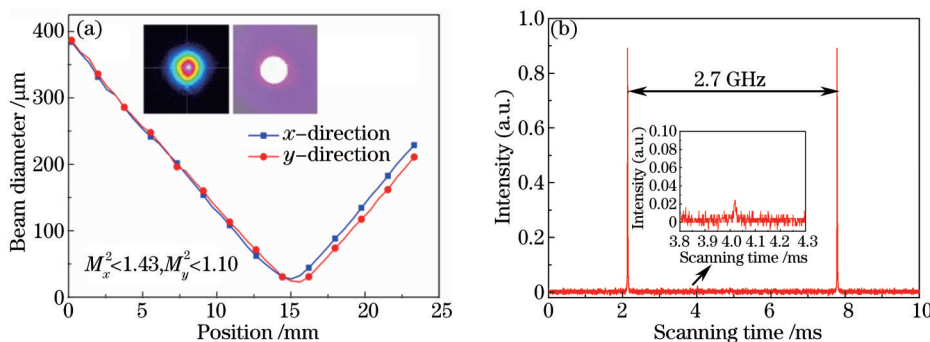


图3 (a) 外腔倍频紫光光束质量与光斑模式; (b) 外腔倍频紫光通过OPA腔的透射峰曲线

Fig.3 (a) Beam quality M^2 values and the spatial beam profile for the output extra-cavity frequency doubling violet beam; (b) extra-cavity frequency doubling violet beam transmission of the OPA cavity

示,外腔倍频紫光与OPA腔的模式匹配效率可达99%以上,从而降低了OPA腔的阈值功率(实验中,OPA腔的阈值功率仅为26 mW),有利于高压缩度光场的获得。

在平衡零拍探测中,为了对光场压缩度进行有效探测,需要使本底光与信号光在50/50 BS上获得接近100%的干涉效率,即两束光在BS两臂上的腰斑大小和发散角完全相同且重合。实验中,首先在BS的一臂上测量由激光器直接输出的本底光与OPA腔输出的信号光的空间模式,结果如图4中(a)和(b)所示,其中图(a)为本底光空间模式,(b)为信号光空间模式。由于两束光空间模式差别较大,通过光束整形并仔细调节两束光的空间模式重叠,通过扫描本底光与信号光的相对位相,两束光干涉效率仅为93%,如图5中曲线(a)所示。如此低的干涉效率无法实现对光场压缩度的有效测量。为此,实验中在本底光光路中插入与OPA腔型相同的模式清洁剂,输出的本底光与信号光的空间模式基本相同,且光束质量均小于1.03,实验结果如图4中(b)和(c)所示。通过扫描本底光与信号光的相对位相,两束光的干涉效率可达99%以上,如图5中曲线(b)所示。因此,该装置可以实现对压缩态光场的有效探测。同时,通过采用殷钢作为腔体加工材料,用有机玻璃罩对腔体进行密封等办法,提高了整套系统的机械稳定性,锁定后整套系统可连续稳定工作,且干涉曲线光滑、抖动较小,这就为小型化795 nm压缩源的研制提供了一种稳定可靠的优质单频激光系统。

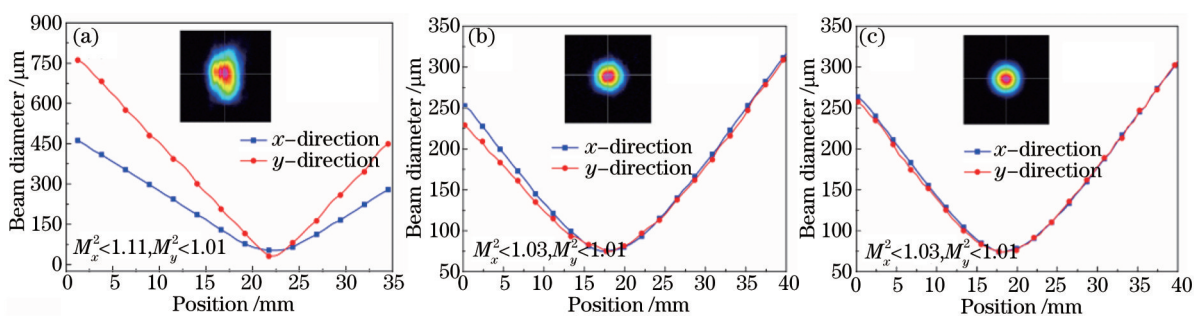


图4 (a) 本底光光束质量 M^2 因子和光斑模式(未插入模式清洁剂之前); (b) 信号光光束质量 M^2 因子和光斑模式; (c) 本底光光束质量 M^2 因子和光斑模式(插入模式清洁剂之后)

Fig.4 (a) Beam quality M^2 values and the spatial beam profile for the local oscillator (without MC); (b) beam quality M^2 values and the spatial beam profile for the signal beam; (c) beam quality M^2 values and the spatial beam profile for the local oscillator (with MC)

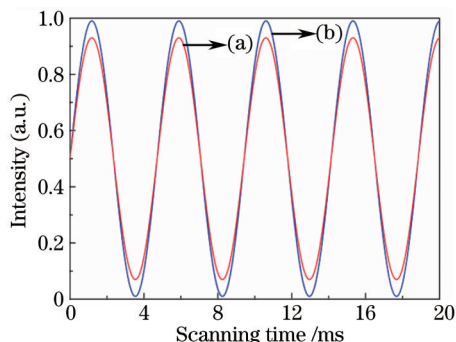


图5 干涉效率测试结果。(a) 未插入模式清洁剂之前;(b) 插入模式清洁剂之后
Fig.5 Measured results of interference efficiency. (a) Without MC; (b) with MC

4 结 论

采用准相位匹配的PPKTP晶体作为倍频晶体,通过外腔谐振倍频技术,对自制的钛宝石激光器输出的795 nm红外光进行外腔倍频,获得了光束质量因子 $M^2 < 1.43$ 、功率为103 mW的优质397.5 nm紫光输出。与内腔倍频情况相比,紫光与OPA腔的模式匹配效率由76%提高到了99%以上,从而降低了OPA腔的阈值功率。同时,为了提高平衡零拍探测中的干涉效率,在795 nm本底光光路中插入与OPA腔型相同的模式清洁剂,使得本底光与信号光的空间横模参数完全相同,两束光的干涉效率由未插入模式清洁剂时的93%提高到了99%以上。综上所述,通过对795 nm红外光和397.5 nm紫光构成的激光系统的优化设计,降低了OPA的阈值功率,提高了平衡零拍探测中的干涉效率,使得该激光源满足了制备小型化795 nm压缩源样机的需

求。该波长位于 ^{87}Rb 原子的 D_1 吸收线波段,可用于实用化量子信息网络系统的研究。

参考文献

- 1 T Eberle, S Steinlechner, J Bauchrowitz, *et al.*. Quantum enhancement of the zero-area sagnac interferometer topology for gravitational wave detection[J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 104(25): 251102.
- 2 F Wolfgramm, A Cerè, F A Beduini, *et al.*. Squeezed-light optical magnetometry[J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 105(5): 053601.
- 3 Peng Kunchi. Generation and application of squeezed state light sub-shot-noise-limit optical measurement and quantum information [J]. *Physics*, 2001, 30(5): 300-305.
彭堃焜. 光场压缩态的产生及其在亚散粒噪声光学测量和量子信息中的应用[J]. *物理*, 2001, 30(5): 300-305.
- 4 W P Bowen, R Schnabel, P K Lam, *et al.*. Experimental investigation of criteria for continuous variable entanglement[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 90(4): 043601.
- 5 S Polzik, J Carri, H J Kimble. Spectroscopy with squeezed light[J]. *Phys Rev Lett*, 1992, 68(20): 3020-3023.
- 6 M D Levenson, R M Shelby, M Reid, *et al.*. Quantum nondemolition detection of optical quadrature amplitudes[J]. *Phys Rev Lett*, 1986, 57(20): 2473-2476.
- 7 Xiaojun Jia, Xiaolong Su, Kunchi Peng, *et al.*. Experimental demonstration of unconditional entanglement swapping for continuous Variables[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 93(25): 250503.
- 8 D Bouwmeester, J W Pan, K Mattle, *et al.*. Experimental quantum teleportation[J]. *Nature*, 1997, 390(11): 575-579.
- 9 A Barenco, A K Ekert. Dense coding based on quantum entanglement[J]. *J Mod Opt*, 1995, 42(6):1253-1259.
- 10 Su Xiaolong. Generation of Quadripartite Entangled Optical Field and Quantum Key Distribution with Continuous Variables[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2007: 81-106.
苏晓龙. 连续变量四组份纠缠光场产生和量子保密通信研究[D]. 太原: 山西大学, 2007: 81-106.
- 11 Daisuke Akamatsu, Keiichirou Akiba, Mikio Kozuma. Electromagnetically induced transparency with squeezed vacuum[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 92(20): 203602.
- 12 Kazuhito Honda, Daisuke Akamatsu, Manabu Arikawa, *et al.*. Storage and retrieval of a squeezed vacuum[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 100(9): 093601.
- 13 A Dantan, M Pinard. Quantum-state transfer between fields and atoms in electromagnetically induced transparency[J]. *Phys Rev A*, 2004, 69(4): 043810.
- 14 A Predojević, Z Zhai, J M Caballero, *et al.*. Rubidium resonant squeezed light from a diode-pumped optical-parametric oscillator [J]. *Phys Rev A*, 2008, 78(6): 063820.
- 15 G Hétet, O Glöckl, K A Pilypas, *et al.*. Squeezed light for bandwidth-limited atom optics experiments at the rubidium D_1 line[J]. *J Phys B: At Mol Opt Phys*, 2007, 40(1): 221-226.
- 16 Takahito Tanimura, Daisuke Akamatsu, Yoshihiko Yokoi. Generation of a squeezed vacuum resonant on a rubidium D_1 line with periodically poled KTiOPO₄[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(15): 2344-2346.
- 17 Yang Wenhai, Wang Yajun, Li Zhixiu, *et al.*. Compact and low-noise intracavity frequency-doubled single-frequency Nd: YAP/KTP laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5): 0502002.
杨文海, 王雅君, 李志秀, 等. 小型化、低噪声内腔倍频 Nd: YAP/KTP 单频激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0502002.
- 18 Coherent. MBR Ring Series[OL]. <http://www.coherent.com/Products/index.cfm?846/MBR-Ring-Series>. [2015-05-13]
- 19 Spectra Physics Matisse 2[OL]. <http://www.spectra-physics.com/products/tunable-lasers/matisse/>. [2015-05-13]
- 20 M Squared. Solstis CW Ti Sapphire Laser[OL]. <http://www.m2lasers.com/products/laser-systems/ti-sapphire-laser.aspx>. [2015-05-13]
- 21 Huadong Lu, Xuejun Sun, Meihong Wang, *et al.*. Single frequency Ti: sapphire laser with continuous frequency-tuning and low intensity noise by means of the additional intracavity nonlinear loss[J]. *Opt Express*, 2014, 22(20): 024554.
- 22 Lu Huadong, Su Jing, Li Fengqin, *et al.*. Compact, stable, tunable Ti: sapphire laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(5): 1166-1171.
卢华东, 苏 静, 李凤琴, 等. 紧凑稳定的可调谐钛宝石激光器[J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1166-1171.
- 23 Lu Huadong. Intracavity losses measurement of the Ti: sapphire laser with relaxation resonant oscillation frequency and output power [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0402002.
卢华东. 利用弛豫振荡频率和输出功率测量单频钛宝石激光器的腔内损耗[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0402002.
- 24 Jacek K Tymiński. Photorefractive damage in KTP used as second-harmonic generator[J]. *J Appl Phys*, 1991, 70(10): 5570-5576.
- 25 Li Hong, Feng Jinxia, Wan Zhenju, *et al.*. Low noise continuous - wave single frequency 780 nm laser high-efficiently generated by

- extra-cavity-enhanced frequency doubling[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0502003.
- 李 宏, 冯晋霞, 万振菊, 等. 高效率外腔倍频产生低噪声连续单频 780 nm 激光[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0502003.
- 26 Li Jiahua, Zheng Haiyan, Zhang Ling, *et al.*. 397.5 nm laser produced by resonant frequency-doubling with PPKTP crystal[J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2011, 17(1): 30-33.
- 李嘉华, 郑海燕, 张 玲, 等. 利用 PPKTP 晶体倍频产生 397.5 nm 激光的实验研究[J]. 量子光学学报, 2011, 17(1): 30-33.
- 27 Han Yashuai, Wen Xin, Bai Jiandong, *et al.*. Generation of 130 mW of 397.5 nm tunable laser via ring-cavity-enhanced frequency doubling[J]. JOSA B, 2014, 31(8): 1942-1947.
- 28 Zhang Jing, Ma Hongliang, Luo Yu, *et al.*. Efficient external resonant frequency doubling green laser in bulk periodically poled KTiOPO₄[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(12): 1057-1060.
- 张 靖, 马红亮, 罗 玉, 等. 准相位匹配的 KTP 晶体获得高效外腔谐振倍频绿光[J]. 中国激光, 2002, 29(12): 1057-1060.
- 29 P K Lam, T C Ralph, B C Buchler, *et al.*. Optimization and transfer of vacuum squeezing from an optical parametric pscillator[J]. J Opt B: Quantum Semiclass Opt, 1999, 1(4): 469-474.
- 30 Wang Yajun, Yang Wenhai, Zheng Yaohui, *et al.*. Influence of pump wavelength and Nd³⁺ doped concentration on the performance of intracavity doubling single-frequency lasers[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602005.
- 王雅君, 杨文海, 郑耀辉, 等. 抽运波长及 Nd³⁺ 掺杂浓度对内腔倍频单频激光器性能的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602005.
- 31 E D Black. An introduction to pound-drever-hall laser frequency stabilization[J]. Am J Phys, 2001, 69(1): 79-87.

栏目编辑: 刘丰瑞