

PPKTP 晶体半整体谐振腔倍频的 397.5 nm 紫外激光输出

温 馨 韩亚帅 何 军 王彦华 杨保东 王军民

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 外腔谐振倍频是获得 397.5 nm 紫外激光的重要方法。搭建了基于周期极化的磷酸氧钛钾(PPKTP)晶体的半整体谐振腔,对经半导体锥型放大器放大的 795 nm 单频连续激光进行谐振倍频。在 203 mW 的 795 nm 基频光输入条件下,实现了 60.4 mW 的 397.5 nm 连续单频紫外激光输出,倍频转化效率为 30%;在基频光功率约 87.5 mW 时,得到最大的倍频效率约为 34.6%。倍频紫外光光束质量因子 M^2 优于 1.21,光束质量良好,30 min 内典型的倍频光功率均方根起伏小于 1.9%。该倍频器结构紧凑,具有很好的机械稳定性,可实现紫外激光的稳定输出,可用于产生对应铷原子跃迁线的压缩、纠缠态光场,在量子光学和精密测量等领域发挥重要作用。

关键词 激光光学; 倍频; 半整体谐振腔; PPKTP 晶体; 半导体锥型放大器; 铷原子

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0414001

Generation of 397.5 nm Ultra-Violet Laser by Frequency Doubling in a PPKTP-Crystal Semi-Monolithic Resonant Cavity

Wen Xin Han Yashuai He Jun Wang Yanhua Yang Baodong Wang Junmin

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

Abstract Frequency doubling in an external cavity is a prevalent method to generate an ultra-violet laser at 397.5 nm. A semi-monolithic resonant frequency doubling cavity based on the PPKTP crystal is built and is used to realize the resonant frequency doubling of the 795 nm single frequency continuous-wave laser amplified via a semiconductor tapered amplifier. Under the condition of 203 mW input power of a 795 nm laser, the 397.5 nm single frequency continuous-wave ultra-violet laser with a power of 60.4 mW is obtained, and the frequency doubling conversion efficiency is 30%; and the maximum doubling efficiency is 34.6% with a fundamental power of about 87.5 mW. The beam quality factor M^2 of the frequency doubling ultra-violet laser is superior to 1.21, indicating the better beam quality. The typical root-mean-square fluctuation of the output power within 30 min is less than 1.9%. This frequency doubler is compact, has good mechanical stability, and can be used to achieve steady output of ultra-violet laser. The ultra-violet laser can be used to generate the squeezed or entangled states of the rubidium transition line, and plays an important role in the quantum optics, precise measurement and other fields.

Key words laser optics; frequency doubling; semi-monolithic resonant cavity; PPKTP crystal; semiconductor tapered amplifier; rubidium atoms

OCIS codes 140.3515; 140.4780; 190.2620

收稿日期: 2015-10-26; 收到修改稿日期: 2015-11-16

基金项目: 国家 863 计划(2012CB921601)、国家自然科学基金(61227902, 61475091, 11274213, 61205215)

作者简介: 温馨(1990—),女,博士研究生,主要从事非线性光学、激光技术等方面的研究。

E-mail: wenxin0023@126.com

导师简介: 王军民(1967—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事量子光学、非线性光学、冷原子物理、激光技术等方面的研究。E-mail: wjjmm@sxu.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

紫外光在激光打印、刻蚀、激光光谱及量子光学的众多领域都有着重要的应用价值。例如,396.847 nm的紫外激光对应于钙离子(Ca^+) $4S_{1/2}$ - $4P_{1/2}$ 的跃迁线,在 Ca^+ 的冷却与俘获中作为冷却光,是钙离子光钟的重要组成部分^[1]。397.5 nm的单频连续紫外激光抽运阈值下的光学参量振荡器(OPO),经腔增强的自发参量下转换过程可产生795 nm的压缩、纠缠态光场,可用于精密测量^[2]、量子存储^[3]、量子网络研究^[4]、无漏洞的贝尔不等式检验^[5]等方面。外腔谐振倍频是实验上获得397.5 nm紫外激光的重要手段,经优化后的激光系统可以满足对压缩光产生的要求^[6]。再经过半导体锥型放大器(TA)放大,可以得到近500 mW的红外基频光输出。该基频光使用方便,性能稳定,是作为基频光的理想光源。相比较钛宝石激光器,上述激光系统价格更低廉,维护更简单、便捷。

倍频产生397.5 nm紫外激光的非线性晶体通常有周期极化的磷酸氧钛钾(PPKTP)、三硼酸锂(LBO)、硼酸铋(BiBO)。由于周期极化技术的优势,PPKTP晶体的最大非线性系数($d_{\text{eff}} \approx 10.8$ pm/V)可被充分利用,其倍频转化效率较高,输出谐波光束质量较好。在较高的基频光功率下,单次穿过倍频晶体即可实现高效倍频^[7]。中低功率水平时,通过外腔谐振倍频可提高转化效率,相比其他晶体具有明显优势。李嘉华等^[8]对低功率水平下795 nm激光的倍频实验进行了研究,得到了13%的倍频转化效率。LBO晶体透光波长范围大(160~2600 nm),稳定性较好,但由于角度匹配的走离效应,输出光斑的光束质量较差;同时,LBO晶体非线性系数较低($d_{\text{eff}} \approx 0.75$ pm/V),需要严格控制倍频腔的损耗,在基频光功率较高时也可实现高效的倍频。意大利的Pizzocaro等^[9]在1.3 W的基频光功率水平下使用LBO晶体产生399 nm的倍频光,其效率为80%。BiBO晶体是一种新型的非线性晶体,使用一类角度匹配可以实现397.5 nm激光的倍频,其非线性系数($d_{\text{eff}} \approx 3.6$ pm/V)大于LBO,但走离角较大,且会出现光折变现象,造成输出倍频光的功率起伏^[10]。本文中的倍频系统工作在约200 mW的基频光功率水平下,使用了非线性系数较大的PPKTP晶体。

实验上构建了半整体谐振倍频腔,该倍频腔由一端为平面、另一端为球型凸面的PPKTP晶体与一片独立的平凹输入耦合镜组成。与通常的四镜环形腔^[11]相比,半整体腔^[12]具有更低的线性损耗,且结构紧凑,机械稳定性更好。在使用半整体腔对1550 nm激光倍频的实验中,已经实现了高达95%的转化效率^[13]。此外,半整体腔可以通过腔镜粘接的压电陶瓷来调节腔长,用以将半整体腔稳定地锁定在特定激光频率上,这是整体谐振腔^[14]无法实现的。

本文采用半整体PPKTP倍频器在203 mW的795 nm基频光输入条件下,实现了60.4 mW的397.5 nm连续单频紫外激光输出,倍频转化效率为30%;当基频光功率约为87.5 mW时,得到最大的倍频效率,约为34.6%。该倍频器与半导体激光器和半导体锥型放大器共同构成了结构紧凑、稳定性良好的397.5 nm激光产生系统,为后续的OPO实验提供了稳定的抽运光源。

2 实验装置及倍频器设计

图1(a)为半整体谐振腔倍频系统的示意图,图1(b)为光纤前后激光束的横向光强分布。 $\lambda/2$:半波片;APP:整形棱镜对;ISO:光隔离器;EOM:位相型电光调制器;PMF:单模保偏光纤; $\lambda/4$:四分之一波片;PZT:压电陶瓷;DM:双色镜;PD:光电探测器。795 nm激光系统为由分布布拉格反射式(DBR)半导体激光器(Photodigm公司,美国)和半导体锥型放大器(New Focus公司,美国)组成的主振荡功率放大结构。经TA可以得到最大输出约为500 mW的795 nm激光,光隔离器用于抑制光反馈,以减小对TA的损伤,同时保证该激光系统稳定运转。TA本身具有很高的自发辐射背景,且输出光斑较差。为改善光束质量,在实验中使用单模保偏光纤对光斑的空间模式进行了过滤,得到了较好的基横模(TEM_{00} 模),如图1(b)所示。相比模式清洁腔,光纤在使用上免去了锁腔的过程,更加简单;同时,光纤体积小、灵活性好,可以使整个系统更加紧凑。通过光纤的模式过滤作用,倍频腔的模式匹配效率由82%提高至90%左右。

PPKTP半整体谐振倍频腔由一片曲率半径 $r=30$ mm的平凹输入镜(凹面s镀有对795 nm基频光透射率 $T=5.6\%$ 、同时对397.5 nm倍频光反射率 $R>99.5\%$ 的介质膜)和一块尺寸为1 mm \times 2 mm \times 10 mm的PPKTP晶体(极化周期为3.15 μm ,0类匹配,输入基频光和输出倍频光的偏振方向与晶体1 mm边的方向平行;PPKTP晶体一端为平面 s_1 ,镀有基频光和倍频光双波长增透膜,剩余反射率 $R<0.2\%$;晶体另一端为球型凸面 s_2 ,曲率

半径 $r'=15\text{ mm}$, 镀有对基频光反射率 $R>99.5\%$ 、同时对倍频光透射率 $T>98.5\%$ 的介质膜) 所组成, 晶体的球型凸面作为谐振腔的输出端面, 如图 1(a) 虚线框内所示。PPKTP 晶体放置在自制的控温炉中, 通过精密控温仪 (精度为 $0.01\text{ }^\circ\text{C}$) 精确地控制其温度。倍频腔的平凹输入镜与一个环状压电陶瓷 (PZT) 粘接固定在硬铝动片中心, 该动片与支撑晶体控温炉的硬铝底座通过三个细牙调节螺钉和拉簧构成一个调节架, 大大增强了倍频腔的机械稳定性。通过三个调节螺钉可对倍频腔进行粗调, 通过对 PZT 加电压可对倍频腔进行细调以及进行腔长控制。晶体控温炉顶部和侧面的有机玻璃罩可降低空气流动对倍频腔的影响, 并可防尘以保持倍频腔洁净。PPKTP 半整体谐振倍频腔通过射频边带调制的方法锁定到 795 nm 基频光频率上。

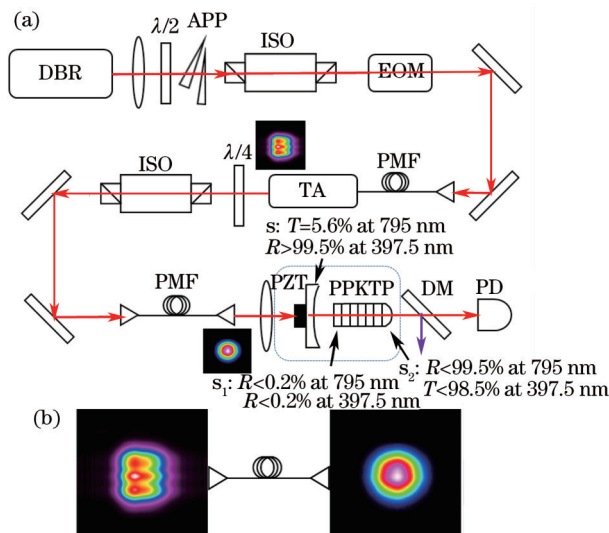


图 1 (a) 半整体谐振倍频系统示意图; (b) 光纤前后的激光束的横向光强分布

Fig.1 (a) Schematic of the semi-monolithic frequency doubling system; (b) transverse intensity distribution of laser beams before and after the fiber

由于谐振腔稳定条件的限制, 腰斑的大小与位置相关联。在固定 PPKTP 晶体长度为 10 mm 和晶体球型凸面曲率半径 $r'=15\text{ mm}$ 的条件下, 计算了倍频腔内基频光 TEM_{00} 模的腰斑半径随输入镜的凹面曲率半径 r 和腔长的变化情况, 结果如图 2 所示。晶体球面端面的曲率半径将决定晶体内的最大腰斑, 当晶体端面的曲率半径 $r'=15\text{ mm}$ 时, 得到的最大腰斑半径约为 $43\text{ }\mu\text{m}$, 换用不同曲率半径的输入镜均可以通过调节腔长得到近似的结果。

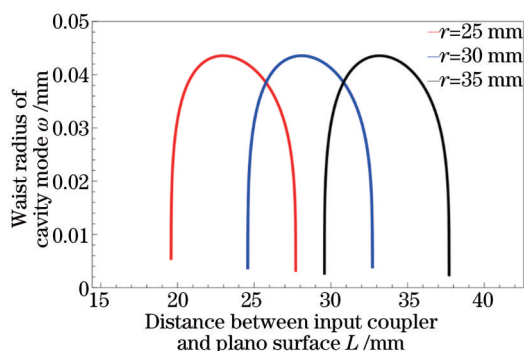


图 2 输入镜的凹面曲率半径 r 分别取 25、30、35 mm 时, 倍频腔内基频光 TEM_{00} 模的腰斑半径随腔长的变化情况
Fig.2 Relationship between the waist radius of the cavity mode and the cavity length when the curvature radii of the input coupler are 25, 30, 35 mm, respectively

实验中选用了曲率半径 $r=30\text{ mm}$ 的输入耦合镜。腔长约为 38.1 mm , 对应的腔内基频光 TEM_{00} 模腰斑半径最大 (约为 $43\text{ }\mu\text{m}$)。由于 PPKTP 晶体对倍频紫外光的吸收较严重, 在实验中放宽了聚焦条件^[12, 15]。此时, 腰斑处于距晶体球面 7.53 mm 的位置, 略偏离晶体中心, 虽然未充分利用光束的瑞利长度, 但此时的腰斑半径只是略大于处于晶体中心时的 $42\text{ }\mu\text{m}$, 并不会明显降低光功率密度, 仍然可以保证较高的单次穿过转化效率。其最大的优点在于可以在一定程度上减轻 PPKTP 晶体由于吸收而导致的热效应。

3 实验结果与讨论

测得实验中所使用的长度为 10 mm 的 PPKTP 晶体在 795 nm 基频激光单次穿过晶体时倍频的匹配温度数据,使用 $\text{sinc}^2 T$ 函数进行拟合,如图 3 所示。基频光功率为 140 mW 的情况下,得到的最佳匹配温度 $T_{\text{opt}} \approx 53.0 \text{ } ^\circ\text{C}$,半峰全宽 $\Delta T_{\text{FWHM}} \approx 1.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。周期极化晶体的匹配温度带宽与晶体的长度近似成反比^[16],与之前实验中使用的长度为 20 mm 的 PPKTP 晶体^[11](晶体尺寸 1 mm×2 mm×20 mm,极化周期为 3.15 μm ,0 类匹配,PPKTP 晶体两端均为平面)在基频光波长 795 nm 时倍频的匹配温度带宽(约为 0.5 $^\circ\text{C}$)相比,10 mm 长度的 PPKTP 晶体更大的温度带宽(约为 1.1 $^\circ\text{C}$)客观上降低了对控温精度的要求。

基频光功率将直接影响倍频腔的工作状态,实验中测量了不同入射功率下倍频的温度匹配曲线,如图 4 所示。当入射功率为 10、30、50 mW 时,对应的匹配温度分别为 52.45、52.20、52.00 $^\circ\text{C}$,匹配温度依次降低。由于倍频光波长处于 PPKTP 晶体透光波长范围的边缘,晶体对倍频光的吸收非常严重,当内腔功率增大时,对基频光和倍频光的吸收会加热晶体。通过降低晶体的温度可适当补偿这一过程,因此倍频的最佳匹配温度也相应地向低温方向转移。另外,加热过程会使晶体内部出现温度梯度,导致了腔内的温度调谐曲线与正常 $\text{sinc}^2 T$ 函数的偏离。

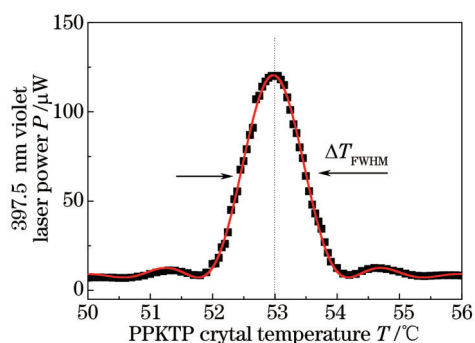


图 3 实验中所使用的 10 mm 长的 PPKTP 晶体对 795 nm 激光倍频时的匹配温度数据及理论拟合结果

Fig.3 Experimental and theoretical fitted results of the matched temperature for the 10 mm long PPKTP crystal

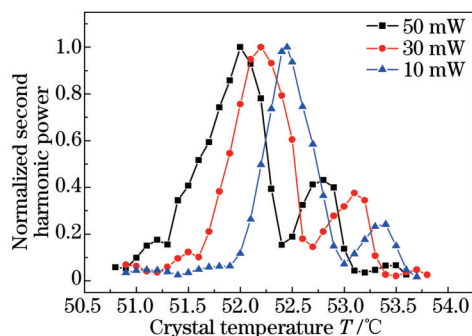


图 4 不同入射功率条件下倍频过程的晶体温度匹配曲线

Fig.4 Phase-matching temperature curves of the frequency doubling process under different input powers

倍频效率与基频光功率的关系可以描述为^[15]

$$\sqrt{\eta} \left[2 - \sqrt{1 - T_1} \left(2 - L - \Gamma \sqrt{\frac{\eta P_1}{E_{\text{NL}}}} \right) \right]^2 - 4 T_1 \sqrt{E_{\text{NL}} P_1} = 0, \quad (1)$$

式中 $\eta = P_2/P_1$ 为倍频转化效率, P_1 为匹配到腔内的基频光功率, P_2 为倍频光功率, L 为除输入耦合透射率 T_1 外的内腔损耗,拟合得到的内腔损耗 L 约为 2.2%, Γ 为非线性损耗, $\Gamma = E_{\text{NL}} + \Gamma_{\text{abs}}$, E_{NL} 为单次穿过转化效率, Γ_{abs} 为对倍频光的吸收,晶体内 $P_{\text{abs}} = \Gamma_{\text{abs}} P_c^2$,其中 P_c 为内腔循环功率。

采用 PPKTP 晶体半整体谐振倍频腔得到的倍频结果如图 5 所示。蓝色方块和红色圆圈分别为不同基频

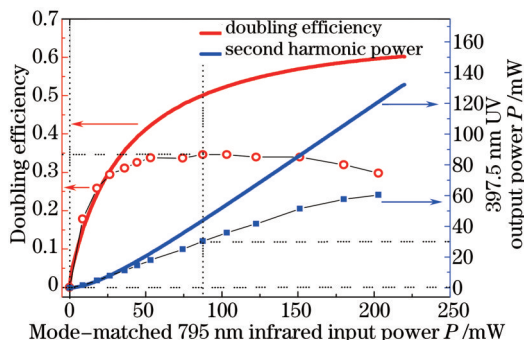


图 5 PPKTP 晶体半整体谐振腔的倍频实验结果

Fig.5 Experimental frequency doubling results of the PPKTP semi-monolithic cavity

光输入功率下的倍频光输出功率和倍频效率,实线为理论计算结果。在 203 mW 基频光输入时,可得到 60.4 mW 的倍频紫外光输出,对应的倍频效率约为 30%。入射光功率在 87.5 mW 时得到了 30.3 mW 的倍频光,此处得到了最大的倍频效率,约为 34.6%。当基频光功率约为 50 mW 时,倍频光功率随基频光功率的增加仍在增长,但转化效率已经趋于饱和,同时开始出现实验结果与理论的偏差。

这种偏差主要来源于以下两个方面:1) PPKTP 晶体对倍频紫外光的吸收。PPKTP 晶体对 397.5 nm 倍频光的吸收会在倍频腔内产生明显的热透镜效应^[17]。在吸收的影响下,晶体内部出现温度梯度,引起折射率及腔内的聚焦条件、模式匹配效率等的变化,倍频腔的工作状态发生改变。当晶体温度处于倍频的最佳匹配温度时,腔内产生的大量倍频紫外光使晶体温度急剧上升,这种热效应会引起热致双稳现象^[15,18],从而破坏倍频腔的锁定。为得到稳定输出的倍频紫外光,需要将晶体温度调离匹配点,得到的倍频光功率也就会低于扫描模式得到的最佳值。2) 倍频紫外光引起的倍频腔损耗的增加。高功率的紫外光在 PPKTP 晶体内传输产生的灰迹效应^[19-20]和紫光诱导的红外吸收^[15]均会导致倍频腔内腔损耗的增加,限制了倍频效率的增长。这种损耗很难定量地进行描述,在高功率区域理论与实际的偏差比较明显。特别是灰迹效应,在一定功率密度的激光照射下,晶体的物理性质发生改变,使晶体损伤,严重时可直接在晶体内部看到损伤痕迹。这种损伤大部分可以自行恢复,通常需要几小时甚至一年的时间,这主要取决于照射时间和聚焦情况,通过加热可以加速这一过程。灰迹效应会影响倍频紫外光的输出光斑,在实验中观察到,经长时间照射后输出的倍频光光斑周围会出现小的杂散斑点。因此,使用一段时间后,需要调整晶体位置以重新得到较好的输出光斑。而 1560 nm 的基频光和 780 nm 的倍频光均处于 PPKTP 晶体透光波长范围中间,吸收较弱,不会对晶体产生明显的加热现象,可以稳定地工作在高功率区域,其倍频结果与理论值吻合得很好。实验中还测量了 PPKTP 晶体对 397.5 nm 倍频光的吸收。使用两端面均为平面并镀有 397.5 nm 减反膜的晶体,将温度调离倍频匹配温度,通过测量单次穿过晶体后紫外光的透射率推算得到晶体对 397.5 nm 紫外光的吸收系数 $\alpha \approx 0.18 \text{ cm}^{-1}$,这与文献[17]中提到的参数基本相同。这一结果应略大于实际的吸收,紫外光的损耗部分既包括晶体的吸收,也包括晶体端面的散射、反射损耗,但后一部分非常微弱,可以忽略。PPKTP 晶体对紫外光波段倍频光吸收引起的热效应,造成了倍频腔工作状态的改变。倍频效率降低、腔体热稳定性变差、晶体材料损伤等,均是这一波段无法避免的问题。

相比之前使用半整体腔倍频的实验^[12],在高的基频光输入功率下,倍频效率并没有进一步提高。以上结果表明,由于半整体腔腔型结构和晶体材料的限制,在提高基频光输入功率的情况下,虽然倍频光的输出功率保持了持续的增长,但倍频效率已经出现饱和。高功率的基频光可以保证倍频紫外光的输出,但长时间的工作会对晶体造成较大的损伤。可以通过增大晶体球型凸面的曲率半径,进一步放大晶体内的腰斑以减轻腔内热效应。

采用单刀口法测量了输出倍频光束的光束质量因子 M^2 ,在水平、竖直方向分别为 $M_x^2=1.17$ 和 $M_y^2=1.21$,表明该倍频器输出的 397.5 nm 紫外激光束具有比较好的光束质量,测量结果如图 6 所示,其中插图为倍频光的远

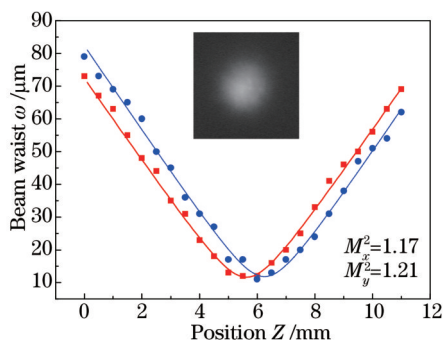


图6 倍频器输出的 397.5 nm 紫外激光束的 M^2 因子,插图为倍频光的远场光斑

Fig.6 M^2 factors of the output 397.5 nm ultra-violet laser from the frequency doubler, and the insert is the far-field spot

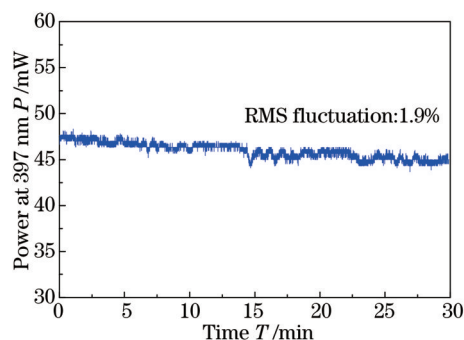


图7 输出倍频光的功率稳定性测量结果

Fig.7 Power stability of the output frequency doubled laser

场光斑。

在 30 min 的时间尺度内,当输出紫外光功率约为 47 mW 时,测得倍频光输出功率的典型均方根起伏小于 1.9%,测量结果如图 7 所示。与之前采用 PPKTP 晶体结合环形腔实现 795 nm 激光谐振倍频所得到的 397.5 nm 输出激光功率的稳定度^[11](典型均方根起伏小于 0.7%)相比,此稳定度变得较差,但仍在实验可接受的范围内,这种功率起伏的增大主要是半整体腔热稳定性较差造成的。

该倍频器输出的 397.5 nm 单频紫外激光,可在约 3 GHz 的频率范围内连续调谐,这一点与之前环形腔倍频得到的结果^[11]相似。目前倍频光的连续调谐范围主要受限于倍频腔所用压电陶瓷的伸长量。

4 结 论

通过半整体腔谐振倍频,在 203 mW 的 795 nm 基频光输入条件下,实现了 60.4 mW 的 397.5 nm 连续单频紫外激光输出,倍频转化效率为 30%,当基频光功率约为 87.5 mW 时,得到最大的倍频效率,约为 34.6%。输出激光具有较好的光束质量(M^2 优于 1.21)。输出的 397.5 nm 激光可以连续稳定运转,在 30 min 的时间尺度内典型的功率均方根起伏小于 1.9%。半整体谐振倍频腔由 10 mm 长的 PPKTP 晶体和一片平凹输入耦合腔镜构成,可与商用的 DBR 或分布反馈式半导体激光器及 TA 集成为高效 795 nm 激光倍频器。该倍频器结构紧凑,具有很好的机械稳定性,可作为光学参量振荡的抽运光,产生 795 nm 的单模真空压缩场,与明亮的相干光合成偏振压缩光用于超高灵敏度的惯性与磁场测量系统。

目前,限制倍频转换效率的主要因素是倍频腔对于 795 nm 基频激光的线性损耗仍相对较大(倍频腔的输入耦合镜凹面光学加工本身以及镀膜后的光学质量不很理想,可能造成了较大的散射损耗,PPKTP 晶体的平面和凸面光学加工本身及镀膜后的光学质量不是很理想,可能造成较大的平面剩余反射损耗和凸面透射损耗及散射损耗),充分降低这些损耗,挑选更高光学质量的 PPKTP 晶体,可以有效地提高倍频转换效率。此外,由于晶体对波长的限制,需要对目前倍频器的热稳定性进行改善。将 PPKTP 晶体的球型凸面加工成平面,倍频腔内腰斑半径的选择将更加灵活,可以通过进一步放宽聚焦条件,在略损失倍频效率的条件下,提高倍频系统整体的热稳定性。

参 考 文 献

- 1 Guan H, Guo B, Huang G L, *et al.*. Stabilization of the 397 nm and 866 nm external cavity diode lasers for cooling a single calcium ion [J]. *Opt Commun*, 2007, 274(1): 182-186.
- 2 Wolfgramm F, Cerè A, Beduini F A, *et al.*. Squeezed-light optical magnetometry[J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 105(5): 053601.
- 3 Appel J, Figueroa E, Korystov D, *et al.*. Quantum memory for squeezed light[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 100(9): 093602.
- 4 Jia X J, Yan Z H, Duan Z Y, *et al.*. Experimental realization of three-color entanglement at optical fiber communication and atomic storage wavelengths[J]. *Phys Rev Lett*, 2012, 109(25): 253604.
- 5 Anderson U L, Neergaard-Nielson J S. Heralded generation of a micro-macro entangled state[J]. *Phys Rev A*, 2013, 88(2): 022337.
- 6 Li Zhixiu, Yang Wenhui, Wang Yajun, *et al.*. Optimal design of single-frequency laser system for 795 nm squeezed light source[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(9): 0902002.
李志秀, 杨文海, 王雅君, 等. 用于 795 nm 压缩光源的单频激光系统的优化设计[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0902002.
- 7 Guo Shanlong, Han Yashuai, Wang Jie, *et al.*. Investigation of quasi-phase-matching frequency doubling of 1560 nm laser by use of PPLN and PPKTP crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0319001.
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.
- 8 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.
- 9 Pizzocaro M, Calonico D, Pastor P C, *et al.*. Efficient frequency doubling at 399 nm[J]. *Appl Opt*, 2014, 53(16): 3388-3392.
- 10 Cruz L S, Cruz F C. External power-enhancement cavity versus intracavity frequency doubling of Ti:sapphire lasers using BIBO[J]. *Opt Express*, 2007, 15(19): 11913-11921.
- 11 Han Y S, Wen X, Bai J D, *et al.*. Generation of 130 mW of 397.5 nm tunable laser via ring-cavity-enhanced frequency doubling[J]. *J Opt Soc Am B*, 2014, 31(8): 1942-1947.

- 12 Wen X, Han Y S, Bai J D, *et al.*. Cavity-enhanced frequency doubling from 795 nm to 397.5 nm ultra-violet coherent radiation with PPKTP crystals in the low pump power regime[J]. *Opt Express*, 2014, 22(26): 32293–32300.
- 13 Ast S, Nia R M, Schönbeck A, *et al.*. High-efficiency frequency doubling of continuous-wave laser light[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(17): 3467–3469.
- 14 Deng X, Zhang J, Zhang Y C, *et al.*. Generation of blue light at 426 nm by frequency doubling with a monolithic periodically poled KTiOPO₄ [J]. *Opt Express*, 2013, 21(22): 25907–25911.
- 15 Targat R L, Zondy J J, Lemonde P. 75%-efficiency blue generation from an intracavity PPKTP frequency doubler[J]. *Opt Commun*, 2005, 247(4): 471–481.
- 16 Wiechmann W, Kubota S, Fukui T, *et al.*. Refractive-index temperature derivatives of potassium titanyl phosphate[J]. *Opt Lett*, 1993, 18(15): 1208–1210.
- 17 Yang W H, Wang Y J, Zheng Y H, *et al.*. Comparative study of the frequency-doubling performance on ring and linear cavity at short wavelength region[J]. *Opt Express*, 2015, 23(15): 19624–19633.
- 18 Torabi-Goudarzi F, Riis E. Efficient CW high-power frequency doubling in periodically poled KTP[J]. *Opt Commun*, 2003, 227(4): 389–403.
- 19 Liao Z M, Payne S A, Dawson J, *et al.*. Thermally induced dephasing in periodically poled KTP frequency-doubling crystals[J]. *J Opt Soc Am B*, 2004, 21(12): 2191–2196.
- 20 Boulonger B, Rousseau I, Fève J P, *et al.*. Optical studies of laser-induced gray-tracking in KTP[J]. *IEEE J Quantum Elect*, 1999, 35(3): 281–286.

栏目编辑：史 敏