

文章编号: 1007-6654(2014)04-0271-04^①

利用外腔谐振倍频产生 780 nm 原子吸收线明亮振幅压缩光

万振菊, 冯晋霞[†], 孙志妮, 要立婷, 张宽收

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

摘要: 采用连续单频 1.56 μm 激光光源作为泵浦光, 通过周期极化铌酸锂晶体外腔倍频过程实验制备出位于原子吸收波线的 780 nm 明亮振幅压缩态光场。在利用 2 个模清洁剂过滤基频光的强度噪声、使之在分析频率 4 MHz 处达到散粒噪声的基础上, 利用谐振倍频获得输出功率为 10 mW、转换效率达 40% 的倍频光, 实测的 780 nm 明亮振幅压缩光的压缩度为 0.6 dB。

关键词: 明亮振幅压缩光; 外腔谐振倍频; 噪声降低

中图分类号: O437.1

文献标识码: A

DOI: 10.3788/ASQO20142004.0271

0 引言

连续变量压缩态光场作为量子信息的基本信息单元和通信载体, 是连续变量量子信息的重要资源, 它的产生一直是该领域最基础和热点研究内容之一。连续变量压缩态光场不仅可以用于突破散粒噪声的精密测量、量子非破坏测量等量子测量领域; 同时也是量子信息领域的重要资源, 通过将两个连续变量单模压缩态光场在分束器上耦合可以获得连续变量纠缠态光场, 被广泛应用于量子通信和量子计算领域。

目前制备连续变量压缩态光场的方法有很多种, 采用光学参量振荡技术、光学参量放大技术来获得连续变量压缩态光场是行之有效的途径之一^[1-4]。目前利用该技术已获得压缩度高达 12.7 dB 的压缩态光场^[5]。利用谐振倍频这一二阶非线性光学过程, 也可以获得连续变量压缩态光场。与光学参量振荡过程相比, 其优点在于可以

获得波长更短的压缩态, 不需要注入信号光就可以获得明亮压缩光, 且装置简单有利于实际应用。2002 年澳大利亚 Bachor 小组和丹麦 Buchhave 小组分别利用 1 064 nm 连续单频激光泵浦由周期极化铌酸锂 (PPLN) 晶体和周期极化磷酸钛氧钾 (PPKTP) 晶体构成的倍频腔, 均获得 0.6 dB 绿光倍频光压缩^[6,7]; 山西大学光电研究所分别采用 PPKTP 和 MgO:PPLN 晶体外腔谐振倍频获得了 0.6 dB 和 0.9 dB 的倍频绿光压缩态光场^[8,9]。

本文中, 我们采用连续单频 1.56 μm 激光泵浦由 PPLN 晶体构成的倍频腔, 通过外腔谐振倍频过程获得与原子吸收线相匹配的 780 nm 明亮压缩态光场。该波段非经典光场的获得, 可以为非经典光场与原子相互作用、原子的操控以及量子存储等研究提供有效的量子态光源。

① 收稿日期: 2014-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(61227015); 国家自然科学基金创新研究群体(61121064); 国家青年基金(11204167); 山西省自然科学基金(2012011003-1)

作者简介: 万振菊(1989-), 女, 山西朔州人, 硕士研究生, 主要从事量子光学与激光技术的研究。E-mail: wzj992170128@163.com

[†] 通信作者: E-mail: fengjx@sxu.edu.cn

1 实验过程及结果

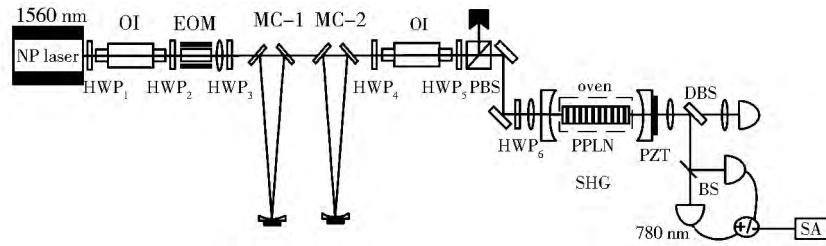


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup
图 1 外腔谐振倍频产生明亮振幅压缩光实验装置

图 1 为利用外腔谐振倍频产生 780 nm 明亮振幅压缩光的实验装置。抽运光源是输出功率为 2 W 的 1.56 μm 连续单频光纤激光器 (NP Photonics 公司); 半波片 (HWP) 用来控制激光的偏振方向; 光隔离器 (OI) 用来防止由光学元件反射的激光反馈回激光器, 保证激光器稳定运转。由于光纤激光器输出的激光有远高于散粒噪声基准的强度噪声, 实验中首先采用一个自行设计的 1.56 μm 模式清洁剂 (MC-1) 降低抽运光的强度噪声, 该模式清洁剂是腔长为 1.1 m 的无源三镜环形谐振腔, 谐振腔精细度为 500。利用 Pound-Drever-Hall (PDH) 锁腔技术将 1.56 μm 模式清洁器的腔长锁定在基频光共振频率处, 用电光调制器 (EOM) 为激光加载高频调制信号, 用于锁腔系统。当把 MC-1 腔长锁定后, 1.56 μm 抽运光的透射率为 80%, 抽运光的强度噪声在分析频率 9 MHz 处达到散粒噪声基准。为了进一步降低抽运光的强度噪声, 采用同样参数的第二个模式清洁剂 (MC-2), 当把 MC-2 腔长锁定后, 1.56 μm 抽运光的透射率仍为 80%, 抽运光的强度噪声在分析频率 4 MHz 处达到散粒噪声基准。图 2 为 1.56 μm 抽运激光的强度噪声曲线, 曲线 a 为散粒噪声基准, 曲线 b 为抽运光本身强度噪声曲线, 在 0-20 MHz 范围内均高于散粒噪声 20 dB 以上, 曲线 c 和 d 分别是抽运光经过 MC-1 和 MC-2 的强度噪声曲线。可以看出通过模式清洁剂二次过滤, 抽运光的强度噪声最终在分析频率为 4 MHz 处达到散粒噪声基准。

谐振倍频腔是由两个曲率半径为 30 mm 的平凹镜构成的两镜驻波腔, 输入耦合镜的平面对

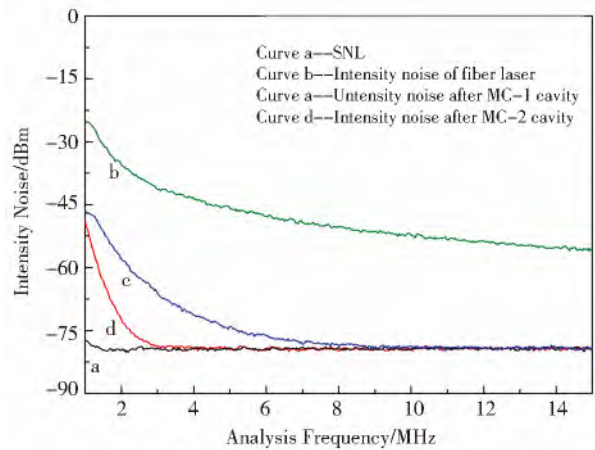


Fig. 2 The intensity noise of 1.56 μm laser

图 2 1.56 μm 抽运激光光源强度噪声特性

抽运基频光镀减反膜 ($R_{1.56 \mu m} < 1\%$), 其凹面对抽运基频光镀部分反射膜、对倍频光镀高反膜 ($T_{1.56 \mu m} = 4.3\%$, $R_{780 \text{ nm}} > 99.8\%$); 输出耦合镜的平面对倍频光镀减反膜 ($R_{780 \text{ nm}} < 1\%$), 其凹面对抽运基频光镀高反膜、对倍频光镀高透膜 ($R_{1.56 \mu m} > 99.8\%$, $T_{780 \text{ nm}} > 90\%$)。倍频腔的光学腔长为 56 mm。实验中采用尺寸为 1 mm × 10 mm × 20 mm 的 PPLN 晶体作为倍频晶体, PPLN 晶体的通光面镀基频光和倍频光减反膜 ($R_{1.56 \mu m \& 780 \text{ nm}} < 0.2\%$)。PPLN 晶体置于控温炉中, 用自制的控温精度为 0.003 °C 的高精度温度控制仪控制。利用一个焦距为 70 mm 的聚焦透镜将抽运光聚焦至 PPLN 晶体的中心位置, 聚焦腰斑为 65 μm, 使抽运光与倍频腔实现模式匹配。实验中, 模式匹配率达到 99%。当将 PPLN 晶体温度控制在 120 °C, 采用锁相电子伺服系统将倍频腔腔长锁定在抽运光共振频率处, 实验获得了稳定的倍频 780 nm 连续单频激光输出。当

抽运光为 25 mW 时,780 nm 倍频激光的输出功率为 10 mW,转换效率达 40%。考虑到更大的倍频光功率会使测量激光噪声的探测器饱和,在实验中没有继续增加抽运光功率。

在获得了较高转换效率的谐振倍频基础上,采用一对自制的平衡零拍探测装置测量倍频光振幅噪声功率。所用光电探测器的型号为滨松公司生产 S5972。图 3 为倍频光的输出功率为 10 mW 时,实验测量的倍频光的振幅噪声功率谱及相应的散粒噪声基准(图曲线 a 为散粒噪声,b 为振幅噪声)。从图 3 可以看出,当分析频率大

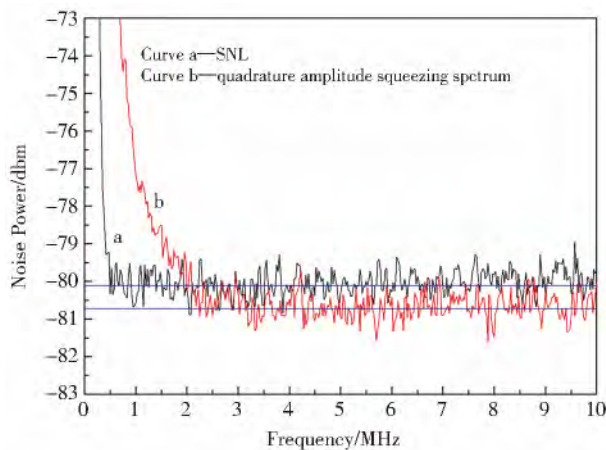


Fig. 3 The quadrature amplitude squeezing of second harmonic

图 3 倍频光的正交振幅分量噪声谱

于 4 MHz 时,倍频光开始出现压缩,实测的 780 nm 光场的振幅压缩度为 0.6 dB。考虑到探测器量子效率及探测光路的传输效率,总的探测效率为 82%,由此可以推算出倍频光实际输出的振幅压缩度为 0.8 dB。

2 总结

利用连续单频 1.56 μm 光纤激光器作为抽运源,泵浦由 PPLN 晶体和两镜驻波腔构成的倍频器,通过外腔谐振倍频,获得稳定输出的 780 nm 激光。当抽运光为 25 mW 时,780 nm 倍频激光的输出功率为 10 mW,倍频转换效率达 40%。利用自零拍探测系统测量倍频光振幅噪声功率,当分析频率大于 4 MHz 时,实测的 780 nm 光场的压缩度为 0.6 dB。考虑到探测效率,倍频光实际输出的振幅压缩度为 0.8 dB。通过进一步优化实验系统,包括提高腔镜以及晶体的镀膜质量,把由分离原件构成的倍频腔改为半整块腔、优化输入、输出耦合镜的透射率等,可使实验系统小型化,并提高 780 nm 光场的压缩度。该系统的激光波长分别位于量子信息处理过程中的量子态传输波段与原子存储波段,可望构建有效的量子信息网络系统。

参考文献:

- [1] WU L A, XIAO M, KIMBLE H J. Squeezed States of Light from an Optical Parametric Oscillator[J]. *J Opt Soc Am B*, 1987, **4**(10):1465-1475.
- [2] 彭堃堃,黄茂全,刘晶,等. 双模光场压缩态的实验研究[J]. *物理学报*, 1993, **42**(7):1079-1085.
- [3] BREITENBACH G, MULER T, PEREIRA S F, et al. Squeezed Vacuum from a Monolithic Optical Parametric Oscillator[J]. *J Opt Soc Am B*, 1995, **12**(11):2304-2309.
- [4] LAM P K, RALPH T C, BUCHLER B C, et al. Optimization and Transfer of Vacuum Squeezing from an Optical Parametric Oscillator[J]. *J Opt B: Quantum Semiclass Opt*, 1999, **1**(4):469-474.
- [5] MEHMET M, AST S, EBERLE T, et al. Squeezed Light at 1550 nm with a Quantum Noise Reduction of 12.3 dB[J]. *Opt Lett*, 2011, **19**(25):25763-25772.
- [6] LAWRENCE M J, BYER R L, et al. Squeezed Singly Resonant Second Harmonic Generation in Periodically Poled Lithium Niobate[J]. *J Opt Soc Am B*, 2002, **19**:1592-1598.
- [7] ANDERSEN U I, BUCHHEVE P. Green Bright Squeezed Light from a Cw periodically Poled KTP Second Harmonic Generator[J]. *Opt Express*, 2002, **10**:887-892.
- [8] ZHANG S J, LI Y M, LIU J L, et al. Investigation of Fundamental and Second Harmonic Squeezed Lights from a Singly

Resonant PPKTP Frequency Doubler. [J]. *J Phys B: At Mol Opt Phys*, 2006, **39**: 4163-4168.

- [9] KONG D H, LI Z Y, WANG X Y, *et al.* Efficient Generation of Squeezed Light Based on MgO-doped Periodically Poled LiNbO₃ [J]. *Chin Phys Lett*, 2014, **31**(1): 014208.

Generation of Bright Amplitude Squeezed Light at 780 nm from an Extra-cavity Frequency Doubling

WAN Zhen-ju, FENG Jin-xia, SUN Zhi-ni, YAO Li-ting, ZHANG Kuan-shou

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

Abstract: Bright amplitude squeezed light at 780 nm that was the D₂ line of rubidium atom was generated from a frequency doubler with a periodically poled lithium niobate crystal. The frequency doubler was by a continuous-wave single frequency 1.56 μm fiber laser. Based on the intensity noise of fiber laser was suppressed by two mode cleaners and reached to the shot-noise-limit at the analysis frequency of 4 MHz. At the pump power of 25 mW, the output power of 780 nm was 10 mW with the conversion efficiency of 40%, and the measured bright amplitude squeezed state at 780 nm was 0.6 dB.

Key words: bright amplitude squeezed light; extra-cavity resonant doubling; noise suppressed