

对应于铯原子 D_1 线连续可调谐正交压缩态光场的制备*

张岩¹⁾, 蔚娟¹⁾, 杨鹏飞¹⁾, 张俊香^{2)†}

1) (西安工业大学, 光电工程学院, 西安 710021)

2) (浙江大学物理系, 光学研究所, 杭州 310007)

摘要

铯原子 D_1 线的非经典光由于其波长接近于量子点的独特优势, 在固态量子信息网络的发展中有着重要的应用前景. 在之前的工作中, 利用两镜连续简并光学参量振荡器中的参量下转换过程, 制备出 2.8 dB 正交压缩真空态光场. 然而, 所产生光场的压缩度较低, 对于对压缩光具有实用意义的可调谐性能也未做进一步探究. 理论分析表明, 光学参量振荡器后腔镜对信号光透射率的增加及内腔损耗的减小可以提高压缩度. 因此, 本文在该研究基础上, 通过使用高光洁度腔镜及优化腔镜镀膜参数等方式对光学参量振荡器进行改良, 降低了光学参量腔阈值, 获得压缩度为 3.3 dB 的单模正交压缩真空光. 当光学参量腔运转为参量反放大状态时, 在系统稳定运行的情况下, 制备的明亮压缩态光场能够连续调谐 80 MHz, 为其在量子信息网络中的应用奠定了良好基础.

关键词: 非线性光学; 正交压缩态光场; 连续可调谐; 铯原子 D_1 线

PACS: 42.50.-p, 42.65.Lm

† 通信作者. E-mail: junxiang_zhang@zju.edu.cn 电话: 17826848828

第一作者. E-mail: 706847059@qq.com

***基金:** 陕西省教育厅自然科学研究项目(批准号: 18JK0386, 21JK0694) 和国家自然科学基金青年项目(批准号: 62105256) 资助的课题.

1 引言

量子信息网络具有高效性和高安全性等优势^[1-5], 近年来受到人们的广泛关注. 碱金属原子及对应吸收线的非经典光场是量子信息网络中实现量子信息界面与传输的重要资源之一, 理论上可以利用碱金属原子来存储和处理量子信息, 用非经典光场的量子远程传态建立起量子通道, 实现量子信息的高效传递. 为此, 需要非经典光场的波长具备一定的可调谐性来精确匹配原子吸收线; 而非经典光场的压缩度决定了量子信息网络的性能^[6], 需要进一步降低光场噪声,

以提高信息传输的保真度。因此，有必要制备对应于碱金属原子吸收线的可调谐高压缩度非经典光场。

近些年，随着低损耗镀膜技术、非线性晶体生长技术及高效探测技术的发展，使得利用光学参量振荡器(optical parametric oscillator, OPO) 中的参量下转换过程成为制备高压缩度非经典光的最有效方法之一^[7, 8]。2010 年，德国 Schnabel 小组^[9] 利用周期极化磷酸氧钛钾(periodically poled KTP, PPKTP) 晶体中的参量下转换过程得到压缩真空态光场，经过Sagnac 干涉仪进行压缩增强后测得12.7 dB 压缩；次年，该小组利用一个半整体OPO 制备了12.3 dB 的1550 nm 压缩真空态光场^[10]。2016 年，李强等人^[11] 利用单个非简并光学参量放大器制备了纯度为0.993 的双模压缩态。杨文海等人^[12] 于2017 年利用光学参量放大器(optical parametric amplifier, OPA) 获得了12.6 dB 的明亮压缩态光场。2019 年，Sun 等人^[13] 利用OPO 获得了13.8 dB 压缩真空态光场。目前实验中观测到的最高压缩度由Schnabel 小组^[14] 保持，他们利用一个由PPKTP 晶体构建的半整块OPO 获得1064 nm 压缩真空光，将压缩真空光注入定制的高量子效率(99.5%) 光电探测器中，测得15 dB 压缩。然而，以上制备的高压缩度非经典光场的工作波长都远离碱金属原子吸收线。

目前，实验中利用OPO 制备碱金属原子吸收线非经典光的研究主要聚焦在铷原子D₁ 线及铯原子D₂ 线。在波长对应于铷原子D₁ 线的795 nm 处，日本 Tanimura 等人^[15] 于2006 年获得2.75 dB 压缩光。澳大利亚国立大学Hétet 等人^[16] 于2007 年制备约5 dB 压缩真空。西班牙Predojević 等人^[17] 以半导体激光器作为光源，通过OPO 获得2.5 dB 压缩光。2016 年，山西大学韩亚帅等人^[6] 在795 nm 处测得5.6 dB 压缩。在波长对应于铯原子D₂ 线的852 nm 附近，

Furusawa 小组^[18, 19] 分别于2006 年和2007 年在860 nm 处测得7 dB 和9 dB 压缩. 法国Burks 等人^[20] 在50 kHz 低频处测得大于50% 压缩. 相对于铷原子D₁ 线和铯原子D₂ 线, 铯原子D₁ 线由于其独特优势^[21], 有力保障了基于原子与固态系统相干界面的发展. 然而, 在这一波段开展正交压缩态光场制备的相关研究工作却鲜见报道.

目前仅有张俊香研究小组于2017 年进行了利用光学参量下转换过程制备铯原子D₁ 线非经典光的相关研究: 光源为一台波长锁定于铯原子D₁ 线的连续单频钛宝石激光器, 输出的激光通过两镜倍频腔(second harmonic generation cavity, SHG) 后产生447.3 nm 蓝光, 将蓝光注入由PPKTP 晶体构建的两镜连续简并OP0 中进行参量下转换, 获得了压缩度为2.8 dB 的单模正交压缩真空光^[22]. 之后又利用半整体结构OP0 将压缩度提高至4.1 dB, 并将压缩光连续调谐了50 MHz^[23]. 通过理论分析发现, 增大光学参量振荡器后腔镜对信号光透射率及减小内腔损耗, 可以有效提高压缩度^[19]. 本文在利用两镜OP0 制备压缩光的基础上, 对所用腔镜进行了改进: 选用高光洁度镜片作为OP0 腔镜以减小散射损耗, 提高了输出耦合镜对信号光的透射率以增加OP0 逸出效率, 从而提高非经典光压缩度; 同时将OP0 设计为双共振, 以保证较小的阈值抽运功率^[24], 更适合于实际应用. 实验中测得OP0 阈值为28 mW, 在抽运光功率为15 mW 时, 测得3.3 dB 的正交压缩真空. 虽然压缩度提高不多, 但将压缩光的连续可调谐范围提升至80 MHz, 为其在量子信息网络中的应用奠定了基础.

2 制备连续可调谐正交压缩态光场的实验装置及实验结果

2.1 实验装置

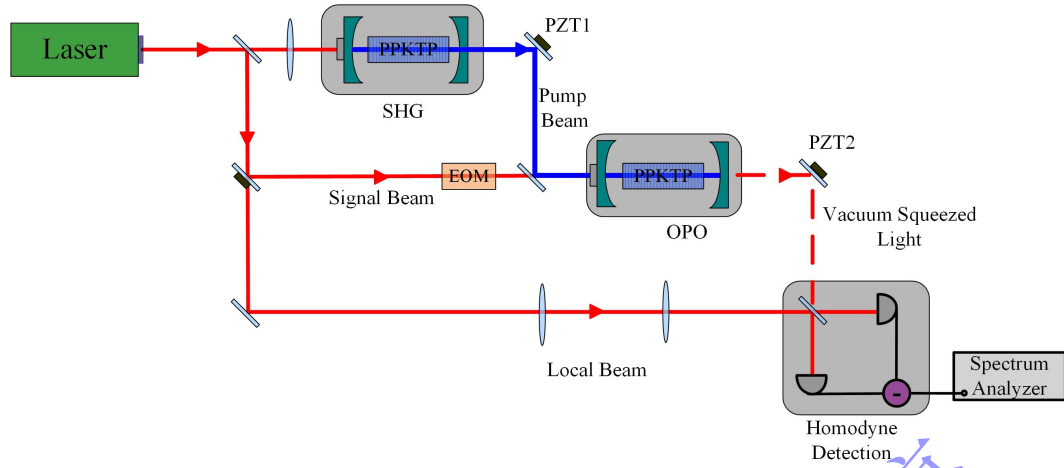


图 1 实验装置图

Fig.1. Experimental setup.

图1 为制备连续可调谐正交压缩态光场的实验装置示意图，主要由以下四部分构成：钛宝石激光器、SHG、OPO 和平衡零拍探测装置(homodyne detection). 钛宝石激光器(Coherent, MBR110) 输出波长对应于铯原子 D_1 线的894.6 nm 红外光，经过单模光纤进行空间模式清洁后功率为600 mW，分为三路分别注入SHG、OPO 和平衡零拍探测器中. 输入SHG(具体参数见文献[25]) 红外光功率为120 mW，通过倍频过程产生的447.3 nm 蓝光经过光学隔离器后功率为32 mW.

OPO 为近共心两镜驻波腔结构，由之前的基频光单共振改为基频光和抽运光双共振，采用高光洁度腔镜(表面质量10-5) 以减少散射损耗. 前腔镜曲率半径为50 mm，对894.6 nm 光高反，对447.3 nm 光透射率为10%；后腔镜曲率半径为50 mm，对894.6 nm 光透射率由之前的5%^[22] 提高为9.5%，对447.3 nm 光高反，腔长为102 mm. OPO 采用一块长度为10 mm 的一类PPKTP 晶体作为非线性介质，晶体温度由温度控制仪及帕尔贴元件精确控制. 将辅助信号光注入OPO，利用 Pound-Drever-Hall 稳频技术^[26] 锁定腔长，OPO 输出的明亮信号光用于后续光路及平衡零拍探测的调节.

平衡零拍探测装置由一个50/50 分束镜、集成了两个独立光电探头和一个电

子信号减法器的平衡零拍探测器(Thorlabs, PDB210A) 组成. 将压缩态光场与相干本底光在50/50 分束器上进行干涉耦合, 分束器的两束出射光分别注入平衡零拍探测器的两个探头, 利用电子信号减法器将两个探头测得电流相减后输入谱仪来观测压缩光的噪声起伏. 本底光与压缩光的干涉效率决定了观测到的压缩度, 仔细调节两束光在50/50 分束器的耦合, 获得95% 的干涉效率.

2.2 实验结果及分析

实验测得OP0 阈值为28 mW, 比之前工作中搭建的OP0^[22] 阈值降低了11 mW. 在没有抽运光注入时, OP0 精细度为62.6, 可以推算出其内腔损耗为0.53%. 当注入15 mW 抽运光, 晶体温度为37.6 °C 时, 辅助信号光的增益为6.4 倍. 将谱仪的分析频率、分辨率带宽和视频带宽分别设置为1 MHz 、30 kHz 及100 Hz. 根据以上实验参数, 我们可利用(1) 式在理论上计算出平衡零拍探测装置测得正交压缩度^[19]:

$$V_{-} = 1 - \eta \xi_1^2 \zeta \rho \frac{4\sigma}{(1 + \sigma)^2 + 4\Omega^2}, \quad (1)$$

其中 η 、 ξ_1 和 ζ 分别代表平衡零拍探测器的量子效率(86%)、压缩光与本底光的干涉耦合效率(95%) 及光路传输效率(96%); $\rho = \frac{T}{T + L}$ 为OP0 逸出效率,

T 为OP0 后腔镜对信号光透射率, L 代表内腔损耗, 从(1) 式可以看出压缩度会随着后腔镜对信号光透射率增加及内腔损耗的减小而变大, 因此, 实验中所选透射率为10% 的高光洁度腔镜相较于之前工作中使用的5% 透射率普通腔镜,

理论上可以提高压缩度; $\sigma = \sqrt{\frac{P_p}{P_{th}}}$ 为归一化抽运光功率, P_p 和 P_{th} 分别为注入

抽运光功率和OP0 阈值; $\Omega = \frac{f}{\gamma}$ 为归一化频率, f 为谱仪分析频率,

$\gamma = \frac{c(T+L)}{2l}$ 为 OPO 衰减速率, l 为腔长. 将实验参数代入 (1) 式中, 计算出可

观测到压缩度为 5.1 dB. 但是由于 447.3 nm 抽运光注入后, 晶体对抽运光的吸收会导致内腔损耗增大, 因此实际观测到的压缩度会低于理论值.

在实验中测量压缩真空时, 挡住注入 OPO 的信号光, 利用压电陶瓷 (piezo-electric transducer, PZT) 搜索腔长使抽运光在 OPO 中共振, 通过晶体中的参量下转换过程产生频率和偏振都简并的两束压缩真空态光场. 扫描本底光与压缩态光场的相对相位, 在谱仪上观测到噪声曲线如图 2 所示, 测得低于散粒噪声基准 (shot noise level, SNL) 3.3 dB 的压缩真空. 根据公式 (1) 可以反推出, 在注入抽运光后, OPO 的内腔损耗增加到 3.4%. 实验中平衡零拍探测的总探测效率 $\eta_{\text{det}} = \eta \xi_l^2 \zeta$, OPO 输出光场的实际压缩度 V_{sq} 与测量值 $V_{\text{sq,det}}$ 有以下关系^[27]:

$$V_{\text{sq}} = \frac{V_{\text{sq,det}} - 1 + \eta_{\text{det}}}{\eta_{\text{det}}} \quad (2)$$

总探测效率 η_{det} 为 74.5%, 根据 (2) 式, 则 V_{sq} 为 5.5 dB.

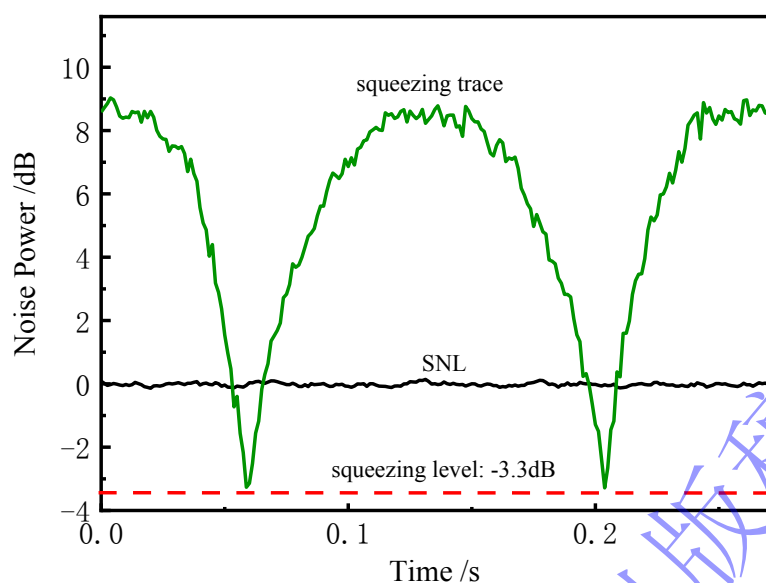


图2 抽运光功率为15 mW 时测得压缩真空的噪声曲线.

Fig. 2. Observed quantum noise for vacuum squeezed light at the pump power of 15 mw.

在量子信息网络的建设中，需要非经典光具有一定的可调谐性以精确匹配相应原子吸收线，因此在实验中对压缩光进行了调谐：注入信号光，将OP0 运转为OPA，并锁定腔长及抽运光与信号光相对相位，使OPA 运转在参量反放大状态，此时输出正交振幅压缩态光场。将钛宝石激光器的波长调至铯原子 D_1 吸收线的 $F = 4(6^2S_{1/2}) \rightarrow F' = 3(6^2P_{1/2})$ 超精细跃迁能级附近，利用一个5 Hz 低频三角波信号对激光器进行扫描，实现对抽运光、信号光及压缩光频率的调谐，并利用饱和吸收谱监视调谐范围。逐渐增大扫描三角波的信号幅度，在整个实验系统不失锁的情况下，激光器输出基频红外光的频率变化范围即为压缩光的可调谐范围。此时，通过搜索PZT2 来测量压缩光的正交振幅分量，实验结果如图3 所示。其中，图3(a) 为扫描钛宝石激光器时本底光的饱和吸收谱(saturation

absorption spectroscopy, SAS) 和OPA 的锁定信号. 可以看出, 在连续调谐80 MHz 时, 整个系统仍稳定运转, 此时测得明亮压缩光的噪声谱如图3(b) 所示, 获得约2.4 dB 正交振幅压缩.

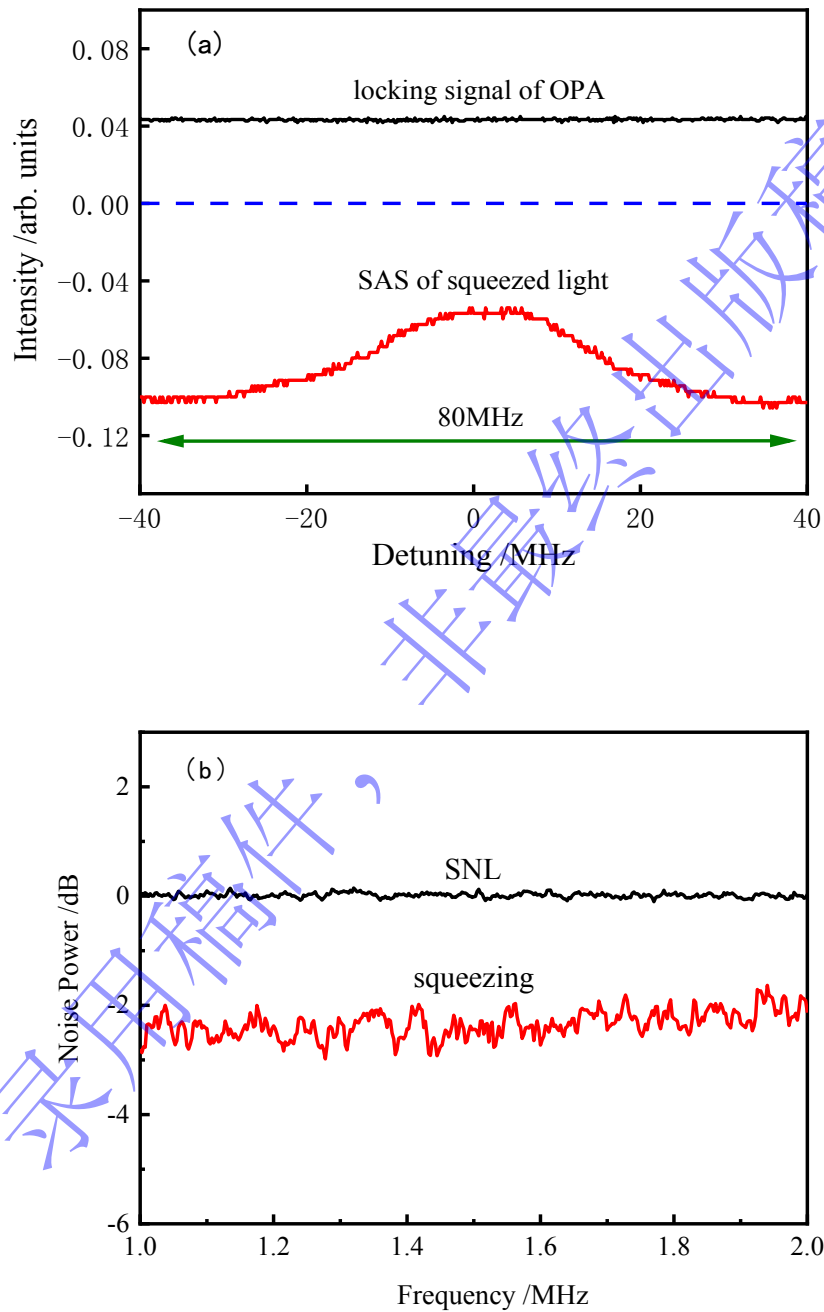


图3 (a) 明亮压缩光的可调谐性测量; (b) 调谐80 MHz 时测得压缩.

Fig. 3 (a) Continuously tunability of bright squeezed light when the laser

is scanned. (b) Squeezing trace when the laser is scanned 80 MHz.

3 结 论

通过增加后腔镜对信号光的透射率以及减小内腔损耗, 提升了利用 OP0 制备波长对应于铯原子 D_1 线非经典光的压缩度. 改良后 OP0 阈值为 28 mW, 在注入 15 mW 抽运光后, 在利用平衡零拍探测装置测得 3.3 dB 压缩真空, 通过计算得出光场的实际压缩度为 5.5 dB. 注入信号光将 OP0 运转为 OPA, 测量了输出明亮压缩光的可调谐性. 当激光器连续调谐 80 MHz 时系统运转稳定且压缩度保持不变, 为其后续在实际中的应用提供了保障.

参考文献

- [1] Kimble H J 2008 *Nature* **453** 1023
- [2] Chen P, Cai Y X, Cai X F, Shi L H, Yu X T 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 040301 (in Chinese) [陈鹏, 蔡有勋, 蔡晓菲, 施丽慧, 余旭涛 2015 物理学报 **64** 040301]
- [3] Nielsen M A, Chuang I L 2000 *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge: Cambridge University Press) p3
- [4] Gisin N, Ribordy G, Tittel W, Zbinden H 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 145
- [5] Mayers D 2001 *J. ACM* **48** 351
- [6] Han Y S, Wen X, He J, Yang B D, Wang Y H, Wang J M 2016 *Opt. Express* **24** 2350
- [7] Shi S P, Wang Y J, Yang W H, Zheng Y H, Peng K C 2018 *Opt. Letters* **43** 5411
- [8] Nie D D, Feng J X, Qi M, Li Y J, Zhang K S 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 094205(in Chinese) [聂丹丹, 冯晋霞, 戚蒙, 李渊骥, 张宽收 2020 物理学报 **69** 094205]
- [9] Eberle T, Steinlechner S, Bauchrowitz J, Handchen V, Vahlbruch H, Mehmet M, Muller-Ebhardt H, Schnabel R 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 251102
- [10] Mehmet M, Ast S, Eberle T, Steinlechner S, Vahlbruch H, Schnabel R 2011 *Opt. Express* **15** 25763
- [11] Li Q, Deng X W, Zhang Q, Su X L 2016 *Acta Optica Sin.* **36** 0427001(in Chinese) [李强, 邓晓玮, 张强, 苏晓龙 2016 光学学报 **36** 0427001]
- [12] Yang W H, Shi S P, Wang Y J, Ma W G, Zheng Y H, Peng K C 2017 *Opt. Letters*

- [13] Sun X C, Wang Y J, Tian L, Zheng Y H, Peng K C 2019 *Chin. Opt. Lett.* **17** 072701
- [14] Vahlbruch H, Mehmet M, Danzmann K, Schnabel R 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 110801
- [15] Tanimura T, Akamatsu D, Yokoi Y, Furusawa A, Kozuma M 2006 *Opt. Letters* **31** 2344
- [16] Hétet G, Glockl O, Pilypas K A, Harb C C, Buchler B C, Bachor H-A, Lam P K 2007 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **40** 221
- [17] Predojevic A, Zhai Z, Caballero J M, Mitchell M W 2008 *Phys. Rev. A* **78** 063820
- [18] Suzuki S, Yonezawa H, Kannari F, Sasaki M, Furusawa A 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 061116
- [19] Takeno Y, Yukawa M, Yonezawa H, Furusawa A 2007 *Opt. Express* **15** 4321
- [20] Burks S, Ortalo J, Chiummo A, Jia X J, Villa F, Bramati A, Laurat J, Giacobino E 2009 *Opt. Express* **17** 3777
- [21] Pinotsi D, Imamoglu A, 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 093603
- [22] Zhang Y, Liu J H, Ma R, Wang D, Han Y H, Zhang J X 2017 *Acta Optica Sin.* **37** 0519001(in Chinese) [张岩, 刘晋红, 马荣, 王丹, 韩宇宏, 张俊香 2017 光学学报 **37** 0519001]
- [23] Zhang Y 2017 Ph. D. Dissertation (Taiyuan: Shanxi University) (in Chinese) [张岩 2017 博士学位论文(太原: 山西大学)]
- [24] Wang J P, Zhang W H, Li R X, Tian L, Wang Y J, Zheng Y H 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 234204 (in Chinese) [王俊萍, 张文慧, 李瑞鑫, 田龙, 王雅君, 郑耀辉 2020 物理学报 **69** 234204]
- [25] Zhang Y, Liu J H, Wu J Z, Ma R, Wang D, Zhang J X 2016 *Opt. Express* **24** 19769
- [26] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, Hough J, Ford G M, Munley A J, Ward H 1983 *Appl. Phys. B* **31** 97
- [27] Schneider K, Bruckmeier R, Hansen H, Schiller S, Mlynek J 1996 *Opt. Letters* **21** 1396

Generation of Continuously Tunable Quadrature Squeezed Light Resonant on the cesium D₁ Line*

Zhang Yan¹⁾ Yu Juan¹⁾ Yang Pengfei¹⁾ Zhang Junxiang^{2)†}

1) (School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

2) (Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract

The non-classical light resonant on the cesium D₁ (894.6 nm) line has important applications in solid-state quantum information networks due to its unique advantages. The cesium D₁ line has a simplified hyperfine structure and can be used to realize a light-atom interface. In our previous work, we demonstrated 2.8 dB quadrature squeezed vacuum light at cesium D₁ line in an optical parametric oscillator(OPO) with a periodically poled KTP(PPKTP) crystal. However, the squeezing level is relatively low, and the tunability that has practical significance for squeezed light has not been further investigated. Theoretically, increase the transmittance of output mirror and decrease the intra-cavity loss of the OPO can improve the squeezing level. Here, we use super-polished and optimal coating cavity mirrors to improve the nonlinear process in OPO. We prepared 447.3 nm blue light from 894.6nm fundamental light by a second harmonic generation cavity(SHG). The SHG is a two-mirror standing-wave cavity with a PPKTP crystal as the nonlinear medium. The power of generated blue laser is 32 mW when the incident infrared power is 120 mW. Using the blue light to pump an OPO, we achieved quadrature squeezed vacuum light at cesium D₁ line. The OPO is a two-mirror standing-wave cavity with a PPKTP crystal. The threshold of OPO is reduced to 28mW. The squeezing level of generated quadrature squeezed vacuum light is increased to 3.3 dB when the pump power is 15mW. Taking into account the overall detection efficiency, the actual squeezing reaches 5.5 dB. We inject a weak signal beam into the OPO cavity to run it as an optical parametric amplifier(OPA), and test the tunability of squeezed light. The blue light and the squeezed light are tuned by using a low-frequency triangular wave signal to scan the Ti: sapphire laser. Gradually increase the amplitude of the scanning triangle wave signal, the generated bright squeezed light can be continuously tuned over a range around 80 MHz without losing the lock of the whole system. The generated squeezed light offering the possibility for the efficient coupling between the non-classical source and solid medium in the process of quantum interface.

Keywords: nonlinear optics; quadrature squeezed light field; continuously tunable; cesium D₁ line

*Project supported by the Natural Science Research Program of the Education Department of Shaanxi Province, China (Grant No. 18JK0386, 21JK0694) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62105256)