

对应于铯原子 D_1 线正交压缩真空态光场的制备

张 岩^{1,2}, 刘晋宏^{1,2}, 马 荣^{1,2}, 王 丹^{1,2}, 韩宇宏^{1,2}, 张俊香^{1,2}

¹山西大学光电研究所量子光学与量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006;

²山西大学极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006

摘要 对应于碱金属原子吸收线的非经典光是量子信息网络中重要光源之一, 近年来受到人们的广泛关注。而对应于铯原子 D_1 线的非经典光场由于其独特的波长在固态量子信息网络中有重要应用前景。采用连续单频钛宝石激光器作为光源, 将输出的锁定于铯原子 D_1 线的 894.6 nm 激光通过外腔倍频产生 447.3 nm 蓝光, 再用于抽运由周期极化磷酸氧钛钾 (PPKTP) 晶体作为非线性介质的连续简并光学参量振荡器, 获得铯原子 D_1 线的单模正交压缩真空光。光学参量振荡器阈值为 39 mW, 在注入抽运光功率为 30 mW 时, 利用平衡零拍探测装置测得 2.8 dB 正交压缩度。考虑到探测效率, 光学参量振荡器输出光场的实际压缩度为 4.4 dB。

关键词 非线性光学; 光学参量振荡器; 正交压缩真空态; 平衡零拍探测; 铯原子 D_1 线

中图分类号 O437.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0519001

Generation of Quadrature Squeezed Vacuum Light Field for Cesium D_1 Line

Zhang Yan^{1,2}, Liu Jinhong^{1,2}, Ma Rong^{1,2}, Wang Dan^{1,2}, Han Yuhong^{1,2}, Zhang Junxiang^{1,2}

¹State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

²Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract The non-classical light at alkali atomic absorption lines is one of the important resources for quantum information networks, and it gets more attentions recently. Because of the unique wavelength of the non-classical light field at cesium D_1 line, it has important application prospect in the field of solid-state quantum information networks. Continuous wave single frequency Ti: sapphire laser is used as light source. The 447.3 nm blue laser is generated by the output 894.6 nm laser locked at cesium D_1 line via frequency doubling of external cavity. The blue laser is used to pump continue wavelength degeneration optical parametric oscillator, and the nonlinear medium of the oscillator is periodically poled KTP (PPKTP) crystal. Then the simple module quadrature squeezed vacuum light at cesium D_1 line is obtained. The threshold of the optical parametric oscillator is 39 mW. When the pump power is 30 mW, quadrature squeezing degree measured by balanced homodyne detector is 2.8 dB. Taking account of detection efficiency, the actual squeezing degree of the output light field of optical parametric oscillator reaches 4.4 dB.

Key words nonlinear optics; optical parametric oscillator; quadrature squeezed vacuum state; balanced homodyne detection; cesium D_1 line

OCIS codes 190.4970; 190.4975

1 引 言

对应于碱金属原子吸收线的非经典光在许多领域有着重要的应用, 如量子存储^[1]、光与原子相互作用^[2]、原子系综之间的纠缠^[3]、光谱测量^[4]及量子信息网络^[5]等实验研究。量子信息网络由量子节点和量子

收稿日期: 2016-11-23; **收到修改稿日期:** 2016-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(11574188)、国家自然科学基金重点项目(11634008)、高等学校博士学科点专项科研基金博导类课题(20131401110013)、国家自然科学基金创新研究群体科学基金(61121064)

作者简介: 张 岩(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事量子光学方面的研究。E-mail: 706847059@qq.com

导师简介: 张俊香(1966—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光学、量子力学、量子光学、激光技术等方面的研究。

E-mail: junxiang@sxu.edu.cn(通信联系人)

传输通道所构成,而量子节点由原子或固态物质组成,其节点之间需通过光场建立量子传输与纠缠通道,进行高保真度传输以及量子纠缠态的分发。因此碱金属原子与相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。

目前实验上主要有两种方法产生对应于碱金属原子吸收线的非经典光,一种方法是通过基于原子系综的四波混频过程。1985年,Slusher R E等^[6]在钠原子系综中首次通过四波混频过程观测到压缩。2007年,McCormick C F等^[7]在铷原子 D_1 线观测到 3.5 dB 的强度差压缩。2009年,Marino A M等^[8]利用四波混频在铷原子系综中获得大于 4 dB 的纠缠光,并将纠缠光经过另一个铷原子气室,利用一个类似的四波混频过程,通过控制增益实现对纠缠光的可控延时。2013年和2014年,Wang D等^[9]和 Guo M J等^[10]在铯原子气体中利用相干四波混频过程得到 2.5 dB 的强度差压缩,并通过理论分析与实验比较,证明了在铯原子介质中由于大的基态超精细能级分裂,难以获得高压压缩度。2014年,Qin Z Z等^[11-12]在铷原子 D_1 线利用两个级联的四波混频过程实现了 3 束光的关联,并将强度差压缩从 4.5 dB/5.5 dB 的孪生光束提高到了 7 dB 的 3 束光;次年,该小组对影响压缩度的实验参数进行了详细的研究。另一种也是最普遍的获得非经典光的方法是通过基于晶体非线性效应的参量过程。1986年,Wu L A等^[13]利用掺氧化镁铈酸锂晶体构建的光学参量腔首次通过参量下转换过程观测到压缩。近年来,由于非线性晶体和镀膜技术的发展,以及高量子效率探测器的出现,使得通过参量下转换产生压缩光的压缩度得到了很大提高。1997年,潘庆等^[14]利用磷酸氧钛钾(KTP)晶体构成的半整体腔获得 7 dB 的强度差压缩。2010年,Eberle T等^[15]利用一块周期极化磷酸氧钛钾(PPKTP)晶体构成的整体腔获得 12.7 dB 压缩光。2015年,Zhou Y Y等^[16]利用一块楔形二类 KTP 晶体构成的半整块光学参量腔获得 8.4 dB 纠缠光。目前最高压缩度由 Vahlbruch H等^[17]测得,他们将 532 nm 绿光注入一个由 9.3 mm 长 PPKTP 晶体构建的半整块双共振光学参量腔中获得 1064 nm 压缩真空光,利用定制的高量子效率(99.5%)光电二极管镓砷(InGaAs)测得 15 dB 压缩真空。而利用光学参量过程产生对应于碱金属原子吸收线非经典光的实验研究主要集中在铯原子 D_2 线和铷原子 D_1 线。Suzuki S等^[18]和 Takeno Y等^[19]分别在 2006年和2007年在接近铯原子 D_2 线的 860 nm 处获得 7 dB 和 9 dB 的压缩。2009年,Burks S等^[20]在对应于铯原子 D_2 线的 852 nm 处测得大于 3 dB 的低频(50 kHz)压缩。2006年,Tanimura T等^[21]在对应于铷原子 D_1 线的 795 nm 处测得 2.75 dB 压缩。2007年,Hetet G等^[22]获得大于 5 dB 的压缩光。2008年,Predojević A等^[23]利用半导体激光测得了大于 2 dB 的压缩。2016年,Han Y S等^[24]在 795 nm 处测得 5.6 dB 压缩。

相比于铯原子 D_2 线,铷原子 D_1 线有其独特优点:它的超精细分裂能级结构简单且间距较大,有利于实现不受周围能级影响的光和原子相干界面;同时其波长又对应于砷化镓(InAs)量子点激子发射的频率区域,为基于原子和固态系统的相干界面的发展提供可能^[25]。因此制备对应于铷原子 D_1 线的非经典光场在固态量子信息网络发展中有重要应用前景。目前这一波段正交压缩光的制备还未有进展。尽管在铷原子系综中通过四波混频过程直接获得对应于铷原子 D_1 线的 2.5 dB 强度差压缩光^[9],但由于压缩度受能级分裂较大的限制,难以获得高压压缩度光场以满足下一步实验需要。因此在本文利用光学参量过程制备了对应于铷原子 D_1 线的非经典光,获得 2.8 dB 正交压缩。考虑到 76.1%的探测效率,实际输出光场的压缩度为 4.4 dB。

2 制备正交压缩真空态光场的实验装置与实验结果

2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示,主要由 5 部分组成:光源、倍频腔(SHG)、简并光学参量振荡器(OPO)、模式清洁剂(MC)和平衡零拍探测系统。此外,装置中还包含压电陶瓷(PZT)和电光调制器(EOM)。光源是由功率为 10 W 的全固态连续单频 532 nm 激光器抽运的钛宝石激光器(Coherent MBR110),通过内部锁定环路稳频在对应于铷原子 D_1 线的 894.6 nm 处^[26],输出功率为 800 mW,线宽为 40 kHz。钛宝石激光器输出光经单模光纤用以提高红外光与光学谐振腔的空间模式匹配效率。光纤输出功率为 600 mW,分为 3 路分别注入 SHG、OPO 和 MC 中。3 个腔分别固定在定制的光学平台上,用来隔离噪声以提高系统稳定性。

SHG 采用近共心两镜驻波腔结构,前腔镜的曲率半径为 30 mm,凹面对 894.6 nm 光的透射率为 5%,对 447.3 nm 光高反;后腔镜曲率半径为 50 mm,凹面对 447.3 nm 光的透射率为 95%,对 894.6 nm 光高反,

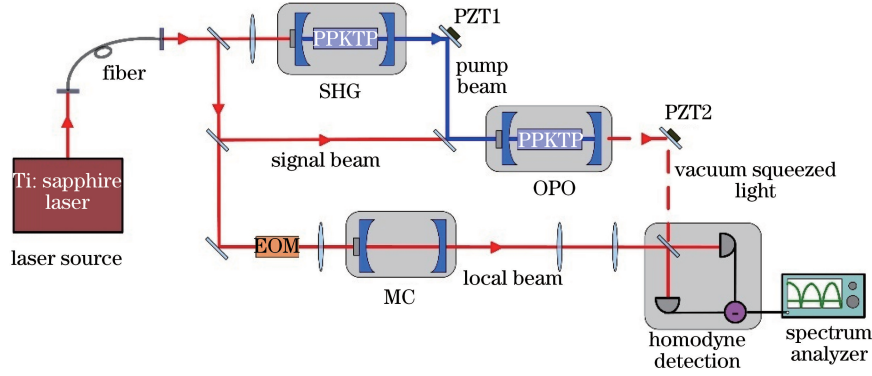


图 1 实验装置图

Fig. 1 Diagram of experimental setup

两个腔镜背面均镀双色增透膜,腔长为 83 mm,由一块尺寸为 1 mm×2 mm×10 mm 的一类 PPKTP 晶体作为 SHG 的非线性介质(SHG 的详细参数见文献[27])。由于 OPO 反馈光对 SHG 的锁定影响较大,因此输出的蓝光经过一个光学隔离器以保证 SHG 的稳定运转。注入 SHG 的红外光功率为 150 mW 时,产生的蓝光经过光学隔离器后功率为 45 mW,注入 OPO 作为抽运光。

OPO 采用 894.6 nm 光共振、447.3 nm 光两次穿过的近共心两镜驻波腔结构,前腔镜曲率半径为 30 mm,对 894.6 nm 光高反,对 447.3 nm 光的透射率为 20%;后腔镜曲率半径为 30 mm,对 894.6 nm 光的透射率为 5%,对 447.3 nm 光高反,腔长为 62 mm。非线性晶体是尺寸为 1 mm×2 mm×10 mm 的一类 PPKTP 晶体,晶体的两端镀有双色增透膜,置于紫铜制的晶体炉中,由帕尔贴元件及温度控制仪控制晶体温度,控温精度为 0.1 ℃。447.3 nm 抽运光注入 OPO 后,通过晶体的参量下转换过程产生频率和偏振都简并的两束信号光,其相互作用哈密顿量表示^[28]: $H_1 = i\hbar [\eta^* a^2 - \eta (a^+)^2]$, 式中 $\eta = \chi^{(2)}\beta$, $\chi^{(2)}$ 为二阶非线性极化率, β 为抽运场复参量, a 和 a^+ 分别表示下转换信号场的湮灭算符和产生算符。在 OPO 未注入信号场的情况下,系统由初始真空态经 t 时刻演化到正交压缩真空态,相应的正交压缩算符为 $S(\xi) = U(t) = \exp\{[\xi^* a^2 - \xi (a^+)^2]/2\}$, 其压缩参数 ξ 正比于抽运场幅度、二阶非线性极化率 $\chi^{(2)}$ 、以及相互作用时间 t , 即 $\xi = 2t\chi^{(2)}\beta = r\exp(i\theta)$, 式中 $0 \leq r < \infty$, 描述压缩的强弱; $0 \leq \theta \leq 2\pi$, 描述压缩方向。

实验中由于 OPO 后续光路及平衡零拍探测的调节都需要明亮光实现,因此注入一束辅助信号光并用一台锁相放大器锁定 OPO 腔长。锁相放大器输出频率为 19.5 kHz、幅度为 0.02 V 的低频正弦调制信号到 OPO 的压电陶瓷上,同时扫描腔长,将透射信号输入锁相放大器获得鉴频信号并输入比例积分微分(PID)进行积分后利用高压放大器驱动压电陶瓷,此时在不扫描腔长的情况下通过鉴频信号对频率抖动的纠偏特性实现腔长的锁定。OPO 输出的明亮光用来模拟压缩光场注入平衡零拍探测装置。平衡零拍探测装置由一个 50/50 分束器、两个高量子效率平衡光电探测器和一个电子信号减法器构成。用一束功率远大于压缩光场的相干本底光与压缩光场在 50/50 分束器上进行干涉耦合,两个探测器分别探测分束器的出射光,并将测得的电信号输入到减法器相减,输出电信号 $i \propto |\alpha|^2 \delta^2 \langle X_1 \cos \varphi + X_2 \sin \varphi \rangle$ 即为正交压缩算符的噪声起伏的叠加,其中 $X_1 = [a \exp(-i\theta/2) + a^+ \exp(i\theta/2)]$, $X_2 = [a \exp(-i\theta/2) - a^+ \exp(i\theta/2)]$ 为正交压缩算符, φ 为本底光与压缩光的相对相位,可以通过控制 φ 来测不同分量上的噪声。实验中采用的平衡零拍探测器为 Thorlabs 公司生产的 PDB210A,它集成了两个硅光电二极管及电子信号减法器,在 894.6 nm 处量子效率约为 86%,共模抑制比大于 30 dB。光纤的输出光通过半波片和偏振分光棱镜分出一部分注入 MC 降低额外噪声后作为平衡零拍探测的本底光。MC 采用与 OPO 结构类似的近共心两镜驻波腔,腔长为 59 mm,腔长利用 PDH (Pound-Drever-Hall) 边带稳频技术^[29] 锁定。平衡零拍探测时本底光与压缩光的干涉效率越高,所测得的压缩度就越高。仔细调节本底光光路使其与 OPO 出射信号光在 50/50 分束器耦合,最终获得干涉效率为 96%。

2.2 实验结果与分析

实验测得 OPO 阈值功率 39 mW。OPO 精细度为 107,可以推算出其内腔损耗为 0.87%。扫描 OPO

腔长,将信号光和抽运光同时注入腔内,调节晶体温度,并通过高压放大器控制压电陶瓷 PZT1 扫描抽运光相位观察经 PPKTP 晶体后信号光获得的非线性增益。当注入抽运光功率为 30 mW、晶体温度为 38.5 °C 时,获得 7 倍增益。将谱仪分析频率设置为 0.5 MHz,分辨率带宽、视频带宽分别为 30 kHz 和 30 Hz。

根据以上实验参数,理论上可观测到的正交压缩度为 4.5 dB^[19]: $V_{-} = 1 - \eta \xi_1^2 \zeta \rho \frac{4\sigma}{(1+\sigma)^2 + 4\Omega^2}$, 其中 η 为探测器的量子效率(86%); ξ_1 为本底光与压缩光的干涉度(96%); ζ 为光路传输效率(96%); $\rho = T/(T+L)$ 为 OPO 逸出效率, T 为 OPO 输出耦合效率, L 为内腔损耗; $\sigma = \sqrt{P_p/P_{th}}$ 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 OPO 阈值; $\Omega = f/\gamma$ 为归一化频率, f 为谱仪分析频率, $\gamma = [c(T+L)]/(2l)$ 为 OPO 衰减速率, l 为腔长。

实验中测量压缩时,先挡住 OPO 出射光,仅让本底光(400 μ W)注入平衡零拍探测器获得散粒噪声基准(SNL),如图 2 中黑线所示。电子学噪声低于 SNL 14 dB。挡住注入 OPO 的信号光,搜索腔长使抽运光在 OPO 共振,通过 PZT2 扫描本底光与 OPO 输出正交压缩真空光的相对相位,在谱仪上观测到噪声谱如图 2 红线所示,测得 2.8 dB 正交压缩与 9.2 dB 正交反压缩。停止扫描本底光,搜索两束光相对相位到压缩和反压缩处,测得压缩(图 2 蓝线)和反压缩(图 2 绿线)噪声谱。可以看出,理论值(4.5 dB)与实验值(2.8 dB)有着较大差别,这主要是因为 447.3 nm 抽运光的波长接近 PPKTP 晶体的透射范围(350~4400 nm)临界值,因此在有抽运光注入时,由于晶体对抽运光的吸收会导致内腔损耗增加以及热效应。另外抽运光的噪声传递、OPO 腔长没有锁定以及平衡零拍探测时的相位起伏也在一定程度上影响了压缩的测量。

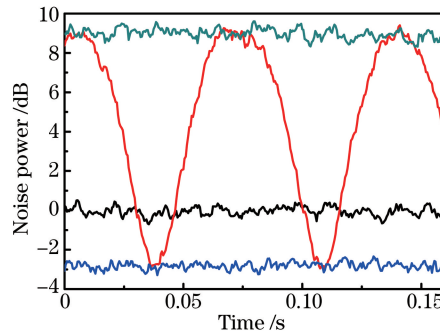


图 2 测得 894.6 nm 正交压缩真空光噪声谱

Fig. 2 Measured light noise spectrum for quadrature squeezed vacuum at 894.6 nm

实验中总探测效率 $\eta_{det} = \eta \xi_1^2 \zeta$, 包括平衡零拍探测器的量子效率、平衡零拍探测的干涉度以及光路的传输效率等,考虑到由于探测引起的损耗,OPO 腔实际输出压缩度 $V_{sq} = (V_{sq,det} - 1 + \eta_{det})/\eta_{det}$, 其中 $V_{sq,det}$ 为实验测得的压缩度,总探测效率 $\eta_{det} = 76.1\%$, 则 $V_{sq} = 4.4$ dB^[30-33]。

3 结 论

采用连续单频钛宝石激光器作为光源,通过倍频过程产生 447.3 nm 蓝光,并用来抽运由 PPKTP 晶体构建的连续准相位匹配 OPO 进行参量振荡过程从而获得对应于铯原子 D₁ 线的正交压缩真空态光场。调节抽运光功率为 30 mW 并搜索 OPO 腔长使得抽运光共振,利用平衡零拍探测装置测量输出的压缩光,最终在分析频率为 0.5 MHz 处测得 2.8 dB 正交压缩。考虑到探测效率,实际输出光场的压缩度为 4.4 dB。由于总的探测效率较低、OPO 腔长未锁定以及平衡零拍探测时本底光与压缩光相对相位的抖动等都会影响压缩的测量,下一步工作通过选用高量子效率的平衡零拍探测器、提高平衡零拍干涉效率、提高光路传输效率、锁定测量真空压缩时的 OPO 腔长及平衡零拍探测时本底光与压缩光的相对相位等方法获得更高压缩度、更稳定的非经典光,为进一步开展量子信息网络的实验研究提供光源。

参 考 文 献

- [1] Appel J, Figueroa E, Korystov D, *et al.* Quantum memory for squeezed light[J]. Phys Rev Lett, 2008, 100(9):

- 093602.
- [2] Hald J, Sørensen J L, Schori C, *et al.* Spin squeezed atoms: a macroscopic entangled ensemble created by light[J]. *Phys Rev Lett*, 1999, 83(7): 1319-1322.
- [3] Yuan Z S, Chen Y A, Zhao B, *et al.* Experimental demonstration of a BDCZ quantum repeater node[J]. *Nature*, 2008, 454(7208): 1098-1101.
- [4] Polzik E S, Carri J, Kimble H J. Spectroscopy with squeezed light[J]. *Phys Rev Lett*, 1992, 68(20): 3020-3023.
- [5] Kimble H J. The quantum internet[J]. *Nature*, 2008, 453(7198): 1023-1030.
- [6] Slusher R E, Hollberg L W, Yurke B, *et al.* Observation of squeezed states generated by four-wave mixing in an optical cavity[J]. *Phys Rev Lett*, 1985, 55(22): 2409-2412.
- [7] McCormick C F, Boyer V, Arimondo E, *et al.* Strong relative intensity squeezing by four-wave mixing in rubidium vapor[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(2): 178-180.
- [8] Marino A M, Pooser R C, Boyer V, *et al.* Tunable delay of Einstein-Podolsky-Rosen entanglement[J]. *Nature*, 2009, 457(7231): 859-862.
- [9] Wang D, Hu L Y, Pang X M, *et al.* Quadripartite entanglement from a double three-level λ -type-atom model[J]. *Phys Rev A*, 2013, 88(4): 042314.
- [10] Guo M J, Zhou H T, Wang D, *et al.* Experimental investigation of high-frequency-difference twin beams in hot cesium atoms[J]. *Phys Rev A*, 2014, 89(3): 033813.
- [11] Qin Z Z, Cao L M, Wang H L, *et al.* Experimental generation of multiple quantum correlated beams from hot rubidium vapor[J]. *Phys Rev Lett*, 2014, 113(2): 023602.
- [12] Qin Z Z, Cao L M, Jing J T. Experimental characterization of quantum correlated triple beams generated by cascaded four-wave mixing processes[J]. *Appl Phys Lett*, 2015, 106(21): 211104.
- [13] Wu L A, Kimble H J, Hall J L, *et al.* Generation of squeezed states by parametric down conversion[J]. *Phys Rev Lett*, 1986, 57(20): 2520-2523.
- [14] Pan Qing, Zhang Yun, Zhang Tiancai, *et al.* Experimental research for intensity difference squeezed light generation at 1.08 μm wavelength with low pump threshold and high conversion efficiency[J]. *Chinese J Lasers*, 1997, 24(7): 631-634.
潘庆, 张云, 张天才, 等. 1.08 μm 波长低阈值高效率强度差压缩光产生的实验研究[J]. *中国激光*, 1997, 24(7): 631-634.
- [15] Eberle T, Steinlechner S, Bauchrowitz J, *et al.* Quantum enhancement of the zero-area Sagnac interferometer topology for gravitational wave detection[J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 104(25): 251102.
- [16] Zhou Y Y, Jia X J, Li F, *et al.* Experimental generation of 8.4 dB entangled state with an optical cavity involving a wedged type-II nonlinear crystal[J]. *Opt Express*, 2015, 23(4): 4952-4959.
- [17] Vahlbruch H, Mehmet M, Danzmann K, *et al.* Detection of 15 dB squeezed states of light and their application for the absolute calibration of photoelectric quantum efficiency[J]. *Phys Rev Lett*, 2016, 117(11): 110801.
- [18] Suzuki S, Yonezawa H, Kannari F, *et al.* 7 dB quadrature squeezing at 860 nm with periodically poled KTiOPO₄ [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 89(6): 061116.
- [19] Takeno Y, Yukawa M, Yonezawa H, *et al.* Observation of -9 dB quadrature squeezing with improvement of phase stability in homodyne measurement[J]. *Opt Express*, 2007, 15(7): 4321-4327.
- [20] Burks S, Ortalo J, Chiummo A, *et al.* Vacuum squeezed light for atomic memories at the D₂ cesium line[J]. *Opt Express*, 2009, 17(5): 3777-3781.
- [21] Tanimura T, Akamatsu D, Yokoi Y, *et al.* Generation of a squeezed vacuum resonant on a rubidium D₁ line with periodically poled KTiOPO₄ [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(15): 2344-2346.
- [22] Hetet G, Glock O, Pilypas K A, *et al.* Squeezed light at 795 nm using periodically poled KTP[C]. *CLEOE-IQEC*, 2007, IF5: IF5_3.
- [23] Predojević A, Zhai Z, Caballero J M, *et al.* Rubidium resonant squeezed light from a diode-pumped optical-parametric oscillator[J]. *Phys Rev A*, 2008, 78(6): 063820.
- [24] Han Y S, Wen X, He J, *et al.* Improvement of vacuum squeezing resonant on the rubidium D₁ line at 795 nm[J]. *Opt Express*, 2016, 24(3): 2350-2359.
- [25] Pinotsi D, Imamoglu A. Single photon absorption by a single quantum emitter[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 100(9): 093603.
- [26] Du Zhijing, Zhang Yuchi, Wang Xiaoyong, *et al.* Locking multiple wavelength lasers to the transition of Cesium atoms

- by using a Fabry-Perot transfer cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(3): 452-457.
- 杜志静, 张玉驰, 王晓勇, 等. 不同波长的激光器通过法布里-珀罗腔相对于铯原子谱线的锁定[J]. *光学学报*, 2006, 26(3): 452-457.
- [27] Zhang Y, Liu J H, Wu J Z, *et al.* Single-frequency tunable 447.3 nm laser by frequency doubling of tapered amplified diode laser at cesium D_1 line[J]. *Opt Express*, 2016, 24(17): 19769-19775.
- [28] Walls D F, Milburn G J. *Quantum optics*[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2007.
- [29] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, *et al.* Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. *Appl Phys B*, 1983, 31(2): 97-105.
- [30] Schneider K, Bruckmeier R, Hansen H, *et al.* Bright squeezed-light generation by a continuous-wave semimonolithic parametric amplifier[J]. *Opt Lett*, 1996, 21(17): 1396-1398.
- [31] Sun Zhini, Feng Jinxia, Wan Zhenju, *et al.* Generation of bright squeezed light at 1.5 μm telecommunication band and its Wigner function reconstruction[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(4): 044203.
- 孙志妮, 冯晋霞, 万振菊, 等. 1.5 μm 光通信波段明亮压缩态光场的产生及其 Wigner 函数的重构[J]. *物理学报*, 2016, 65(4): 044203.
- [32] Liu Zengjun, Zhai Zehui, Sun Hengxin, *et al.* Generation of low-frequency squeezed states[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(6): 060401.
- 刘增俊, 翟泽辉, 孙恒信, 等. 低频压缩态光场的制备[J]. *物理学报*, 2016, 65(6): 060401.
- [33] Zhang Yan, Yu Xudong, Di Ke, *et al.* Locking the phase of balanced homodyne detection system for squeezed light[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(8): 084024.
- 张 岩, 于旭东, 邸 克, 等. 压缩态光场平衡零拍探测的位相锁定[J]. *物理学报*, 2013, 62(8): 084024.