

## 光通信波段低频压缩态光场的实验制备

要立婷, 冯晋霞<sup>†</sup>, 高英豪, 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,  
极端光学协同创新中心, 山西大学, 山西 太原 030006)

**摘要:** 本文利用周期极化磷酸氧钛钾晶体构成的半整块结构简并光学参量振荡器实验制备了连续变量光通信波段低频压缩态光场。光学参量振荡器的阈值功率为 210 mW。当 775 nm 抽运光场功率为 130 mW 时, 在分析频段 50 kHz~900 kHz 范围内获得真空压缩态光场。在 200 kHz 分析频率处, 压缩态光场的最大压缩度达 5.0 dB; 在最低分析频率 50 kHz 处, 压缩态光场的压缩度为 2.0 dB。该低频压缩态光场可为基于光纤的量子精密测量提供量子光源。

**关键词:** 低频压缩光; 光学参量振荡器; PPKTP 晶体

**中图分类号:** O437.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-6654(2017)02-0099-06

### 0 引言

在相空间中, 一个相干态光场的起伏是各向同性的。而压缩态光场指它的某一方向的起伏小于相干态光场的起伏, 即噪声被“压缩”。根据量子力学不确定关系, 压缩光的另一个共轭力学量的起伏必然大于相干态的起伏。根据压缩参量的不同, 压缩态光场可分为正交压缩、光子数压缩和强度差压缩等。压缩态光场作为连续变量量子信息科学研究中的重要资源之一, 已经被应用于连续变量量子信息和量子计算领域<sup>[1-6]</sup>, 以及突破散粒噪声极限的精密测量领域<sup>[8-12]</sup>, 特别是利用压缩态光场可以填补激光干涉仪引力波探测器的真空通道, 提高其探测灵敏度<sup>[13-14]</sup>。

基于非线性晶体的光学参量下转换技术是制备压缩态光场最有效的手段之一。1986 年, 美国

加州理工大学 J. Kimble 小组首次在实验上制备了正交分量的压缩态光场, 压缩度为 4 dB<sup>[15]</sup>。经过近三十年的理论和实验研究, 关于影响压缩态光场压缩度的原理机制逐渐清晰, 世界各国相关研究小组在提高压缩度方面相继取得了突破性进展。日本东京大学 A. Furusawa 小组于 2007 年获得波长为 860 nm 的 9 dB 的压缩态光场<sup>[16]</sup>。德国汉诺威大学 R. Schnabel 小组于 2008 年率先获得波长为 1 064 nm 的 10 dB 的压缩态光场<sup>[17]</sup>, 并于 2016 年将该压缩度提高至 15 dB<sup>[18]</sup>, 是目前压缩度最高纪录的保持者。2015 年, 国内山西大学获得了波长为 1 080 nm 的 8.4 dB 连续变量双模压缩态光场<sup>[19]</sup>。上述工作都集中在兆赫兹量级的分析频段内。随着对压缩态光场更进一步的需求和应用, 提高其压缩度的研究只是该

<sup>②)</sup> 收稿日期: 2016-12-20; 修回日期: 2016-12-28

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2016YFA0301401); 国家自然科学基金项目(61227015); 国家青年基金项目(11204167; 61405109)

**作者简介:** 要立婷(1992—), 女, 山西寿阳人, 硕士研究生, 研究领域: 量子光学与激光技术。E-mail: 13327407221@163.com

**†通信作者:** 冯晋霞, E-mail: fengjx@sxu.edu.cn

领域的一个方面;另一个重要的发展方向是制备更低频段的压缩态光场,例如引力波探测器就要求在引力波探测频段(10 Hz-10 kHz)获得稳定输出的压缩态光源<sup>[20]</sup>。德国汉诺威大学 R. Schnanel 小组和澳大利亚国立大学 P. K. Lam 小组分别获得了音频段 9 dB 和 11.6 dB 的压缩态光场<sup>[21-22]</sup>。此外,连续变量光通信波段 1 550 nm 压缩态光场在光纤中有着极低的传输损耗,与现有的光纤通信系统高度兼容,是基于光纤的实际应用中的重要量子资源。而且 1 550 nm 波段音频段压缩态光场被证明可用于以爱因斯坦引力波望远镜为代表的第三代激光干涉仪引力波探测器,减小探测器热噪声,灵敏度可达  $10^{-24} \text{ Hz}^{-1/2}$  数量级<sup>[23-24]</sup>。因而光通信波段 1 550 nm 压缩态光场的产生也是近年来该领域的研究热点之一<sup>[25-26]</sup>,目前德国汉诺威大学 R. Schnanel 小组

获得该波段 12.3 dB 的压缩态光场<sup>[26]</sup>,但分析频段是在兆赫兹量级。

本文利用周期极化磷酸氧钛钾(PPKTP)晶体的半整块结构简并光学参量振荡器(DOPO),实验获得了连续变量光通信波段低频真空压缩态光场。当 DOPO 运转于阈值以下,抽运光场功率为 130 mW 时,在分析频段 50 kHz~900 kHz 范围内获得真空压缩态光场。在 200 kHz 分析频率处,压缩态光场的最大压缩度达 5.0 dB;在最低分析频率 50 kHz 处,压缩态光场的压缩度为 2.0 dB。该低频压缩态光场可为基于光纤的量子精密测量提供有效的量子光源。

### 1 实验过程及结果

图 1 为光通信波段低频压缩态光场产生的实验装置。激光光源为 NP Photonics 公司生产的

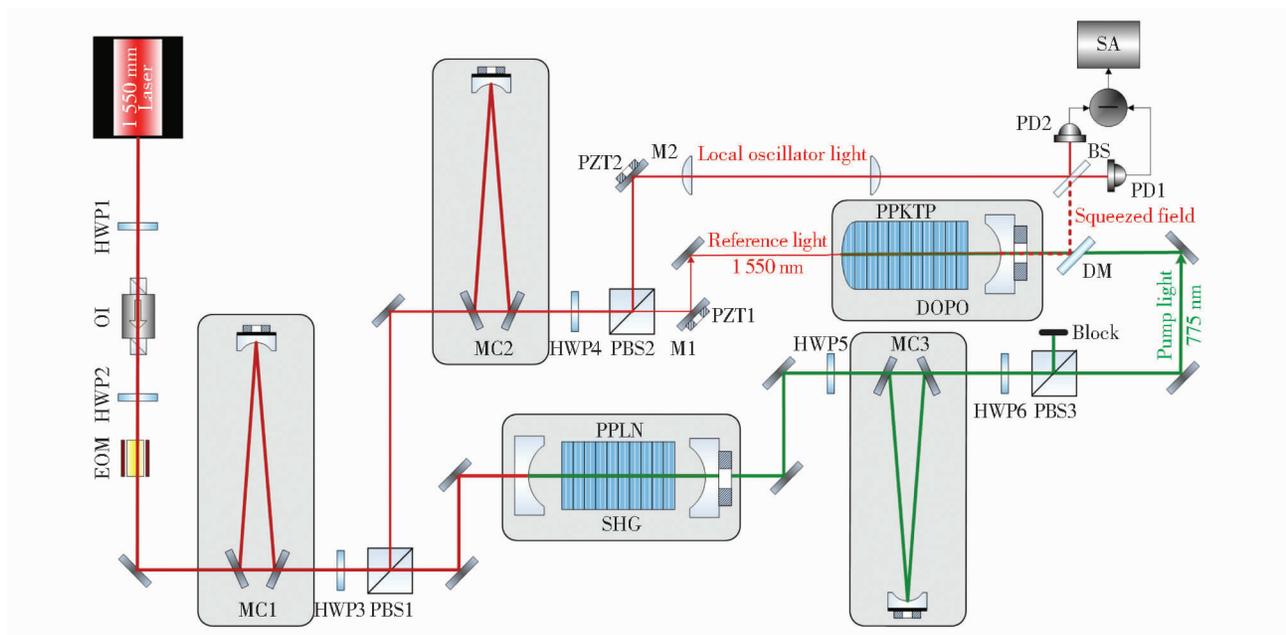


Fig. 1 Experimental setup schematic of generation of low-frequency squeezed light at telecommunication wavelength (HWP1-6: half wave plate; OI: optical isolator; EOM: electronic optical modulator; PBS1-3: polarization beam splitter; MC1-3: mode cleaner; SHG: second harmonic generator; M1-2: mirror; PZT1-2: piezo-electric transducer; DM: dichroic mirrors; DOPO: degenerate optical parametric oscillator; BS: 50/50 beam splitter; PD1-2: photodiode detector; SA: spectrum analyser.)

图 1 光通信波段低频压缩态光场产生的实验装置图

(HWP1-6:半波片;OI:光隔离器;EOM:电光调制器;PBS1-3:偏振分束器;MC1-3:模式清洁剂;SHG:二阶谐波产生器;M1-2:平面反射镜;PZT1-2:压电陶瓷;DM:双色镜;DOPO:简并光学参量振荡器;BS:50/50分束器;PD1-2:光电探测器;SA:频谱分析仪。)

心波长为 1 550 nm 的连续单频光纤激光器,最大输出功率为 2.2 W。光隔离器(OI)用于抑制由光学元件反射的激光,保证激光器稳定运转。电光调制器(EOM)为激光加载高频调制信号,用于后续实验中的锁腔系统。由于光纤激光器输出的激光存在远高于散粒噪声基准(SNL)的额外噪声,模式清洁剂(MC)用于降低其额外噪声至 SNL。经过 MC1 透射的光场分成两束,功率较小的一部分光经 MC2 再次过滤其额外噪声,使连续单频 1 550 nm 激光的强度噪声在分析频率为 4 MHz 处达到 SNL。该光场的一部分作为 DOPO 的参考光场,用来辅助调节 DOPO 腔的模式匹配和经典增益;另一部分用作平衡零拍探测系统的本底振荡光。MC1 和 MC2 模式清洁剂均采用边带锁腔技术将模式清洁器的腔长锁定在 1 550 nm 注入激光的共振频率处。功率较大的另一部分光注入二次谐波产生器(SHG),获得输出功率约 1 W 的连续单频 775 nm 激光。经过 MC3 过滤后其强度噪声在分析频率为 4 MHz 处达到 SNL。该 775 nm 光场被作为 DOPO 的抽运光场。

DOPO 腔是由 PPKTP 晶体和曲率半径为 30 mm 的凹面镜组成的半整块结构两镜驻波腔。PPKTP 晶体的尺寸为 1 mm×2 mm×10 mm,一个端面为曲率半径为 12 mm 的凸面,镀抽运光和参考光高反膜 ( $R_{1\ 550\ \&\ 775\ \text{nm}} > 99.9\%$ );另一端面镀抽运光和参考光减反膜 ( $R_{1\ 550\ \&\ 775\ \text{nm}} < 0.01\%$ )。凹面镜作为下转换光场的输出耦合端,其凹面镀抽运光和参考光半反膜 ( $T_{1\ 550\ \text{nm}} = 13\%$ ,  $R_{775\ \text{nm}} = 20\%$ ),抽运光由此腔镜耦合进入 DOPO 腔,其背面镀抽运光和参考光减反膜 ( $R_{1\ 550\ \&\ 775\ \text{nm}} < 0.02\%$ )。PPKTP 晶体放置在导热性能良好的紫铜炉中,通过半导体制冷元件和温度控制仪实现晶体温度的高精度控制,晶体工作温度为 35.11 °C。

实验中 DOPO 处于双共振状态,抽运光在 DOPO 腔内双次穿过晶体,频率简并的信号光与闲置光在腔内共振。抽运光双次穿过晶体,实测精细度仅为 6,因而通过 DOPO 腔内抽运光的模

式无法判断抽运光与腔模的匹配情况。实验中我们将一部分 1 550 nm 参考光反向注入 DOPO 腔内产生与抽运光同频率的 775 nm 的倍频光,保证输出的倍频光与抽运光路重合,即产生的倍频光沿抽运光路注入 MC3。调节匹配透镜组使得注入 MC3 的倍频光与 MC3 达到最佳模式匹配,此时抽运光与 DOPO 腔模式匹配也达到最佳,由此可有效降低 DOPO 的阈值。当正向注入 1 550 nm 参考光时,实测的 DOPO 腔对 1 550 nm 的精细度为 42。平面镜 M1 固定在压电陶瓷 PZT1 上,通过高压放大器输出的电压推动 PZT1 来精确控制正向注入的参考光与抽运光的相对相位,此时相当于一个光学参量放大器(DOPA)。当相对位相为 0 时,DOPA 运转于参量放大状态,当相对位相为  $\pi$  时,DOPA 运转于参量反放大状态。PZT1 主要在调节经典增益时使用。

当 DOPO 腔运转于阈值以下时(此时参考光被挡住),DOPO 输出的下转换场为真空场。采用平衡零拍探测系统测量其噪声起伏。被测量的真空场和本底振荡(LO)光在 50/50 分束器(BS)上耦合,LO 光和被测光之间的相对相位通过放置在平面镜 M2 的压电陶瓷 PZT2 来控制。经过 BS 的两束光分别进入两个低噪声高增益光电探测器(PD1 和 PD2),两光电流信号经过减法器后输入频谱分析仪分析记录。探测器为 Thorlabs 公司生产的型号为 PDB150C,在 kHz 频段内的最大增益为  $10^7\ \text{V/A}$ ,共模抑制比达 25 dB,光电探测器的量子效率为 92%。

实验中我们采用 nW 量级的参考光注入 DOPO 腔,然后采用高增益探测器提取携带腔信号的反射光用于 DOPO 腔腔长的锁定,锁腔仍采用 PDH 技术。将 DOPO 腔长锁定,测量得到 DOPO 稳定输出的真空场噪声功率谱如图 2 所示,此时 LO 光的位相是通过电压控制 PZT2 处于输出压缩或反压缩最大值的地点。在实验测量中,频谱分析仪的分析频率为 0 Hz~900 kHz,分辨率带宽为 1.1 kHz,视频带宽 20 Hz。曲线(i)为 SNL,曲线(ii)为压缩态光场的噪声起伏谱,曲线(iii)为反压缩噪声起伏谱,曲线(iv)为探

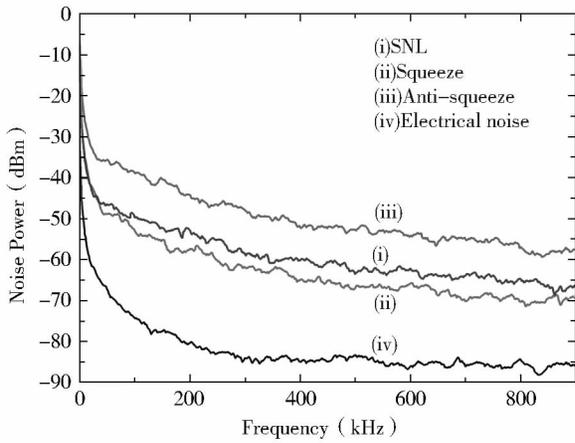


Fig. 2 The noise power of low-frequency squeeze from DOPO.

The SA measurement parameters are RBW 1.1 kHz and VBW 20 Hz.

图 2 DOPO 腔输出低频压缩光噪声谱。谱仪测量参数为:分辨率带宽为 1.1 kHz,视频带宽 20 Hz。

测器的电子学噪声(EL),SNL 高于 EL 约 20 dB。实验测量的 DOPO 的阈值功率为 210 mW,当抽运光功率为 130 mW,LO 光功率为 45 μW 时,实测的压缩态光场的最大压缩度为 5.0 dB。由于实验中激光光源是在 4 MHz 处达到散粒噪声基

准,因而 SNL 是我们采用一个相同光电流的白光校准给出的。从图中可以看出,在分析频率低于 50 kHz 时,DOPO 输出的光场噪声起伏已经高于 SNL,没有压缩输出,这主要还是由于泵浦光场在音频段有非常高的弛豫振荡噪声、光路的寄生干涉以及探测器在音频段存在更高的电子学噪声等因素引起的。

图 3 为测量的在特定分析频率处 DOPO 输出的真空场噪声功率谱。图 3 中曲线 (i) 为用白光校准的 SNL,曲线 (ii) 为扫描 LO 位相时测量的压缩态光场的噪声起伏谱。其中,图 3(a) 为在 200 kHz 分析频率处,压缩态光场的最大压缩度达 5.0 dB。图 3(b) 为在最低分析频率 50 kHz 处,压缩态光场的压缩度为 2.0 dB。频谱分析仪的参数均为:分辨率带宽为 18 kHz,视频带宽 100 Hz。扫描时间为 200 ms。图 3(b) 的噪声起伏与图 3(a) 相比较波动较大,这是因为越接近音频段,受各种额外噪声的影响,对 DOPO 腔长以及相对位相的反馈控制系统要求就更加严苛。要得到稳定的音频段压缩态光场,需要进一步改进反馈控制系统以及降低各种额外噪声。

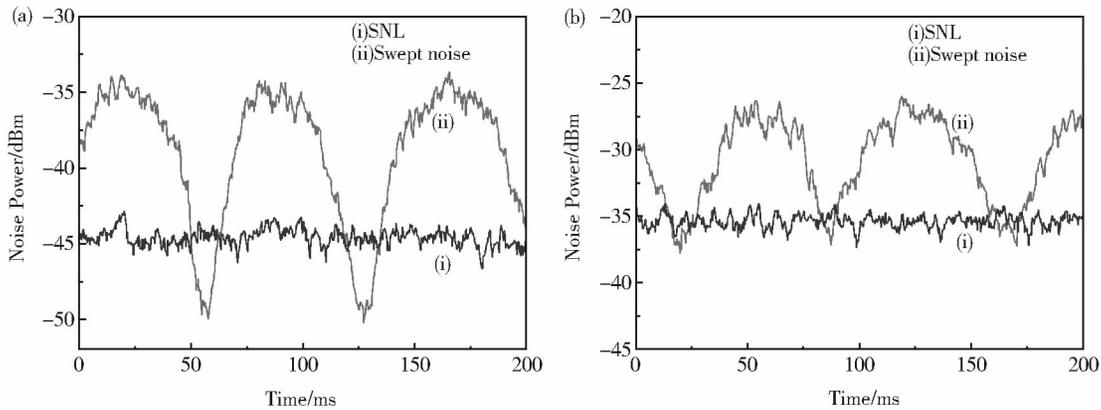


Fig. 3 The noise power of low-frequency squeeze from DOPO.

The SA measurement parameters are RBW 18 kHz, VBW 100 Hz, the sweep time is 200 ms.

图 3 DOPO 腔输出低频压缩光噪声谱(特定分析频率处)。

谱仪测量参数为:分辨率带宽为 18 kHz,视频带宽均为 100 Hz,扫描时间为 200 ms。

## 2 总结

本文利用 PPKTP 晶体构成的半整块结构 DOPO 获得了连续变量光通信波段低频压缩态光场。在分析频段 50 kHz~900 kHz 范围内获

得真空压缩态光场。在 200 kHz 分析频率处,压缩态光场的最大压缩度达 5.0 dB;在最低分析频率 50 kHz 处,压缩态光场的压缩度为 2.0 dB。实验上我们将进一步采取降低泵浦光低频段的

额外噪声和探测器在低频段的电子学噪声,减小光路寄生干涉,改善系统的稳定性包括 DOPO 腔长和相对位相锁定的稳定性等相应措施,有望得

到更低分析频段的稳定的压缩态光场输出。该低频压缩态光场可为基于光纤的量子精密测量提供有效的量子光源。

#### 参考文献:

- [1] Jurgen A, Eden F, Dmitry K, *et al.* Quantum Memory for Squeezed Light[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, **100**(9): 093602. DOI:10.1103/PhysRevLett.100.0903602.
- [2] Dantan A, Pinard M. Quantum-state Transfer Between Fields and Atoms in Electromagnetically Induced Transparency [J]. *Phys Rev A*, 2004, **69**(4): 043810. DOI:10.1103/PhysRevLett.100.0903602.
- [3] Furusawa A, Serensen J L, Braunstein S L, *et al.* Unconditional Quantum Teleportation[J]. *Science*, 1998, **282**(5389): 706-709. DOI:10.1126/Science.282.5389.706.
- [4] Jing J T, Zhang J, Yan Y, *et al.* Experimental Demonstration of Tripartite Entanglement and Controlled Dense Coding for Continuous Variables[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, **90**(16): 167903. DOI:10.1103/PhysRevLett.90.167903.
- [5] Braunstein S L and Loock P V. Quantum Information With Continuous Variables[J]. *Rev Mod Phys*, 2005, **77**: 513-577. DOI:10.1109/IQEC.2000.907786.
- [6] Su X L, Hao S H, Deng X W, *et al.* Gate Sequence for Continuous Variable One-way Quantum Computation[J]. *Nat Commun*, 2013, **4**: 2828. DOI:10.1038/ncomms3828.
- [7] The LIGO Scientific Collaboration. A Gravitational Wave Observatory Operating Beyond the Quantum Shot-noise Limit [J]. *Nat Phys*, 2011, **7**(12): 962-965. DOI:10.1088/10264-9381/7/12/199602.
- [8] Caves C M. Quantum-mechanical Noise in an Interferometer [J]. *Phys Rev D*, 1981, **23**: 1693. DOI:10.1103/PhysRevD.23.1693.
- [9] Grangier P, Slusher R, Yurke B, *et al.* Squeezed-Light-Enhanced Polarization Interferometer[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **59**: 2153. DOI:10.1103/PhysRevLett.59.278.
- [10] Xiao M, Wu L A, Kimble H J. Precision Measurement Beyond the Shot-Noise Limit[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **59**(3): 278-281. DOI:10.1103/PhysRevLett.59.278.
- [11] Yonezawa H, Nakane D, Wheatley T A, *et al.* Quantum-Enhanced Optical Phase Tracking[J]. *Science*, 2012, **337**: 1514. DOI:10.1126/Science.1225258.
- [12] Sun H X, Liu K, Liu Z L, *et al.* Small-Displacement Measurements Using High-Order Hermite-Gauss Modes[J]. *Appl Phys Lett*, 2014, **104**: 121908. DOI:http://dx.doi.org/10.1063/1.4869819.
- [13] Goda K, Miyakawa O, Mikhailov E E, *et al.* A Quantum-Enhanced Prototype Gravitational-Wave Detector[J]. *Nat Phys*, 2008, **4**: 472-476. DOI:10.1038/nphys920.
- [14] The LIGO Scientific Collaboration. Enhanced Sensitivity of the LIGO Gravitational Wave Detector by Using Squeezed States of Light[J]. *Nat Photonics*, 2008, **7**: 613-619. DOI:10.1038/nphoton.2013.177.
- [15] 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. https://doi.org/10.1364/JOSAB.4.001465.
- [16] 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**: 4321. https://doi.org/10.1364/OE.15.004321.
- [17] Vahlbruch H, Mehmet M, Chelkowski S, *et al.* Observation of Squeezed Light With 10 dB Quantum Noise Reduction [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, **100**: 033602. DOI:10.1103/PhysRevLett.100.033602.
- [18] 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**: 110801. DOI:10.1103/PhysRevLett.117.110801.
- [19] 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**: 4953-4959. DOI:10.1364/OE.23.004952.
- [20] Chua S, Slagmolen B, Shaddock D A, *et al.* Quantum Squeezed Light in Gravitational-Wave Detectors[J]. *Class Quantum Grav*, 2014, **31**: 183001. DOI:10.1088/0264-9381/31118/183001.
- [21] Vahlbruch H, Chelkowski S, Hage B, *et al.* Coherent Control of Vacuum Squeezing in the Gravitational-Wave Detection Band[J]. *Phys Rev Lett*, 2006, **97**: 011101. DOI:10.1103/PhysRevLett.97.011101.
- [22] Stefszky M, Mow-lowry C, Chua S, *et al.* Balanced Homodyne Detection of Optical Quantum States at Audio Band Frequencies and Below[J]. *Class Quantum Grav*, 2012, **29**: 145015. DOI:10.1088/0264-9381/29/141/145015.
- [23] LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, ABBOTTBP, ABBOTTTR, *et al.* An Upper Limit on the Stochastic Gravitational Wave Background of Cosmological Origin[J]. *Nature*, 2009, **460** (7258): 990-4. DOI:10.1038/nature08278.
- [24] Rowan S, Hough J, Crooks D R M. Thermal Noise and Material Issues for Gravitational Wave Detectors[J]. *Phys Lett A*, 2005, **347**: 25-32. DOI:10.1109/sam.2004.1502934.
- [25] Feng J X, Tian X T, Li Y M, *et al.* Generation of a Squeezing Vacuum at a Telecommunication Wavelength With Periodically Poled LiNbO<sub>3</sub> [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, **92** (22): 221102. DOI: http://dx.doi.org/10.1063//2938053.
- [26] Mehmet M, Ast S, Eberle T, *et al.* Squeezed Light at 1550 nm With a Quantum Noise Reduction of 12.3 dB[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(25): 25763-25772. DOI:10.1364/OE.19.025763.

## Generation of a Low-frequency Squeezed States at Telecommunication Wavelength

YAO Li-ting, FENG Jin-xia, GAO Ying-hao, ZHANG Kuan-shou

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

**Abstract:** A telecommunication wavelength low-frequency squeezed light for continuous variable at telecommunication wavelength is demonstrated from a semi-monolithic degenerate optical parametric oscillator (DOPO) based on a periodically poled KTP crystal. The threshold power for DOPO is 210 mW. The low-frequency squeezed light is generated with the pump light at 775 nm of 130 mW at analysis frequency range from 50 kHz~900 kHz. A maximum squeeze degree of 5.0 dB is obtained at analysis frequency of 200 kHz. A 2.0 dB squeeze light is obtained at the lowest analysis frequency of 50 kHz.

**Key words:** Low-frequency squeezed light; Optical parametric oscillator; PPKTP crystal