

低频压缩态光场的制备

刘增俊 翟泽辉 孙恒信 郜江瑞

Generation of low-frequency squeezed states

Liu Zeng-Jun Zhai Ze-Hui Sun Heng-Xin Gao Jiang-Rui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 060401 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.060401

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.060401>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用破坏对称性的超导体人造原子制备 χ 型四比特纠缠态

The χ -type four-particle entangled state generated by using superconducting artificial atoms with broken symmetry

物理学报.2015, 64(18): 184207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184207>

腔光力学系统中的量子测量

Quantum measurement with cavity optomechanical systems

物理学报.2015, 64(16): 164211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164211>

结构库中二能级原子与自发辐射场间的纠缠演化

Evolution of entanglement between a two-level atom and spontaneous emission field in structured reservoir

物理学报.2014, 63(12): 124201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.124201>

飞秒脉冲正交位相压缩光的产生

Generation of femtosecond pulsed quadrature phase squeezed light

物理学报.2013, 62(16): 164206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.164206>

N00N 态的 Wigner 函数及 N00N 态作为输入的量子干涉

Wigner function of N00N state and quantum interference with N00N state as input

物理学报.2013, 62(11): 114204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.114204>

低频压缩态光场的制备*

刘增俊¹⁾ 翟泽辉^{1)†} 孙恒信²⁾ 郜江瑞¹⁾²⁾

1)(山西大学物理电子工程学院, 太原 030006)

2)(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, 太原 030006)

(2015年11月4日收到; 2015年12月28日收到修改稿)

低频压缩态光场可用于提高引力波探测器灵敏度, 近年来受到人们的广泛关注. 相对于高频段而言, 低频压缩态的产生更容易受到外界环境噪声的干扰而不易被观察到. 本文采用全固化单频倍频Nd: YVO₄/KTP激光器作为光源, 利用双波长共振的光学参量振荡器实现参量过程, 以1064 nm波长的红外作为基频光, 激光器腔内倍频产生的532 nm绿光作为抽运光, 通过调节周期性极化磷酸氧钛晶体温度使光学参量振荡器达到双波长同时共振, 采用真空注入的方式, 利用Pound-Drever-Hall锁腔技术锁定抽运场. 输出压缩光通过平衡零拍探测, 最终在实验上获得了频率低至3 kHz的真空压缩, 所直接观察到的压缩度为2 dB.

关键词: 低频压缩态光场, 光学参量振荡器, 平衡零拍探测

PACS: 04.80.Nn, 42.50.Dv, 42.65.Yj

DOI: 10.7498/aps.65.060401

1 引言

低频信号测量在现代精密测量中有了越来越多的应用. 例如, 作为当代物理学最重要的前沿领域之一, 引力波信号的探测波段就是在声频段甚至更低的频率, 随着几个大型激光干涉仪引力波探测器在21世纪初的出现并于近几年达到前所未有的灵敏度, 引力波探测进入了一个崭新的时代, 激光干涉仪引力波探测器也成为引力波探测最主要的手段. 第一代激光干涉仪引力波探测器的灵敏度是 10^{-22} m, 频带宽度为几十赫兹到几千赫兹^[1]. 虽然激光干涉仪测量频带宽度大, 灵敏度高, 但是在引力波探测频段仍然受到了激光器量子噪声的影响^[2], 从而限制了引力波探测器灵敏度的进一步提高. 1981年, Caves^[3]首次提出注入压缩态到激光干涉仪中可以改进信号测量的信噪比, 提高激光干涉仪的灵敏度, 它的主要作用就是降低测量噪声到

散粒噪声以下, 又称亚散粒噪声测量. 低频压缩光在未来的激光干涉仪引力波探测器的升级过程中将起到至关重要的作用, 它可以降低量子噪声对引力波探测的干扰, 是提高激光干涉仪引力波探测器的灵敏度的重要手段. 应用引力波探测器上的压缩光源就要求在引力波探测频段(10 Hz—10 kHz)获得稳定的压缩输出光场. 到目前为止, 大部分实验上已实现的压缩态在兆赫兹级频段以上获得了较高的压缩度(最到达12.7 dB^[4]), 而且已经实现了一些基于压缩光的量子精密测量^[5]. 未来发展的重要方向是要在所有的频率段都产生可以应用的压缩态光场, 特别是低频段的应用已变得尤为重要. 在2004年^[6]与2006年^[7]第一次证明了可以在声频段观察到压缩. 目前已经有很多实验都证明了低频压缩光可以作为激光干涉仪引力波探测器的光源^[8-11]. 相对于高频压缩光而言, 在制备低频压缩态的过程中更容易受到环境中寄生干涉、散射、振动等声频噪声的影响, 这在一定程度上限制了低

* 国家自然科学基金(批准号: 11174189)和国家高技术研究发展计划(批准号: 2013AA8112008)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhzehui@sxu.edu.cn

频压缩态的产生. 除引力波探测外, 低频压缩光还应用到了生物测量^[12]、磁场测量等^[13]领域中.

光学参量振荡器(OPO)是最佳的压缩态产生方式之一. 它具有额外噪声小, 稳定性好, 产生的压缩态纯度高等优点. 由于激光器在低频段都具有很高的噪声, 当有连续注入光场时会使低频的经典噪声耦合到输出的压缩光中, 降低光场低频压缩态的质量, 所以目前应用到引力波探测器的压缩光源大多采用真空注入(即不注入红外信号光)来制备低频压缩态. 本文介绍了利用双波长共振OPO产生了频率低至3 kHz的真空压缩态的实验. 相对于单波长共振, 采用双波长共振的方法OPO腔的阈值较低, 而且锁腔方式比较灵活. 由于是采用真空注入的方式, 没有信号光注入的情况下我们通常应用的利用反射的注入光的信号作为误差信号的Pound-Drever-Hall锁定腔长的方式已经不适用. 所以本文中OPO腔采用双波长共振的方式, 通过调节PPKTP晶体温度使抽运光与信号光在腔内同时共振, 从而可以通过锁定抽运光来锁定真空的红外光输出, 最终在3 kHz处获得2 dB的真空压缩. 真空压缩态的相位可以采用“量子噪声锁定”^[14]或“连续控制锁定”^[15]的方法来锁定.

2 低频压缩态光场的产生及影响因素

2.1 理论模型

一般来说, 要表示压缩光的压缩度需要测量它的正交分量的噪声大小. 对于利用光学参量过程产生的压缩光, 噪声定义为^[16]

$$V^\pm = \left\langle \left(\delta \hat{X}^\pm \right)^2 \right\rangle. \quad (1)$$

正交振幅和正交位相的噪声分别可以表示为

$$V^+ = 1 + \varepsilon \beta \theta^2 \frac{4\eta\sigma}{\omega^2 + (1 - \sigma)^2}, \quad (2)$$

$$V^- = 1 - \varepsilon \beta \theta^2 \frac{4\eta\sigma}{\omega^2 + (1 - \sigma)^2}, \quad (3)$$

其中 ε 为光的传播效率, β 为平衡零拍探测中采用的平衡探测器的光电二极管的量子效率, θ 为平衡零拍探测的干涉可见度, η 为逸出效率, σ 为抽运功率与阈值的比.

传播效率 ε 是由压缩光在传播过程中所经过不完美的光学镜面以及非理想状态量子效率的光电

二极管过程中产生的损耗决定的. 假如一个偏振分光棱镜的实际反射率为 R_1 , 那么压缩光通过此棱镜的传播效率为

$$\varepsilon_1 = 1 - R_1. \quad (4)$$

光路中所有的传播损耗都可以看作是引入了无关联的真空场与压缩光进行干涉, 所以光在传播过程中的损耗相当于压缩光耦合了真空噪声, 这会降低压缩光的压缩度, 所以提高传播效率可以提高压缩度.

探测器探测效率主要取决于探测器所采用的光电二极管的量子效率 β , 量子效率达不到理想情况也相当于压缩态在传输过程中引入了损耗. 如果平衡零拍探测过程中两个探测器二极管的量子效率不同也会降低整体的探测效率, 所以选择量子效率高而量子效率差低的平衡探测器对于压缩度的测量非常重要.

平衡零拍探测过程中压缩光和本底光的干涉可见度 θ 可表示为

$$\theta = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (5)$$

其中 I_{\max} , I_{\min} 分别表示两束光强相等时扫描相位进入探测器的光强最大值与最小值. 由于压缩光和本底光的偏振和空间模式不完全匹配造成的两束光在50/50分束器上不完全干涉会降低平衡零拍干涉效率 θ^2 , 平衡零拍干涉效率越高, 所能测得的压缩度就越高.

通常一个压缩光源的逸出效率 η 可以表示为

$$\eta = \frac{T}{T + L_{\text{cav}}}, \quad (6)$$

其中 T 表示OPO腔的输出耦合效率, L_{cav} 表示内腔损耗. 提高OPO腔的逸出效率, 可以提高压缩度. 从(6)式不难看出, 要提高腔的逸出效率可以有两种方法: 一种是提高腔的输出耦合效率, 另一种是降低内腔损耗. 提高腔的输出耦合效率不仅会降低腔的精细度, 而且由于腔的阈值功率是随着 $(T + L_{\text{cav}})^2$ 的增大而增大, 阈值增大后需要更高的抽运光功率. 但是降低内腔损耗是非常困难的, 因为内腔损耗的大小主要是由于非线性晶体本身的性质决定, 一旦选定晶体, 就很难再减小内腔损耗. 所以在实验中想要获得尽可能高的压缩度的压缩光就必须选择一个合适的输出耦合效率 T , 并且尽可能降低内腔损耗 L_{cav} . 我们实验上选择腔的输出

耦合镜对于波长为1064 nm红外光的输出耦合效率为12%.

除了上述提到的几种影响压缩光的因素外,还有一种对低频压缩光有很大影响的限制因素,那就是由于OPO腔中连续信号光的注入所引入的经典噪声. 2004年, McKenzie等^[4]已经证明信号光所耦合的经典噪声是随着注入信号光的功率增大而增大的,而信号光功率过小又会影响到锁腔的稳定度. 一个好的解决办法就是采用双波长共振的OPO、注入真空的方式来制备低频压缩光,这样可以有效地避免连续信号光的注入而耦合的经典噪声对低频压缩光制备的影响.

2.2 实验

实验装置图如图1所示. 本实验采用全固化单频倍频Nd:YVO4/KTP激光器(DPSS-FG-VIB)为光源. 激光器产生的波长为1064 nm红外光及其经腔内倍频之后产生的波长为532 nm的绿光同时输出,绿光最高输出功率为3 W,红外的最高输出功率为190 mW. 实验中OPO腔的选择为双波长共振的两腔镜线性腔,非线性晶体为周期性极化磷酸氧钛钾(PPKTP)晶体,腔长为6 cm. OPO腔用一个厚度为8 mm的有机玻璃罩罩住来保持清

洁,防止灰尘对腔镜以及晶体的污染. 此外,玻璃罩可以隔离环境噪声,提高锁腔的稳定度. 激光器输出的光经过一个双波长分光镜,波长为532 nm的绿光被完全反射,波长为1064 nm的红外光全部透射. 其中绿光分别经过偏振分光棱镜PBS2, 532 nm的二分之一波片、偏振分光棱镜PBS1之后进入OPO腔作为参量过程的抽运光. OPO腔反射一部分抽运光经过偏振分光棱镜PBS2反射后进入探测器PD3,并利用其获得的误差信号反馈到压电陶瓷PZT1上来控制OPO腔长,让1064 nm的信号光与532 nm的抽运光同时共振输出. 经分光镜BS1透射的红外光再经过一个分光镜反射一部分作为平衡零拍探测的本底光,这部分光的功率为1 mW. 剩余的一部分光可以注入到OPO腔来调节信号光与抽运光的相位匹配. 相位匹配时,可以通过示波器观察到经过信号光与抽运光的透射峰重合,并可以通过扫描抽运光的相位观察经过非线性晶体后信号光所获得的非线性增益的大小. 实验上选择平衡零拍探测系统来测量制备的压缩光噪声. 具体的过程为压缩光与本底光在分光镜BS2处进行干涉,经分光镜BS2反射与透射的光分别进入探测器PD1与探测器PD2,转化为光电流信号相减之后再进入频谱分析仪进行分析.

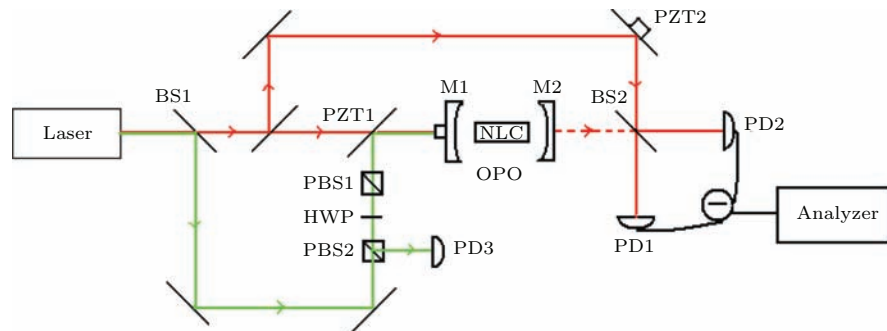


图1 实验原理图 Laser, 全固化单频倍频Nd:YVO4/KTP激光器为光源(DPSS-FG-VIB)产生的波长为1064 nm及532 nm的激光; BS1, 532 nm高反1064 nm增透镜; BS2, 1064 nm波长的50/50分光镜; OPO, 双波长共振简并参量放大器; NLC, PPKTP非线性晶体; M1, 曲率半径30 mm, 对532 nm的绿光透过率 $T = 11\%$, 1064 nm高反镜; M2, 曲率半径30 mm, 532 nm高反镜, 对1064 nm红外透过率 $T = 12\%$; PZT1, PZT2, 压电陶瓷; PD1, PD2, PD3, 光电二极管探测器; PBS1, PBS2, 532 nm偏振分光棱镜; HWP, 532 nm波长1/2波片; Analyzer, ESA-E4402B频谱分析仪

Fig. 1. Schematic of the experiment: Laser, Nd:YVO4/KTP laser; BS1, dichroic beam splitter; BS2, 50/50 beam splitter at 1064 nm; OPO, doubly-resonant optical parametric oscillators; NLC, periodically poled potassium titanyl phosphate(PPKTP) crystal; M1, transmissivity, $T = 11\%$ at 532 nm, high reflectivity at 1064 nm; M2, transmissivity, $T = 12\%$ at 1064 nm, high reflectivity at 532 nm; PZT1, PZT2, piezo-electric transducer; PD1, PD2, PD3, photodiode detectors; PBS1, PBS2, polarizing beam splitter at 532 nm; HWP, half wave plate at 532 nm; Analyzer, ESA-E4402B spectrum analyzer.

3 实验过程与结果

3.1 实验过程

首先需要调节 OPO 腔的精细度,它是影响压缩度的重要因素之一,它反映了压缩光在腔内的损耗程度,腔的精细度越高,损耗越小,压缩光的压缩度就越高.精细度是由输出耦合腔镜 M2 透射率 T 决定的,它的值为 $2\pi/T$.本实验中选择的输出耦合腔镜对于波长为 1064 nm 的红外光的透射率为 12%,所以理论上 OPO 腔的精细度最高可以达到 52.3.实验中主要通过准直腔镜与非线性晶体来提高腔的精细度,因为腔镜与非线性晶体都达不到理想的透射率,所以腔的精细度也很难达到理论上的最大值,我们实验中腔的精细度为 50.其次要调节平衡零拍探测系统的干涉可见度,先将波长为 1064 nm 注入到 OPO 腔,利用一部分透射光锁腔,让红外光在腔内共振输出.通过扫描本底光的相位来观察 OPO 腔输出的红外光与本底光的干涉可见度.影响干涉可见度的主要因素是在分光镜 BS2 处干涉的两束光的光束匹配,光束匹配程度越好,干涉可见度越高.调节好干涉之后,重新扫描 OPO 腔,让信号光与抽运光同时进入腔内,通过调节 PPKTP 晶体温度使信号光与抽运光在腔内同时共振,从而可以通过锁定抽运光来锁定真空的红外光输出.微调非线性晶体温度获得合适的非线性增益倍数.待温度稳定之后,利用反射的抽运光锁定 OPO 腔.由于是采用真空注入方式,所以需要在锁腔之后用挡光片挡住注入 OPO 腔的信号光,注入 1064 nm 的真空场来代替信号光.整个实验系统的主要部分都被固定在由 Newport 公司生产的光学小平台上,小平台的大小为长 90 cm,宽 60 cm.它的主要作用是进一步隔离大地的振动噪声,整个小实验平台也用厚度为 10 mm 的有机玻璃罩罩住,它可以有效地隔离环境中的声频噪声.同时可以避免灰尘污染镜片而降低镜片的透射率.从激光器输出的红外和绿光都是通过保偏光纤导入到小平台的系统,利用光纤的好处是可以提高系统的稳定度与光束质量.提高实验的稳定度的方法还包括尽量使用稳定度高的镜架;控制实验室内的温度,以保证激光器与光纤的稳定;提高锁腔的稳定性;更精细的控制 PPKTP 晶体的温度;保持清洁,降低传播损耗.

3.2 实验结果

实验结果如图 2 所示,其中 (a) 曲线为散粒噪声基准曲线, (b) 曲线为实验获得的压缩光噪声曲线. OPO 腔的精细度为 50,注入抽运光的功率为 20 mW,选择 6 倍的非线性增益倍数.平衡零拍干涉可见度为 96%,平衡探测器的 EXT500 T 光电二极管对于波长为 1064 nm 光的量子效率为 86%.所测得数据的频谱仪型号为 Agilent E4402B,其中频谱仪的参数选择频率带宽 (span) 为 0—15 kHz,视频带宽 (video bandwidth, VBW) 为 300 Hz,分辨带宽 (resolution bandwidth, RBW) 为 1 kHz.由图 2 可以看到本实验在低至 3 kHz 频率处获得了压缩度为 2 dB 的真空压缩.由于受到频谱仪本身的限制,无法观察到 2 kHz 以下的压缩光的噪声情况.同时由于实验条件的限制,实验上并没有对压缩光的相位进行锁定,所获得的压缩曲线是一条扫描着本底光相位的压缩噪声曲线.

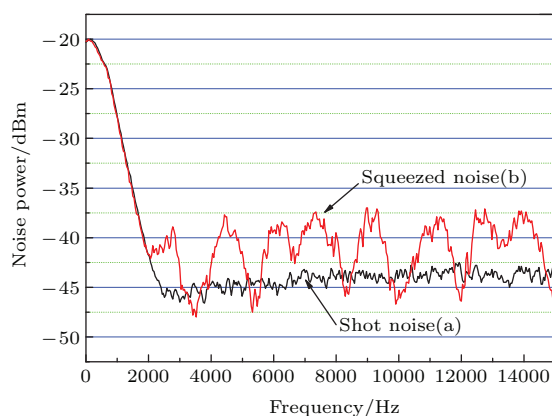


图 2 (网刊彩色) 实验结果. (a) 散粒噪声基准曲线; (b) 压缩光噪声曲线

Fig. 2. (color online) Measured quantum noise spectra: (a) Shot noise; (b) squeezed noise.

4 结 论

本文利用双波长共振光学参量振荡器 (OPO)、波长为 532 nm 的绿光作为抽运光、注入 1064 nm 真空场的方式在频率低至 3 kHz 直接测量到了大约 2 dB 的真空压缩,为提高利用压缩光测量低频信号的灵敏度奠定了基础.实验中我们仍然受到了外界环境低频噪声较大的干扰,下一步的工作重点将是优化各项指标,减小腔内损耗和传播损耗,降低外界噪声对实验的干扰,提高压缩度.并且锁定

压缩光相位, 实现压缩光的稳定输出, 得到一个可以直接应用的稳定输出的压缩光源.

参考文献

- [1] Kawamura S 2010 *Class. Quantum Grav.* **27** 084001
- [2] Harry G M 2010 *Class. Quantum Grav.* **27** 084006
- [3] Caves C M 1981 *Phys. Rev. D* **23** 1693
- [4] Tobias E, Steinlechner S, Bauchrowitz J, et al. 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 251102
- [5] Sun H X, Liu K, Zhang J X, Gao J R 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 234210 (in Chinese) [孙恒信, 刘奎, 张俊香, 郜江瑞 2015 物理学报 **64** 234210]
- [6] McKenzie K, Grosse N, Bowen W P, Whitcomb S E, Gray M B, McClelland D E, Lam P K 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 161105
- [7] McKenzie K, Gray M B, GoBler S, Lam P K, McClelland D E 2006 *Class. Quantum Grav.* **23** 245
- [8] McKenzie K, Shaddock D A, McClelland D E 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 231102
- [9] Vahlbruch H, Chelkowski S, Hage B, Franzen A, Danzmann K, Schnabel R 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 211102
- [10] Goda K, Miyakawa O, Mikhailov E E, Saraf S, Adhikari R, McKenzie K, Ward R, Vass S, Weinstein A J, Mavalvala N 2008 *Nat. Phys.* **4** 472
- [11] The LIGO Scientific Collaboration 2011 *Nat. Phys.* **7** 962
- [12] Taylor M A, et al. 2013 *Nature Photon.* **7** 229
- [13] Travis H, Singh R, Dowling J P, Mikhailov E E 2012 *Phys. Rev. A* **86** 023803
- [14] McKenzie K, Mikhailov E E, Goda K, Lam P K, Grosse N, Gray M B, Mavalvala N, McClelland D E 2005 *J. Opt. Soc. Am. B* **16** 1705
- [15] Vahlbruch H, Chelkowski S, Hage B, Franzen A, Danzmann K, Schnabel R 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 011101
- [16] Walls D F, Milburn G J 1994 *Quantum Optics* (Berlin: Springer Verlag) pp141–142

Generation of low-frequency squeezed states*

Liu Zeng-Jun¹⁾ Zhai Ze-Hui^{1)†} Sun Heng-Xin²⁾ Gao Jiang-Rui¹⁾²⁾

1) (*College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

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

(Received 4 November 2015; revised manuscript received 28 December 2015)

Abstract

Squeezed state of light is an important resource of optical measurements below the shot noise limit and has been used to improve measurement sensitivity in many areas such as gravitational wave detection, especially in audio frequency region. Compared with the high-frequency squeezed states, the generation of the low-frequency squeezed states is more difficult, because it is limited by several technical noise sources. In this paper we report the observation of more than 2 dB of vacuum squeezing at 1064 nm in the gravitational-wave detection band down to 3 kHz with a double-resonant optical parametric oscillator (OPO). The OPO has a configuration of linear cavity consisting of an input coupling mirror with a transmission of 11% at 532 nm and an output coupling mirror with the transmission of 12% at 1064 nm. The nonlinear materials in the OPO is type-I periodically poled potassium titanyl phosphate (PPKTP) crystal which is chosen for this experiment due to its higher nonlinearity, broader phase matching temperature, and smaller photo-thermal effect. The OPO is pumped by the light of 532 nm from Nd: YVO₄/KTP solid-state laser of maximum optical power 3 W. To avoid various noise coupled from the seed beam, the OPO is seeded by vacuum fluctuations instead of coherent field at the fundamental wavelength (1064 nm). A Pound-Drever-Hall locking scheme is used to lock the OPO cavity length with the signal derived from the reflected pump beam, so as to lock the pump field and also lock the fundamental field. To make both the pump and seed beams resonant simultaneously, the temperature of the PPKTP is carefully adjusted. The squeezed state can be detected on a homodyne detection by interfering it with the local oscillator and detected by a balanced detector with two photodiodes (EXT500 T) but having the same quantum efficiency of 86% at 1064 nm. The subsequent electronic noise is analyzed with a low-frequency spectrum analyzer, which shows that the audio noise sources from lab environment, locking quality, escape efficiency, propagation loss, homodyne efficiency and detection efficiency have effect on the squeezing produced by an OPO.

Keywords: low-frequency squeezed states, doubly wavelength resonant, squeezing vacuum

PACS: 04.80.Nn, 42.50.Dv, 42.65.Yj

DOI: 10.7498/aps.65.060401

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11174189), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2013AA8112008).

† Corresponding author. E-mail: zhzehui@sxu.edu.cn