

# 非理想平衡零拍探测系统对实测压缩度的影响

靳晓丽<sup>1,2</sup> 苏 静<sup>1,2</sup> 郑耀辉<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> 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, 山西 太原 030006

<sup>2</sup> 山西大学极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006

**摘要** 在实际测量过程中由于各种条件的限制,如非理想的 50:50 分束器、本底光与信号光的干涉效率和探测器的共模抑制比,都将造成实际测量的结果不能如实反映压缩态的水平。基于平衡零拍探测(BHD)的理论背景,结合干涉效率对压缩度的影响,定量分析了非理想平衡零拍探测系统对测量压缩度的影响,构建了压缩度测量偏差、实际压缩度、50:50 分束器的分束比、本底光与信号光的干涉效率和平衡零拍探测器的共模抑制比(CMRR)的关系。该分析结果对于量化压缩度的测量误差、估算压缩光产生系统的实际压缩度有重要意义。

**关键词** 量子光学; 平衡零拍探测; 干涉效率; 共模抑制比

**中图分类号** O438 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.1027001

## Influence of the Non-Ideal Balanced Homodyne Detection on the Measured Squeezing Degree

Jin Xiaoli<sup>1,2</sup> Su Jing<sup>1,2</sup> Zheng Yaohui<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

<sup>2</sup> Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

**Abstract** Due to the limitation of various conditions in the actual measurement, such as non-ideal 50:50 beam splitter, balanced homodyne detector and interference efficiency, which are adverse to characterizing the squeezed state by the balanced homodyne detection (BHD) system. On the basis of the theoretical background of the BHD, the influence of the non-ideal BHD including the splitter ratio of 50:50 beam splitter, the common mode rejection ratio (CMRR) of BHD and the interference efficiency on the measured squeezing degree are analyzed quantitatively, and the function of the deviation value is built with the real squeezing degree, splitter ratio of 50:50 beam splitter, interference efficiency and CMRR. The result is very important for quantify the measuring error, and infer the real squeezing degree from the measured squeezing degree.

**Key words** quantum optics; balanced homodyne detection; efficiency of interference; common mode rejection ratio

**OCIS codes** 270.5570; 270.6570; 270.5585

## 1 引 言

连续变量压缩态光场是进行连续变量量子信息研究和构建量子网络的重要资源<sup>[1]</sup>,如构建纠缠态光场实现量子传输<sup>[2-7]</sup>、量子密钥分发<sup>[8-9]</sup>和量子通信及产生 cluster 态实现通用量子计算<sup>[10-12]</sup>等方案,然而这些方案的保真度都被压缩态光场的实测压缩度所限制。为此,制备并有效探测高压压缩度压缩态光场具有重要意义<sup>[13-17]</sup>。

为了寻求能够准确测量量子噪声的探测方法,许多实验小组开展了高性能探测器方面的研究<sup>[18-21]</sup>,测量压缩态的量子噪声要求所有的经典噪声(如激光器的强度噪声和探测器的电子学噪声)尽可能小。平衡零拍探测方法能够有效降低经典噪声,放大信号光和直接表征信号光的正交分量起伏量,已成为连续变量量子信

**收稿日期:** 2016-04-22; **收到修改稿日期:** 2016-05-23

**基金项目:** 国家自然科学基金(61575114)、山西省优秀中青年学术带头人、三晋学者特聘教授

**作者简介:** 靳晓丽(1984—),女,博士,讲师,主要从事光量子器件方面的研究。E-mail: jinxiaoli@sxu.edu.cn

\* **通信联系人。** E-mail: yzhzheng@sxu.edu.cn

息科学研究中测量压缩态量子噪声的最佳方法之一<sup>[22-24]</sup>。

平衡零拍探测方法需要待测的信号光场和本底振荡光场在 50:50 分束器上发生干涉,分束器输出两端的光信号注入两光电管中产生光电流差信号,该信号携带待测信号光的正交振幅或正交相位分量信息。50:50分束器的分束比决定平衡零拍探测系统抑制经典噪声的能力,影响实测压缩度的大小;较低的干涉效率将引入真空噪声,从而降低测量的压缩度;同时,较低的平衡零拍探测共模抑制比也将降低实测压缩度的大小<sup>[25]</sup>。因而,在实际系统中,受非理想的 50:50 分束器、干涉效率和平衡零拍探测器等的限制,实测压缩度并不能反映实际压缩度的大小。然而,系统分析上述因素对实测压缩度影响的相关文献未见报道。

本文根据平衡零拍探测的理论,结合共模抑制比的定义,系统地分析平衡零拍探测系统中分束器的分束比、干涉效率、探测器的共模抑制比对实测压缩度的影响,构建测量偏差与实际压缩度、分束器的分束比、干涉效率和探测器的共模抑制比之间的关系,这对于量化测量误差、估算实际压缩度具有重要意义。

## 2 平衡零拍探测原理

单个光电探测器只能测量待测光场振幅分量和光子数的起伏量,对于更精确的测量压缩态的压缩和反压缩特征的要求,如量子态纯度的测量和量子层析成像技术的研究<sup>[18,26]</sup>,通过单个光电探测器来测量压缩态的压缩度(需要很苛刻的光源校准)并不是最理想的实验装置。

平衡零拍探测能够直接表征信号光场的正交振幅和正交位相分量,其已成为探测量子噪声的重要方法<sup>[24]</sup>。如图 1 所示, $\hat{a} = \alpha + \delta\hat{a}$  和  $\hat{b} = \beta + \delta\hat{b}$  分别表示待测信号光和本底振荡光,其中  $\alpha$  和  $\beta$  为常数,分别表示两光场的经典稳态部分,且  $\beta \gg \alpha$ ,  $\delta\hat{a}$  和  $\delta\hat{b}$  分别表示两光场的量子起伏部分。待测的微弱信号光和用于放大的本底振荡光在 50:50 分束器上发生干涉,在通常的理论计算中,多假设探测系统为理想的平衡零拍探测系统,干涉效率为 100%,分束器的分束比为 50:50,探测器的共模抑制比为无穷大。然而,受诸多因素的限制,实际的平衡零拍探测系统无法具备上述的理想特性。当信号光和本底振荡光在非理想的 50:50 分束器上发生干涉,输出两叠加光场  $\hat{c}$  和  $\hat{d}$  可表示为

$$\begin{cases} \hat{c} = r\hat{a} + t\hat{b} \cdot \exp(i\theta) \\ \hat{d} = t\hat{a} - r\hat{b} \cdot \exp(i\theta) \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $r$  和  $t$  分别为分束器的反射系数和透射系数, $\theta$  为待测信号光和本底振荡光的相对位相,由反射镜 M 后的压电陶瓷(PZT)来控制。分束器两个通道的输出光分别由光电二极管(PD)接收,假设两光电管的量子效率为 100%,则产生的光电流正比于入射光场的光子数  $\hat{c}^\dagger\hat{c}$  和  $\hat{d}^\dagger\hat{d}$ ,光场  $\hat{c}$  产生的光电流  $i_c$  为

$$\begin{aligned} i_c = \hat{c}^\dagger\hat{c} = & r^2\hat{a}^\dagger\hat{a} + rt\hat{a}^\dagger\hat{b} \cdot \exp(i\theta) + rt\hat{b}^\dagger\hat{a} \cdot \exp(-i\theta) + t^2\hat{b}^\dagger\hat{b} = r^2 [\alpha^2 + \alpha(\delta\hat{a}^\dagger + \delta\hat{a}) + \delta\hat{a}^\dagger\delta\hat{a}] + \\ & rt [\alpha\beta \cdot \exp(i\theta) + \alpha\delta\hat{b}^\dagger \cdot \exp(i\theta) + \beta\delta\hat{a}^\dagger \cdot \exp(i\theta) + \delta\hat{a}^\dagger\delta\hat{b} \cdot \exp(i\theta)] + \\ & rt [\alpha\beta \cdot \exp(-i\theta) + \alpha\delta\hat{b}^\dagger \cdot \exp(-i\theta) + \beta\delta\hat{a}^\dagger \cdot \exp(-i\theta) + \delta\hat{b}^\dagger\delta\hat{a} \cdot \exp(-i\theta)] + \\ & t^2 [\beta^2 + \beta(\delta\hat{b}^\dagger + \delta\hat{b}) + \delta\hat{b}^\dagger\delta\hat{b}]. \end{aligned} \quad (2)$$

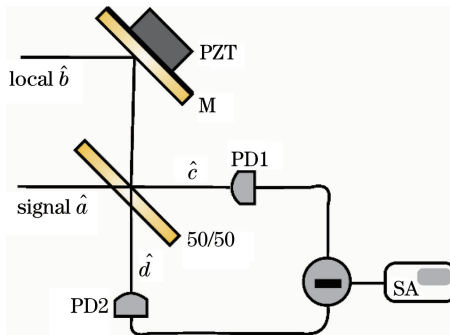


图 1 平衡零拍探测装置

Fig. 1 Balanced homodyne detection scheme

由于  $\beta \gg \alpha$ ,同时考虑到最终分析的是噪声起伏量,常数项可忽略,起伏量的二次项相对较小,也可省略,

(2) 式可简化为

$$\hat{i}_c = rt \{ \beta [\delta\hat{a}^+ \cdot \exp(i\theta) + \delta\hat{a} \cdot \exp(-i\theta)] \} + t^2 \beta (\delta\hat{b}^+ + \delta\hat{b}) = rt \beta \delta\hat{X}_a(\theta) + t^2 \beta \delta\hat{X}_b, \quad (3)$$

式中  $\delta\hat{X}_a(\theta) = \delta\hat{a}^+ \exp(i\theta) + \delta\hat{a} \exp(-i\theta)$  为信号光在相对相位  $\theta$  时的正交起伏分量,  $\delta\hat{X}_b$  为本底振荡光的正交起伏分量。同理, 另一个光电二极管的光电流为

$$\hat{i}_d = \hat{d}^+ \hat{d} = -rt \beta \delta\hat{X}_a(\theta) + r^2 \beta \delta\hat{X}_b. \quad (4)$$

两个光电二极管及下游电路的差异会引起探测器两条支路增益的不平衡, 因此在第 2 个光电流上乘以一个代表不平衡的增益因子  $G$ , 光电流  $\hat{i}_c$  与  $\hat{i}_d$  的差为

$$I_- = rt \beta \delta\hat{X}_a(\theta) + t^2 \beta \delta\hat{X}_b - G [-rt \beta \delta\hat{X}_a(\theta) + r^2 \beta \delta\hat{X}_b] = \beta [rt \delta\hat{X}_a(\theta) (1 + G) + \delta\hat{X}_b (t^2 - Gr^2)]. \quad (5)$$

本底振荡光场  $\hat{b}$  为相干态, 即  $V(\hat{X}_b) = 1$ , 则(5)式取平方后两光电流差的噪声方差为

$$V(I_-) = \beta^2 \{ V[\hat{X}_a(\theta)] r^2 t^2 (1 + G)^2 + (t^2 - Gr^2)^2 \}. \quad (6)$$

当两束光的干涉效率不等于 100% 时, 噪声方差相当于在(6)式中耦合了一定比例的真空噪声, 此时(6)式演变为

$$V(I_-) = \beta^2 \{ \{ 1 - \eta_{\text{int}}^2 + \eta_{\text{int}}^2 V[\hat{X}_a(\theta)] \} r^2 t^2 (1 + G)^2 + (t^2 - Gr^2)^2 \} \quad (7)$$

式中  $\eta_{\text{int}}$  为两束光在 50:50 分束器上的干涉效率。

### 3 理想平衡零拍探测系统分析

在理想平衡零拍探测系统中, 干涉效率为 100%, 分束器的分束比为 50:50, 即反射率  $R = r^2 = 50\%$ , 透射率  $T = t^2 = 50\%$ , 并且探测器的两条支路拥有相同的增益, 即  $G = 1$ , (7)式可简化为

$$V(I_-) = \beta^2 V[\hat{X}_a(\theta)]. \quad (8)$$

可见, 平衡零拍探测系统两光电流经减法器后, 得到的噪声方差是待测信号光场在相对相位  $\theta$  时的正交起伏分量噪声的  $\beta^2$  倍, 当  $\theta = 0$  时, 测量的是待测信号光场的正交振幅分量噪声的  $\beta^2$  倍; 当  $\theta = \pi/2$  时, 测量的是正交相位分量噪声的  $\beta^2$  倍, 即待测微弱信号光场的正交振幅和正交相位分量噪声被放大, 而  $\beta^2$  为本底振荡光的能量。如果待测信号光是压缩光, 为了测量其压缩度, 就需要确定与之相对应的散粒噪声基准 (SNL), 为此可以挡住信号光场, 相当于输入真空光场, 即  $V[\hat{X}_a(\theta)] = 1$ , 放开信号光在频谱分析仪上测得的待测信号光的压缩度为

$$S_{\text{meas}} = 10 \lg \beta^2 - 10 \lg \{ \beta^2 V[\hat{X}_a(\theta)] \} = -10 \lg \{ V[\hat{X}_a(\theta)] \}. \quad (9)$$

由此可见, 理想的平衡零拍探测系统所测量的压缩态的压缩度为实际压缩度。

### 4 非理想平衡零拍探测系统对测量压缩度的影响

对于非理想的平衡零拍探测系统, 在频谱分析仪上测得的压缩度  $S_{\text{meas}}$  由(7)式的噪声方差决定, 即

$$\begin{aligned} S_{\text{meas}} = & 10 \lg \{ \beta^2 [(1 - \eta_{\text{int}}^2 + \eta_{\text{int}}^2) r^2 t^2 (1 + G)^2 + (t^2 - Gr^2)^2] \} - \\ & 10 \lg \{ \beta^2 \{ \{ 1 - \eta_{\text{int}}^2 + \eta_{\text{int}}^2 V[\hat{X}_a(\theta)] \} r^2 t^2 (1 + G)^2 + (t^2 - Gr^2)^2 \} \} = \\ & 10 \lg \frac{\beta^2 [(1 - \eta_{\text{int}}^2 + \eta_{\text{int}}^2) r^2 t^2 (1 + G)^2 + (t^2 - Gr^2)^2]}{\beta^2 \{ \{ 1 - \eta_{\text{int}}^2 + \eta_{\text{int}}^2 V[\hat{X}_a(\theta)] \} r^2 t^2 (1 + G)^2 + (t^2 - Gr^2)^2 \}}. \end{aligned} \quad (10)$$

根据(10)式分别分析干涉效率、分束比、增益差异等参数对实测压缩度的影响。

#### 1) 分束比对实测压缩度的影响

在理想干涉效率和两条支路增益相等的情况下, 即  $G = 1$ ,  $\eta_{\text{int}} = 100\%$ , 分束比对测量压缩度的影响如图 2 所示, 随着实际压缩度的增加, 分束比变化量为  $\pm 5\%$  时, 测量偏差在 0.4 dB ~ 3 dB 之间变化。

#### 2) 共模抑制比对实测压缩度的影响

在分束器的分束比为 50:50,  $\eta_{\text{int}} = 100\%$  的情况下, 两条支路增益不平衡性对实测压缩度的影响如图 3 所示, 随着实际压缩度的增加, 不平衡的增益因子  $G$  变化 10% 时, 测量偏差在 0.1 dB ~ 1.1 dB 之间变化。

#### 3) 干涉效率对实测压缩度的影响

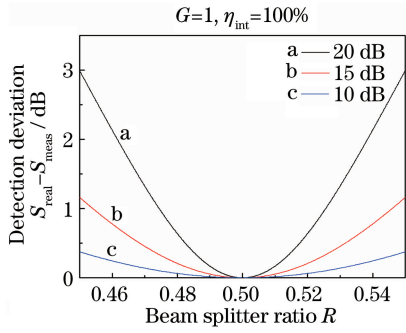


图 2 测量偏差随分束器的分束比的变化图

Fig. 2 Illustration of the detection deviation change with beam splitter ratio

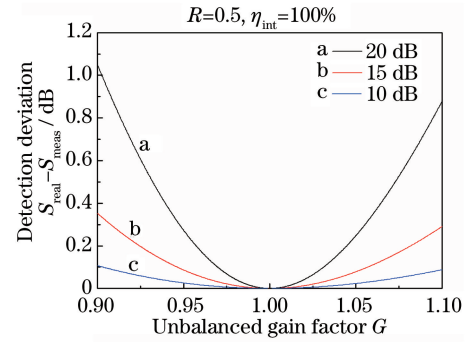


图 3 测量偏差随不平衡增益因子的变化图

Fig. 3 Illustration of the detection deviation change with unbalanced gain factor

在分束器分束比为 50:50,  $G=1$  的情况下, 待测信号光和本底振荡光匹配的干涉效率  $\eta_{int}$  对测量压缩度的影响如图 4 所示, 随着实际压缩度的增加, 干涉效率  $\eta_{int}$  在 97%~100% 变化时, 测量偏差在 1.8 dB~8.3 dB 之间变化。

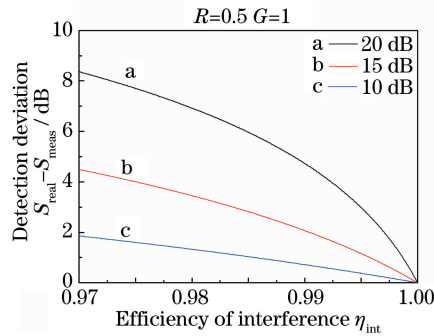


图 4 测量偏差随干涉效率的变化图

Fig. 4 Illustration of the detection deviation change with interference efficiency

#### 4) 综合分析

当  $\eta_{int}=0.998$  时, 分束比和两条探测支路增益的差异对实测压缩度的影响如图 5 所示。可以看出, 干

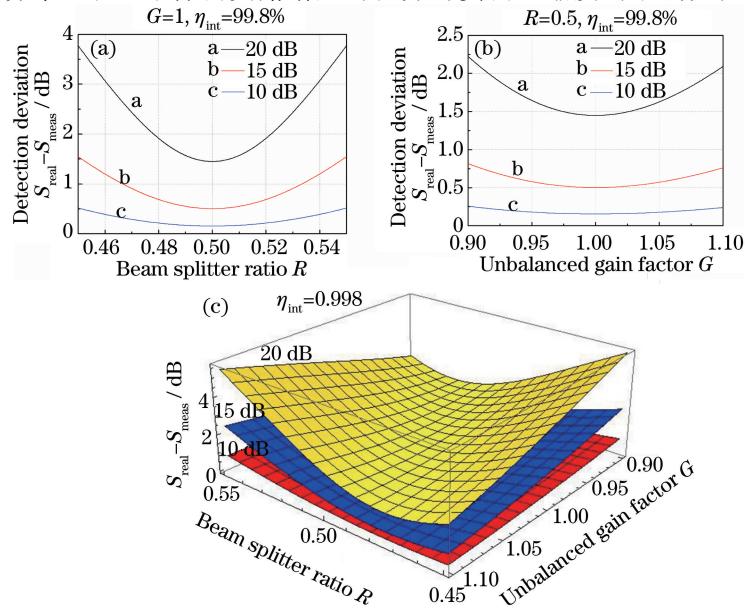


图 5 测量偏差随分束器的分束比和不平衡增益因子的变化图。(a)  $G=1$ ; (b)  $R=0.5$ ; (c) 三维图

Fig. 5 Illustration of the detection deviation change with beam splitter ratio and unbalanced gain factor.

(a)  $G=1$ ; (b)  $R=0.5$ ; (c) three-dimensional image

涉效率降至 99.8%，随着实际压缩度的增加，在分束比变化量为 ±5%， $G=1$  时，测量偏差在 0.5 dB~3.75 dB 之间变化；分束比为 50:50 时，不平衡的增益因子  $G$  变化 10%，测量偏差在 0.25 dB~2.24 dB 之间变化；当分束器的分束比和不平衡增益因子同时变化时，测量偏差在 1 dB~6 dB 之间变化。

### 5 平衡零拍探测系统实际参数的测量

为了分析实际压缩度，首先需要确定非理想实验系统中影响实测压缩度的实验参数，根据第 4 节的分析，50:50 分束器的分束比、本底光与信号光的干涉效率和平衡零拍探测器的共模抑制比等参数偏离理想值会引起实测压缩度与实际压缩度的偏离。理想平衡零拍探测系统中，50:50 分束器的分束比的理想值为 50:50，实际的分束比可以通过测量分束器输出两端光功率来确定。理想平衡零拍探测系统中，本底光与信号光的干涉效率的理想值为 100%，实际的干涉效率可以通过测量干涉信号的可见度来确定。干涉效率可表示为

$$\eta = \frac{|V_{\max} - V_{\min}|}{4\sqrt{V_1 V_2}}, \quad (11)$$

式中  $V_{\max}$  和  $V_{\min}$  分别为干涉信号强度的极大值和极小值， $V_1$  和  $V_2$  分别为两束光各自的平均强度。测量上述参数后，根据(11)式即可得到干涉效率的大小。

共模抑制比(CMRR)是指平衡零拍探测器对相同信号的抑制能力，其为反映平衡零拍探测器抑制经典噪声的重要指标，与不平衡的  $G$  相关。

根据测量共模抑制比的方法——将一束在测量频率处加有调制信号的激光，经由 50:50 分束器后，分束器输出两端的信号相减时，其中一端挡住另一端照射在频谱分析仪上所测得的噪声功率谱  $10\lg P_{\text{com}}$  与两端同时受光照射所测得的噪声功率谱  $10\lg(\Delta \times P_{\text{com}})$  的差值。

$$R_{\text{CMRR}} = 10\lg P_{\text{com}} - 10\lg(\Delta \times P_{\text{com}}) = 20\lg \frac{I_{\text{com}}}{\Delta \times I_{\text{com}}}, \quad (12)$$

式中  $R_{\text{CMRR}}$  为共模抑制比， $I_{\text{com}}$  和  $\Delta \times I_{\text{com}}$  分别为一条支路的光电流和两条支路的电流差。理想 50:50 分束器情况下，注入光电管前的光功率相同， $I_{\text{com}}$  和  $\Delta \times I_{\text{com}}$  与不平衡的增益因子  $G$  有关，(12)式可改写为

$$R_{\text{CMRR}} = 20\lg \frac{1+G}{2|1-G|}. \quad (13)$$

因此共模抑制比实际反映的是平衡零拍探测器两条支路的增益差异，当两条支路的增益相等时，共模抑制比为无穷大；随着两条支路的增益差异逐渐增大，共模抑制比逐渐减小。根据(10)式和(13)式，得到平衡零拍探测器共模抑制比对测量压缩度的影响，如图 6 所示。同样的共模抑制比，随着实际压缩度的增加测量偏差增大，即压缩态的压缩度越高的情况下，为更准确的测量压缩度需要提高探测器的共模抑制比。据此，探测器两条支路的增益差异转换为共模抑制比的大小，方便在实际工作中分析和处理。

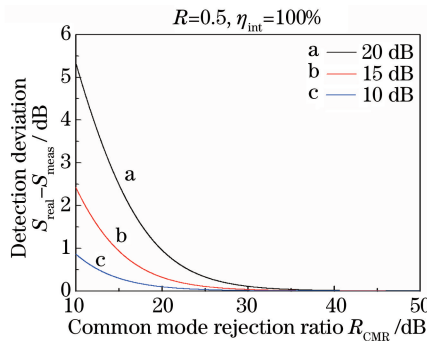


图 6 测量偏差随实际压缩度和共模抑制比的变化图

Fig. 6 Illustration of the detection deviation versus the real squeezing degree and common mode rejection ratio

基于非理想平衡零拍探测器中上述参数实际值的测量，为通过实测压缩度来分析实际压缩度的大小，以及分析实测压缩度和实际压缩度的偏离提供依据。

## 6 结 论

非理想平衡零拍探测系统的限制,导致所测得的压缩度并不能准确地反映非经典态的实际压缩度。定量分析了非理想平衡零拍探测系统对测量压缩度的影响,构建了测量偏差与实际压缩度、50:50分束器的分束比、干涉效率和探测器共模抑制比之间的关系。结果显示,在相同的非理想平衡零拍探测的条件下,随着实际压缩度的增加,测量偏差随之增大。该分析结果对于根据实际压缩度的大小设计相应参数的平衡零拍探测系统具有指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 Braunstein S L, van Loock P. Quantum information with continuous variables[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2005, 77(2): 513-577.
- 2 Furusawa A, Sørensen J L, Braunstein S L, *et al.* Unconditional quantum teleportation[J]. *Science*, 1998, 282(5389): 706-709.
- 3 Bowen W P, Treps N, Buchler B C, *et al.* Experimental investigation of continuous-variable quantum teleportation[J]. *Physical Review A*, 2005, 67(3): 032302.
- 4 Takei N, Yonezawa H, Aoki T, *et al.* High-fidelity teleportation beyond the no-cloning limit and entanglement swapping for continuous variables[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(22): 220502.
- 5 Liu J M, Li J, Guo G C. Improving the fidelity of continuous-variable quantum teleportation by tuning displacement gain[J]. *Chinese Optics Letters*, 2003, 1(2): 114-117.
- 6 Vahlbruch H, Mehmet M, Chelkowski S, *et al.* Observation of squeezed light with 10 dB quantum-noise reduction[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(3): 033602.
- 7 Chen H N, Liu J M. Teleportation of a two-particle four-component squeezed vacuum state by linear optical elements[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(5): 440-442.
- 8 Bencheikh K, Symul T, Jankovic A, *et al.* Quantum key distribution with continuous variables[J]. *Journal of Modern Optics*, 2001, 48(13): 1903-1920.
- 9 Su X L, Wang W Z, Wang Y, *et al.* Continuous variable quantum key distribution based on optical entangled states without signal modulation[J]. *Europhysics Letters*, 2009, 87(2): 20005.
- 10 Menicucci N C, Van Loock P, Gu M, *et al.* Universal quantum computation with continuous-variable cluster states[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(11): 110501.
- 11 Deng X W, Hao S H, Tian C X, *et al.* Disappearance and revival of squeezing in quantum communication with squeezed state over a noisy channel[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(8): 081105.
- 12 Hao S H, Deng X W, Su X L, *et al.* Gates for one-way quantum computation based on Einstein-Podolsky-Rosen entanglement[J]. *Physical Review A*, 2014, 89(3): 032311.
- 13 Hao S H, Deng X W, Zhang Q, *et al.* Distribution of a modulated squeezed state over a lossy channel[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(12): 122701.
- 14 Zheng Y H, Wu Z Q, Huo M R, *et al.* Generation of a continuous-wave squeezed vacuum state at 1.3  $\mu\text{m}$  by employing a home-made all-solid-state laser as pump source[J]. *Chinese Physics B*, 2013, 22(9): 094206.
- 15 Takeno Y, Yukawa M, Yonezawa H, *et al.* Observation of  $-9$  dB quadrature squeezing with improvement of phase stability in homodyne measurement[J]. *Optics Express*, 2007, 15(7): 4321-4327.
- 16 Vahlbruch H, Mehmet M, Chelkowski S, *et al.* Observation of squeezed light with 10 dB quantum-noise reduction[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(3): 033602.
- 17 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.
- 18 Breitenbach G, Schiller S, Mlynek J. Measurement of the quantum states of squeezed light[J]. *Nature*, 1997, 387(6632): 471-475.
- 19 Zhou H J, Yang W H, Li Z X, *et al.* A bootstrapped, low-noise, and high-gain photodetector for shot noise measurement[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(1): 013111.
- 20 Zhou H J, Wang W Z, Chen C Y, *et al.* A low-noise, large-dynamic-range-enhanced amplifier based on JFET buffering input and JFET bootstrap structure[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(4): 2101-2105.
- 21 Zhou Qianqian, Liu Jianli, Zhang Kuanshou. Low-noise, broadband photo-detector designs in quantum optics[J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2010, 16(2): 152-157.

- 周倩倩, 刘建丽, 张宽收. 量子光学实验中宽带低噪声光电探测器的研制[J]. 量子光学学报, 2010, 16(2): 152-157.
- 22 Wang Jinjing, Jia Xiaojun, Peng Kunchi. Improvement of balanced homodyne detector[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0127001.
- 王金晶, 贾晓军, 彭堃堃. 平衡零拍探测器的改进[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0127001.
- 23 Jin X L, Su J, Zheng Y H, *et al.* Balanced homodyne detection with high common mode rejection ratio based on parameter compensation of two arbitrary photodiodes[J]. Optics Express, 2015, 23(18): 23859-23866.
- 24 Yuen H P, Chan V W S. Noise in homodyne and heterodyne detection[J]. Optics Letters, 1983, 8(3): 177-179.
- 25 Stefszky M S, Mow-Lowry C M, Chua S Y, *et al.* Balanced homodyne detection of optical quantum states at audio-band frequencies and below[J]. Classical and Quantum Gravity, 2012, 29(14): 145015.
- 26 Vasilyev M, Choi S K, Kumar P, *et al.* Tomographic measurement of joint photon statistics of the twin-beam quantum state[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(11): 2354-2357.