

适用于测量脉冲光量子噪声的差分探测系统

郭学石 高亢 刘楠楠 杨磊 李小英

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 采用具有高重复频率的连续变量脉冲量子态进行量子通信, 不仅可利用单个脉冲编码信息, 还可进行波分复用和时分复用, 因而有助于提高量子通信系统的速度和容量。为了消除脉冲光重复频率信号对探测系统的饱和效应, 设计制作了一种适用于测量脉冲光正交分量或强度噪声起伏的差分探测系统。对于利用变压器耦合的两个光电二极管的差分光电流交流分量, 在采用低噪声放大器放大之前, 先利用高隔离度的低通滤波器抑制脉冲光重复频率的拍频。该探测系统共模抑制比可达 54 dB。入射的总光功率约为 0.32 mW 时, 测得的光电流散粒噪声比电子噪声基底高 8.7 dB。通过平衡零拍探测对散粒噪声基准进行标定, 结果说明该系统适于测量脉冲光的量子噪声。

关键词 量子光学; 脉冲光; 连续变量量子态; 差分探测

中图分类号 O431.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0927002

Differential Detection System for Measuring the Quantum Noise of Pulsed Light

Guo Xueshi Gao Kang Liu Nannan Yang Lei Li Xiaoying

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technology of Ministry of Education, College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract Speed and capacity of the quantum communication system can be increased by using the pulsed continuous variable entanglements with short pulse durations and high repetition rates, because the information can be encoded with individual pulses, and wavelength-division and time-division multiplexing can be applied. To avoid the saturation caused by the repetition rate of light pulses, we experimentally demonstrate a differential detection system, which is suitable for measuring the noise of pulsed lights. The photon-current difference of the two photo-diodes coupled by a transformer is passed through low pass filters to reject the repetition beat signal of pulsed light. Then it is amplified by the cascaded low-noise electronic amplifiers. The common mode reject ratio of the system is about 54 dB, and the noise of the photon-current difference is beyond that of the electronic background up to 8.7 dB when the sum of the total optical power incident to the two photo-diodes is about 0.32 mW. When the pulsed laser serves as the local oscillator, we successfully calibrate the shot noise limit by using balanced homodyne detection, showing that the detection system can be used to measure the quantum noise of pulsed optical fields.

Key words quantum optics; pulsed light; continuous variable quantum state; differential detection

OCIS codes 270.5570; 270.5585; 270.6570

1 引言

差分探测系统(DDS), 例如平衡零拍探测和直接探测差分探测系统, 在量子光学、量子信息以及精

密量子测量等技术中均有重要的应用价值^[1-7]。差分探测系统通常由以下三部分构成: 两个光电探测器组成的光电转换级, 实现电流相减的运算节点, 以

收稿日期: 2013-03-28; 收到修改稿日期: 2013-04-25

基金项目: 国家 973 计划(2010CB923101)

作者简介: 郭学石(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事量子光学与非线性光学等方面的研究。

E-mail: xueshigu@tju.edu.cn

导师简介: 李小英(1968—), 女, 博士, 教授, 主要从事量子光学与非线性光学等方面的研究。

E-mail: xiaoyingli@tju.edu.cn(通信联系人)

及低噪声滤波与放大电路^[1,4]。实际应用中,通常要求该系统具有高量子效率的光电转换,低噪声和大动态范围的信号放大等特性。由于上述参数存在相互制约的关系,在设计中必须根据实际的测量要求进行优化^[8]。

近年来,连续变量脉冲量子态由于具有高重复频率、宽频谱的特点而引起了人们的广泛关注^[9-12]。它不仅可利用单个脉冲编码信息,还可进行波分复用和时分复用,有助于提高量子通信系统的速度和容量。但是,对用于探测脉冲光噪声特性的差分探测系统,如何防止脉冲光的拍频信号使放大器产生饱和或者非线性响应是一个关键问题。在平衡零拍探测系统中,由于入射到两个探测器上的平均光功率几乎相等,该影响可以通过减法运算节点消除^[13-15]。而在直接差分探测系统中,入射到两个探测器的光功率通常不相等。在差分信号进入放大器前,必须通过滤波器滤除脉冲光拍频信号以保证放大器工作在线性区^[3]。

本文研制了一种适用于测量脉冲光量子噪声的差分探测系统。在简单介绍两种典型的差分探测系统的原理和应用之后,描述了可测量脉冲光噪声的

探测系统的设计方法和原理,并在此基础上对该差分探测系统的性能进行测试。测试中,采用脉冲光为本底光,通过平衡零拍探测对该差分探测系统的散粒噪声进行标定。该系统可用于测量脉冲光的正交分量或强度的量子噪声。

2 两种典型的差分探测系统

图 1(a)、(b)是量子光学中两种常见的差分探测系统的原理简图。在图 1(a)所示的直接差分探测系统中,待测的两束光直接入射到两个光电二极管(D1, D2)上,其差分光电流经过减法运算节点后被滤波和放大。设这两束光可用算符 \hat{a}_1 与 \hat{a}_2 表示,输出对应于强度差算符 $\hat{I}_d = \hat{a}_1^\dagger \hat{a}_1 - \hat{a}_2^\dagger \hat{a}_2$,即该系统能够测量两束光的强度差起伏^[3,16-17]。在对重复频率为 f_0 的超短脉冲光进行探测时,差分探测系统输出的交流(AC)信号在频率为重复频率整数倍处存在拍频^[1,18]。而对于频率为 nf_0 之外的交流信号,系统的交流输出起伏正比于光子数差算符的起伏 $\Delta I_d^2 = \langle \hat{I}_d^2 \rangle - \langle \hat{I}_d \rangle^2$ 。

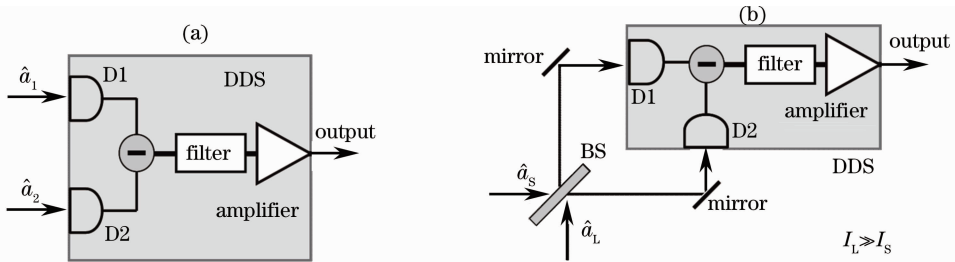


图 1 差分探测系统原理图。(a)直接差分探测; (b)平衡零拍探测

Fig. 1 Theoretical diagrams for (a) differential and (b) balanced homodyne detections

在图 1(b)所示的平衡零拍探测系统中,一束本底光与一束微弱的信号光分别从 50:50 分束器(BS)的两端输入,差分(平衡零拍)探测系统探测的是该 BS 的两束输出光束。待测的微弱信号光以及与其模式相同的本底光分别用算符 \hat{a}_L 与 \hat{a}_s 表示,那么当本底光与信号光有固定相位差 φ_0 且本底光强度远大于信号光强度时,系统的交流输出起伏 Δi_{AC}^2 可以表示为^[1]

$$\Delta i_{AC}^2 = k I_L \Delta \hat{X}_s(\varphi_0)^2, \quad (1)$$

其中 k 为与光场无关的比例系数,由探测系统结构决定; I_L 为本底光的光强; $\Delta \hat{X}_s(\varphi_0)^2 = \langle \hat{X}_s(\varphi_0)^2 \rangle - \langle \hat{X}_s(\varphi_0) \rangle^2$ 为信号场的正交振幅算符的起伏,其中 $\hat{X}_s(\varphi_0)$ 为信号光的正交分量算符且满足 $\hat{X}_s(\varphi_0) = \hat{a}_s \exp(-i\varphi_0) + \hat{a}_s^\dagger \exp(i\varphi_0)$ 。(1) 式说明平衡零拍探

测系统可以通过扫描本底光的相位差测量出信号光的正交振幅起伏 $\Delta \hat{X}_s(\varphi_0)^2$ 。对于信号光是真空态的特殊情况,由于光电二极管的平均光电流正比于入射的本底光光强 I_L ,系统的输出电子功率和两个光电二极管的总光电流成线性关系。差分探测系统具有共模抑制的特性,因此这种线性关系及其比例不会受到本底光噪声特性的影响,系数 k 表明该系统的散粒噪声极限。在搭建差分探测系统的过程中需要通过实验对这种线性关系进行验证,并对其散粒噪声极限进行标定。

3 高信噪比差分探测系统的电路设计

差分探测系统的电路结构如图 2 所示。待测的两束光通过“input 1”与“input 2”端口入射到差分

探测系统。其光电转换级以及减法运算节点由两个±6 V电源供电的光敏直径为0.3 mm的PIN光电二极管(D1, D2; OSI-InGaAs300)串联组成, 电流表A1与A2(Agilent 34401)用于测量两个光电二极管的平均光电流。根据基尔霍夫定律, 该结构输出两个光电二极管电流之差。输出的差分电流的交流分量通过一个绕线比为 $r=6:1$ 的变压器耦合到阻值为50 Ω 的负载电阻上实现电流电压转换。根据理想变压器原边与副边电流关系方程, 匝数比为 $r:1$ 的变压器将流过负载电阻的光电流放大 r^2 倍, 因此该变压器对光电流也起到了信号放大的作用。负载电阻输出通过两个通频带为直流到21.5 MHz的高隔离度无源低通滤波器(LPF)和两个功率增益为25 dB的低噪声放大器(ZFL500-LN+)进行滤波和放大。为了尽量降低外界的电磁干扰, 系统中的光电二极管、变压器与负载电阻通过一个良好密封的金属外壳屏蔽, 负载电阻、滤波器与放大器通过特征阻抗为50 Ω 的同轴电缆连接。

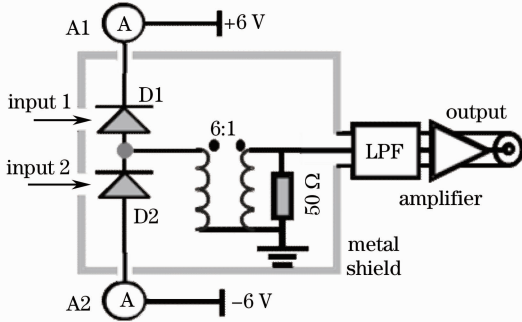


图2 差分探测系统的电路结构

Fig. 2 Circuit structure of the differential detection system

下面分析该差分探测系统的信噪比(SNR)。假设实验中利用电子频谱仪在单一频率下进行测量, 并且滤波器损耗和电路传输损耗可忽略, 那么电子频谱仪测量到的电压起伏信号 ΔV_{out}^2 可表示为

$$\Delta V_{out}^2 = A(\Delta V_{photo}^2 + \Delta V_{th}^2 + \Delta V_{Amp}^2) + \Delta V_b^2, \quad (2)$$

其中 A 为放大器功率增益; ΔV_{photo}^2 是光电流引起的在放大器输入端的电压起伏, 也是该系统的有效信号; $\Delta V_{th}^2 = 4k_B TR_{in}$ 表示放大器输入电阻的热噪声^[19], R_{in} 表示输入电阻, k_B 是玻尔兹曼常数, T 代表环境温度; ΔV_{Amp}^2 表示放大器引入的额外噪声(换算到放大器输入端); ΔV_b^2 是频谱仪的噪声基底。假设入射的光为理想的相干态, 且在光电二极管上产生的光电流分别为 i_1 和 i_2 , 则对应的散粒噪声响应是 $\Delta V_{photo}^2 = 2e(i_1 + i_2)r^4 R_{in}^2$, 其中 e 是电子的电量。

综上所述, 系统的信噪比的值为

$$R_{SN} = \frac{2e(i_1 + i_2)r^4 R_{in}^2}{(4k_B TR_{in} + \Delta V_{Amp}^2) + \Delta V_b^2/A}. \quad (3)$$

系统的信噪比正比于变压器匝数比的4次方, 因此增大变压器的匝数比 r 能够明显提高系统的信噪比。提高放大倍数 A 能抑制测量仪器产生的噪声 ΔV_b^2 , 但当探测器输出远大于仪器噪声时, 进一步提高 A 不能提高信噪比。需要注意的是, 系统的带宽会随着变压器匝数比和负载电阻 R_{in} 的增加而迅速下降, 因此需要综合考虑探测频率与入射光强度, 进而选择合适的变压器匝数比。差分探测系统中, 选择匝数比为6:1的变压器, 可使光电流噪声得到36倍的放大, 显著提高了该差分系统的信噪比。变压器的电流放大作用使该系统能够利用阻值较低的负载电阻(50 Ω), 以便与商用的滤波器、放大器和同轴电缆实现阻抗匹配。

4 差分探测系统的性能测试

在测量光场的量子噪声过程中, 通常需要将测量结果和散粒噪声基准(标准量子极限)进行比较, 采用图3所示的平衡零拍探测装置对差分探测系统的平衡性与实现减法的性能进行测试。根据平衡零拍探测的原理, 图3中的装置对BS输入的真空噪声正交振幅的起伏进行测量, 其输出可作为系统散粒噪声响应的标定值。实验中用通信波段光纤锁模激光器作为本底光光源, 其重复频率约为41.3 MHz。激光器输出经过可变光学衰减器(VOA)适当衰减后经BS分成两束光。为了保证严格的分束比, 该分束器由两组光纤偏振控制器与光纤偏振分束器等效实现。BS输出的两束光分别经过反射镜调整方向后入射到DDS的输入端, 并通过电子频谱仪(Agilent E4402B)测量。其中一路的反射镜固定在精密平移台上以实现光程的细微调节, 使两路脉冲

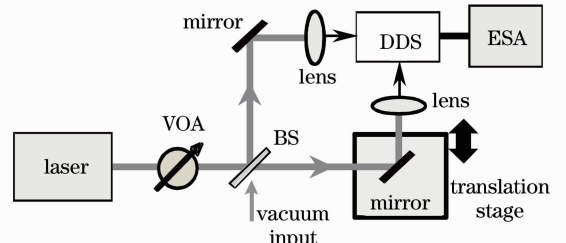


图3 采用平衡零拍系统测试差分探测系统的装置

Fig. 3 Setup for the testing of the differential detection system

光同时到达差分探测系统。为了保证耦合效率,入射的两束光用两个焦距为 40 mm 的透镜聚焦。

首先对差分探测系统响应的平衡性进行测试。调节可变光学衰减器使两个透镜后的光功率相同,并分别用光功率计和电流表测量入射的光功率和光电二极管的光电流。由测量结果得到,两个光电二极管的直流响应率均为 (1.08 ± 0.02) A/W。在此基础上利用电子频谱仪(ESA)分别测量单束光造成的光电流噪声(挡住另一束光),测量到的噪声功率的差异约为 0.3%。上述结果表明探测系统中的两个光电二极管的直流特性和交流特性均十分相似,因此在实验中可以忽略光电二极管的不平衡性。

接下来对差分探测系统的减法性能进行测试。引入共模抑制比(CMMR)以定量地描述差分探测系统实现减法的性能。假设入射光有足够强的频率为 f 的强度调制,那么对于一个不平衡性可忽略的差分探测系统,其在频率 f 处的共模抑制比的值为^[14]

$$R_{\text{CMM}} = \frac{P_{\text{out}}(I, 0)}{P_{\text{out}}(I, I)}, \quad (4)$$

其中 $P_{\text{out}}(I, 0)$ 表示一个光电二极管入射光强度为 I ,另一个光电二极管没有光入射时,探测系统在频率 f 处的输出功率;而 $P_{\text{out}}(I, I)$ 表示两个光电二极管入射光强均为 I 时,探测系统在频率 f 处的输出功率。为了测量系统的共模抑制比,断开图 2 中低通滤波器和放大器而直接测量负载电阻在激光器重复频率处(41.3 MHz 附近)的系统输出的电子功率。测量过程中调节光学可变衰减器,保证两个光电二极管的光功率均为 $200 \mu\text{W}$,同时通过平移台来改变两束光到达探测系统的光程差。在整个平移台的自由程(2.5 cm)内观察到的最大共模抑制比为 54 dB,其测量结果如图 4 所示。该结果表明差分探测系统在相减节点上脉冲时间匹配良好,并且物理上良好地实现了电流相减。在最大共模抑制比的位置前后移动平移台时,共模抑制比迅速下降,因此共模抑制比最大可作为脉冲差分探测中光程重合的判据。

最后,在共模抑制比最大的条件下标定该差分探测系统在频率为 5 MHz 时的散粒噪声极限,也采用图 3 所示的装置,通过平衡零拍探测图 3 中真空输入场的正交振幅起伏。实验中,改变光学可变衰减器的衰减量,以便测量不同入射光功率下两个光电二极管的直流光电流之和 $i_1 + i_2$ 与差分探测系统的交流输出功率。测量过程中电子频谱仪的分辨率

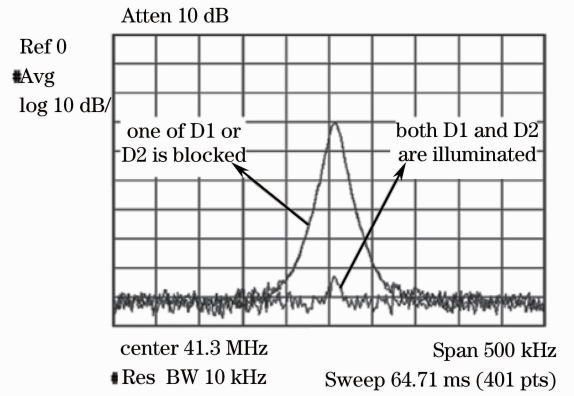


图 4 共模抑制比测量结果

滤波器带宽(RBW)与视频滤波器带宽(VBW)分别为 100 kHz 和 300 kHz。测量的结果如图 5 中方形数据点所示。图中的每个点均由仪器测量值除以 RBW 得到,实线是对数据点的线性拟合。测量结果表明该差分探测系统的交流信号输出与两个光电二极管的总的光电流成良好的线性关系,并且该差分探测系统在总光电流为 $350 \mu\text{A}$ 时,即当入射到平衡零拍探测系统两个探测器的总光功率约为 0.32 mW 时,散粒噪声比电子噪声基底大 8.7 dB,这种高信噪比的特性适合弱信号脉冲光的量子噪声测量。

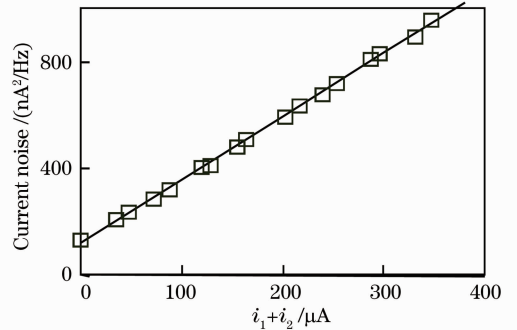


图 5 利用平衡零拍探测系统测量真空噪声结果

Fig. 5 Vacuum noise measured by homodyne detection system

5 结 论

设计并制作了一种适用于探测脉冲光量子噪声特性的差分探测系统。该系统利用变压器对光电流的交流分量进行耦合,在采用低噪声放大器放大之前,利用低通滤波器消除脉冲光拍频的影响。在测试中,用锁模脉冲激光器作为本底光光源,搭建了平衡零拍探测装置以实现对该系统的散粒噪声的标定。测试结果表明该差分探测系统共模抑制比可达

54 dB,并且与入射光功率成良好的线性关系。入射到两个探测器的总光功率约为 0.32 mW 时,测得的光电流散粒噪声比电子噪声基底高 8.7 dB。该系统的响应线性度、响应率以及共模抑制比均接近目前国内外同类系统的先进水平,特别是,由于该系统采用了高隔离度的低通滤波器,不仅适合于平衡零拍探测,也适合于对光功率不相同的两束脉冲光做直接差分探测,在连续变量脉冲量子态的研究中用途广泛。

差分探测系统的带宽受限于探测器结电容、变压器以及低通滤波器,并且明显小于测试用脉冲光的重复频率。因此,电子频谱仪所分析的差分系统的光电流是多个光脉冲噪声特性的平均。对于统计特性相同且相互独立的光脉冲串,测量到的平均值可以准确反映脉冲光的噪声特性。但是对于关心单个脉冲的噪声特性的应用,需利用时域平衡零拍探测系统进行测量,此时,系统的带宽将直接影响其性能。为了实现对脉冲光的时域差分探测,差分探测系统还需从以下方面进行改进:采用结电容较小的光电二极管,采用高速的射频变压器或用合适的等效电容电感网络替换变压器,以及通过带阻滤波器实现对脉冲拍频的隔离。

参 考 文 献

- 1 Hans-A Bachor, Timothy C Ralph. A Guide to Experiments in Quantum Optics[M]. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004. 162—165.
- 2 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.
- 3 Jay E Sharping, Marco Fiorentino, Prem Kumar. Observation of twin-beam-type quantum correlation in optical fiber [J]. Opt Lett, 2001, 26(6): 367—369.
- 4 Wang Hai, Xie Changde, Gao Jiangrui, *et al.*. The measurement of weak absorption spectroscopy using intensity difference squeezed light [J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(8): 1143—1147.
王海, 谢常德, 郜江瑞, 等. 应用强度差压缩光进行微弱吸收

- 光谱学测量[J]. 光学学报, 1996, 16(8): 1143—1147.
- 5 Ling An Wu, H J Kimble, J L Hall, *et al.*. Generation of squeezed states by parametric down conversion [J]. Phy Rev Lett, 1986, 57(20): 2520—2523.
- 6 A I Lvovsky, M G Raymer. Continuous-variable optical quantum-state tomography [J]. Rev Mod Phys, 2009, 81(1): 299—332.
- 7 Jing Jietai, Li Xiaoying, Pan Qing. Comparison between two methods measuring of Einstein-Podolsky-Rosen correlation for continuous variables [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(2): 132—136.
荆杰泰, 李小英, 潘庆. 两种连续变量爱因斯坦-波多尔斯基-罗森关联测量方法的比较[J]. 光学学报, 2003, 23(2): 132—136.
- 8 Gray B Malcolm, Shaddock A Daniel, Barb C Charles, *et al.*. Photodetector designs for low-noise, broadband, and high-power applications [J]. Rev Sci Instrum, 1998, 69(11): 3755—3762.
- 9 M D Reid, P D Drummond, W P Bowen, *et al.*. Colloquium; the Einstein-Podolsky-Rosen paradox; from concepts to applications [J]. Rev Mod Phys, 2009, 81(4): 1727—1751.
- 10 Y Eto, Y Zhang, T Hirano. Transporting continuous quantum variables of individual light pulses [J]. Opt Express, 2011, 19(2): 1360—1366.
- 11 H Hansen, T Aichele, C Hettich, *et al.*. Ultrasensitive pulsed, balanced homodyne detector: application to time-domain quantum measurements [J]. Opt Lett, 2001, 26(21): 1714—1716.
- 12 X Guo, X Li, N Liu, *et al.*. An all-fiber source of pulsed twin beams for quantum communication [J]. Appl Phys Lett, 2012, 101(26): 261111.
- 13 Okubo Ryuhi, Hirano Mayumi, Zhang Yun, *et al.*. Pulse-resolved measurement of quadrature phase amplitudes of squeezed pulse trains at a repetition rate of 76 MHz [J]. Opt Lett, 2008, 33(13): 1458—1460.
- 14 Yue-Meng Chi, Bing Qi, Wen Zhu, *et al.*. A balanced homodyne detector for high-rate Gaussian-modulated coherent-state quantum key distribution [J]. New J Phys, 2011, 13(1): 013003.
- 15 R Kumar, E Barrios, A MacRae, *et al.*. Versatile wideband balanced detector for quantum optical homodyne tomography [J]. Opt Commun, 2012, 285(24): 5259—5267.
- 16 B Huttner, J J Baumberg, J F Ryan, *et al.*. Detection of short pulses of non-classical light [J]. Opt Commun, 1992, 90(1): 128—132.
- 17 Z Y Ou, H J Kimble. Probability distribution of photoelectric currents in photodetection processes and its connection to the measurement of a quantum state [J]. Phys Rev A, 1995, 52(4): 3126—3146.
- 18 R E Slusher, P Grangier, A LaPorta, *et al.*. Pulsed squeezed light [J]. Phys Rev Lett, 1987, 59(22): 2566—2569.
- 19 G N Milford, C C Harb, E H Huntington. Shot noise limited, microwave bandwidth photodetector design [J]. Rev Sci Instrum, 2006, 77(11): 114701.

栏目编辑: 李文喆