量子光学学报 31(1):010201, 2025
Journal of Quantum Optics

DOI:10.3788/JQO20253101.0201

高性能GHz带宽平衡零拍探测器的研制

段放世[1]， 李超[1]， 索普一[1]， 秦忠忠[1,2†]

（1. 山西大学光电研究所，光量子技术与器件全国重点实验室 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：高带宽、高共模抑制比的平衡零拍探测器在高速量子通信、宽带压缩光和纠缠光探测、宽带量子精密测量等领域具有重要应用价值。本文研制了一款GHz带宽、高共模抑制比和交直流分开的平衡零拍探测器。通过使用射频运放芯片，在1550 nm波段探测器的带宽可达1 GHz，最高信噪比为12 dB。通过将两个光电二极管分别对称放置于PCB的正反两侧，该探测器在20 MHz处获得了60.65 dB的共模抑制比。随后，使用该平衡零拍探测器测量1550 nm正交振幅压缩态光场的压缩度，在带宽3.5 MHz～71.5 MHz范围内观测到了最高−2.5 dB压缩。研究结果表明，该高带宽、高共模抑制比的平衡零拍探测器在宽带压缩光探测方面具有潜在应用价值。

关键词：平衡零拍探测器；高带宽；共模抑制比；信噪比；压缩光

中图分类号：TN15　　**文献标识码：**A

Development of a High-performance GHz Bandwidth Balanced Homodyne Detector

DUAN Fangshi[1], LI Chao[1], SUO Puyi[1], QIN Zhongzhong[1,2†]

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

Abstract: **Objective** High performance balanced homodyne detectors with high bandwidth, high quantum efficiency, reasonable gain, and high common-mode rejection ratio are critical in the fields of high-speed quantum communication, broadband squeezed light and entangled light detection, and broadband quantum precision measurement. However, it is challenging to design and develop GHz bandwidth balanced homodyne detectors with overall high performance. For example, the actually achieved bandwidth and gain are usually limited by the distributed capacitance of the circuit board. Furthermore, high common-mode rejection ratio, linear response and low noise performance are also technically challenging due to fabrication and soldering processes of the printed circuit board (PCB).

收稿日期：2023-08-26； **接受日期：**2023-11-17

基金项目：国家自然科学基金（11974227）；山西省基础研究计划（20210302122002）；山西省回国留学人员科研资助项目（2021—003）；山西省“1331工程”提质增效建设计划项目（2022-07-01）

作者简介：段放世（1994−），男，山西太原人，硕士研究生，主要研究方向为量子光学。

†通信作者：秦忠忠，E-mail: zzqin1988@gmail.com

Methods In comparison with other high bandwidth balanced homodyne detectors developed in previous works, we have adopted a design that separates alternating current (AC) and direct current (DC). The DC output helps us monitor the optical power and ensures the balance of the two photodiodes, which is crucial for balanced homodyne detection in quantum optical experiments. Our circuit board design involves placing two photodiodes on opposite sides of the PCB. This makes it easier to ensure the circuit lengths of the two photodiodes are exactly the same and reduce the distributed capacitance of the circuit board. This is important for enhancing the detector bandwidth and improving the common-mode rejection ratio. Additionally, this design is more convenient for quantum optical experiment operations.

Results and Discussions We used two photodiodes with 95% quantum efficiency, low capacitance and dark current for our balanced homodyne detector. The DC gain of the balanced homodyne detector is 1003.6 V/W, which is at a reasonable level for optical power monitor. We also took the noise power spectra of the balanced homodyne detector at different optical powers. We demonstrate the detector response is linear at five different frequencies. An effective bandwidth of 1 GHz and a maximum signal-to-noise ratio of 12 dB were realized at 1550 nm. The common-mode rejection ratio of the homodyne detector was tested by modulating the input beam with an electro-optical modulator. By placing two photodiodes symmetrically on the front and back sides of the double-sided PCB board, a common-mode rejection ratio of 60.65 dB at 20 MHz was achieved. Subsequently, the balanced homodyne detector was used to measure 1550 nm quadrature amplitude squeezed light. Up to −2.5 dB squeezing was observed over a bandwidth range from 3.5 MHz to 71.5 MHz.

Conclusions In this paper, we designed and developed a balanced homodyne detector with GHz bandwidth, high quantum efficiency, reasonable gain, and high common-mode rejection ratio.The results show that the balanced homodyne detector with high bandwidth and high common-mode rejection ratio are useful in broadband squeezed state measurement.

Keywords: balanced homodyne detector; high bandwidth; common mode rejection ratio; signal-to-noise ratio; squeezed light

1 引言

高带宽、高共模抑制比的平衡零拍探测器在高速量子通信[1–4]，尤其在连续变量量子密钥分发[5–7]中发挥着重要的作用。目前，已经有课题组实验证明利用时分复用、偏振复用以及波分复用等技术可以提高连续变量量子密钥分发的速率[8–10]。高带宽平衡零拍探测器是实现高速率连续变量量子密钥分发的关键器件[11–14]。同时，在连续变量时分复用的大尺度量子信息处理中，由于量子处理器的最大时钟速率受限于量子资源的带宽，宽带压缩态和纠缠态的产生对于量子处理器的实用化至关重要[15–16]。作为宽带压缩态和纠缠态的重要探测工具，高性能的高带宽平衡零拍探测器是实现高带宽连续变量量子计算的核心器件[17–23]。在宽带量子精密测量中，如目标检测、相位估计、天文学观测等，基于纠缠增强的光学传感大多是在射频和微波光谱范围内实现的[24–26]，因此，应用于宽带射频信号测量的宽带探测器变得越来越重要。

高带宽压缩态探测、连续变量量子密钥分发等实验对平衡零拍探测器的需求一般包括：信噪比要高于10 dB，共模抑制比要高于30 dB，带宽满足被测信号的实际需求[27]。自1983年H. P. Yuen和V. W. S. Chan首次提出平衡零拍探测技术以来[28]，高带宽、高共模抑制比的平衡零拍探测器的设计和优化一直是研究的热点。2012年加拿大A. Lvovsky教授课题组利用OPA847跨阻运算放大模块实现了带宽为100 MHz、共模抑制比为52.4 dB、增益大于13 dB的适用于时域量子测量的宽带平衡零拍探测器[29]。2013年上海交通大学曾贵华教授课题组研制了一款300 MHz带宽的平衡零拍探测器，在1550 nm波长下测量到14 dB的信噪比[11]。2018年日本A. Furusawa教授课题组通过选用低噪声、高增益带宽积的一级运算放大器，研制了一款在500 MHz处共振、增益大于12 dB的高量子效率、低噪声的共振型平衡零拍探测器[30]。同年，北京邮电大学喻松教授课题组利用两级射频运算放大器报道了一款带宽1.2 GHz、共模抑制比为57.9 dB的平衡零拍探测器[31]。2023年，中国科学院国家授时中心董瑞芳研究员课题组基于R-C耦合跨阻设计了1 kHz～200 MHz带宽范围的平衡零拍探测器，其共模抑制比为70 dB，信噪比可达

20 dB[32]。同年，太原理工大学郭晓敏教授课题组研制了一款应用于连续变量量子随机数产生的带宽1.65 GHz、信噪比13 dB、共模抑制比15 dB的平衡零拍探测器[33]。

本文设计了一款GHz带宽、高共模抑制比、交直流分开的平衡零拍探测器。通过选用一对参数（包括量子效率、暗电流、等效电容和等效电阻等）高度一致的光电二极管，并将其对称放置在PCB的正反面，以减小两个光电二极管输出信号的幅值差和相位差[34]，实验最终获得了60.65 dB的共模抑制比。两个光电二极管相减的光电流采用L-C耦合结构分为直流信号和交流信号。直流信号用于压缩态光场实验中信号光和Local光的相对位相监视和锁定，交流信号用于探测压缩光场的噪声特性。此外，我们将此高带宽探测器用于探测压缩态光场以检验其实际性能。基于工作于反放大状态的光学参量放大器，实验产生1550 nm正交振幅压缩态光场。使用该款平衡零拍探测器的直流信号锁定Local光与压缩光的相对位相为0，在交流信号端探测到带宽为3.5 MHz～71.5 MHz宽带压缩，并在分析频率21.5 MHz观测到最高−2.5 dB的压缩度。研究结果表明，该高带宽、高共模抑制比的平衡零拍探测器在宽带压缩光探测方面具有潜在应用价值。

2　平衡零拍探测器的设计

图1是我们设计的宽带平衡零拍探测器的基本电路结构。为了获得高带宽、高探测效率和低电子学噪声的探测器，一般需选用结电容小、量子效率高、暗电流小的光电二极管[35]。因此我们实验上选取了Fermionics Opto-Technology公司生产的高速InGaAs PIN光电二极管FD100，其结电容1.1 pF，暗电流0.5 nA，在1550 nm量子效率为95%。

依据基尔霍夫定律，两个反接光电二极管PD1和PD2的光电流进行相减后，交流信号经过隔直电容C1后流入交流放大电路，而直流信号经过电感L3流入直流放大电路。经过低噪声运算放大器OP27（ANALOG公司）构成的同向比例输出的放大电路后，直流信号由电阻R8输出。OP27输出电压值可以用方程（1）推算：

$$U_{\mathrm{OP,Out}} = \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right) U_{\mathrm{OP,In+}}。\tag{1}$$

电阻R4用于抑制运算放大器OP27对交流信号的噪声干扰。直流信号用于监视光束是否完全被光电二极管探测，确保平衡零拍探测器两臂的光功率相等，并用来调节优化平衡零拍探测中信号光和本振光之间的干涉效率。进一步，在测量压缩态光场的正交振幅分量或正交位相分量噪声时，直流信号可以用于监视信号光和本振光之间相对位相的锁定情况。

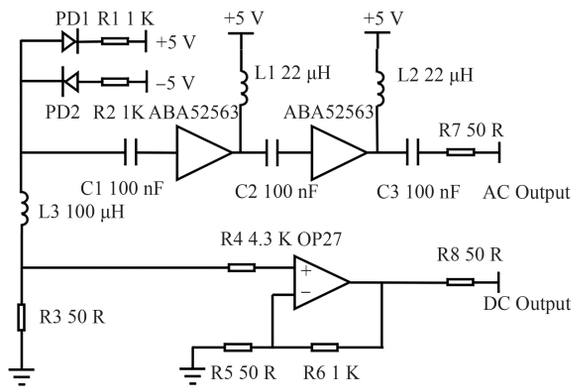

图1. 宽带平衡零拍探测器电路图。

Fig. 1. Circuit schematic of broadband balanced homodyne detector.

平衡零拍探测器第一级运算放大器之前光电流相减信号的3 dB带宽满足如下关系[36]：

$$f_{-3\,\mathrm{dB}} = \frac{1}{2\pi RC},\tag{2}$$

其中C为光电二极管结电容、分布电容（由电感、电阻、导线产生）等电容值之和，R为平衡零拍探测器的终端电阻R3。若只考虑两个FD100光电二极管的结电容之和2.2 pF，计算出的探测器光电流相减后信号带宽最大约为1.45 GHz。在实际制作平衡零拍探测器时要尽量减小分布电容，以获得高带宽。交流信号通过两级级联的高带宽、低噪声射频运算放大器完成信号放大，并经过电容C2、C3进一步抑制并过滤直流信号，最后经过电阻R7输出。射频运算放大器选用AVAGO公司生产的ABA52563，该芯片噪声系数仅有3.3 dB，最大工作带宽至3.5 GHz，可以提供较高的增益和平坦的宽带响应。电感L1与L2可以防止交流信号流入电源支路影响电源性能。

在PCB布局时，为了做好磁屏蔽，我们对PCB背面和信号线周围作覆铜处理，且将信号线彼此之间以及与电源线之间保持一定距离。为了减小寄生电容，电路板上元器件均沿信号方向布置，电容、电阻等选用较小封装贴片元器件。制作时，光电二极管放置在PCB正反面对称位置，探测器两臂的元器件参数尽可能一致，从而减小两个光电二极管输出信号的幅值差和相位差，提高共模抑制比。最后将焊接好的PCB电路板放置在封闭的金属盒中，以屏蔽其他外界信号带来的噪声干扰。探测器其中一端挡住、另一端照射测得的噪声功率与两端同时照射测得的噪声功率的比值即为共模抑制比，可以表示为[34]：

$$CMRR=\left|\frac{P_{\text{Unbalanced}}}{P_{\text{Balanced}}}\right|。\tag{3}$$

3 实验方案和结果

图2为平衡零拍探测器性能测试的实验装置图，用于测试探测器的信噪比、交流线性度、直流线性度和共模抑制比。1550 nm的激光首先经过半波片（HWP1）与偏振分束棱镜（PBS1）调节光束功率，然后经过半波片（HWP2）和偏振分束棱镜（PBS2），满足电光振幅调制器（EOAM）的输入偏振需求并实现振幅调制，信号源（SG）用于产生调制信号。被调制的光束经过50∶50分束器分为功率相等的两束光，并分别注入平衡零拍探测器的两个光电二极管。两个$f=30$ mm的透镜L1和L2用于确保激光被两个光电二极管完全探测。探测器的交流输出连接到频谱仪（SA），直流输出连接到示波器（OSC）。

（1）平衡零拍探测器的直流线性度

实验中，将相等功率的两束光分别注入到探测器的PD1和PD2，放大后的直流输出信号输入示波器测量其电压值。随着单端入射光功率增加，探测器单端（PD1或PD2）输出直流信号的电压值如图3所示[31]。其中黑色方块为探测器单端PD1的直流响应，红色圆点为探测器单端PD2的直流响应，蓝色直线是两组数据的线性拟合线。当探测器单端输入光功率为4 mW（对应本振光功率8 mW）时，探测器直流输出饱和，最高输出电压为4020 mV。采用拟合标准差与平均值相比，得到拟合曲线的偏离度为0.7%，表明探测器两端的直流输出高度对称且线性度良好。拟合曲线斜率为1003.6 V/W，即直流增益为1003.6 V/W。

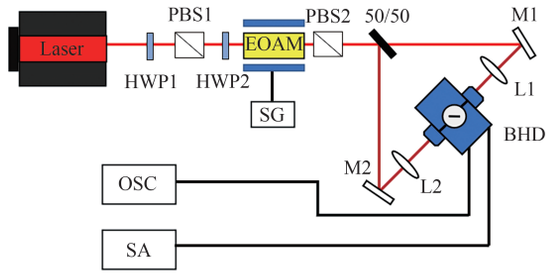

图2. 宽带平衡零拍探测器性能测试装置图。Laser：激光器；HWP：半波片；PBS：偏振分光棱镜；EOAM：电光振幅调制器；SG：信号发生器；L：透镜；BHD：平衡零拍探测器；SA：频谱分析仪；OSC：示波器。

Fig. 2. Schematic for performance test of the broadband balanced homodyne detector. HWP: half wavelength plate; PBS: polarization beam splitter; EOAM: electro-optic amplitude modulator; SG: signal generator; L: lens; BHD: balanced homodyne detector; SA: spectrum analyzer; OSC: oscilloscope.

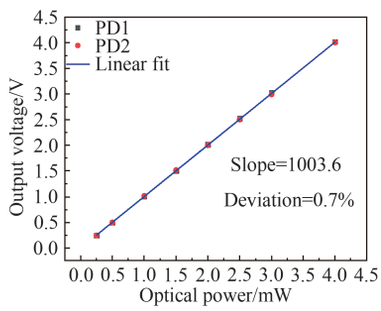

图3. 宽带平衡零拍探测器直流线性度。

Fig. 3. The DC linearity of the broadband balanced homodyne detector.

（2）平衡零拍探测器的信噪比和交流线性度

信噪比是衡量平衡零拍探测器的一项重要指标，一般定义为平衡零拍探测器输入光后的散粒噪声和遮挡光后的电子学噪声之比。在实验中，我们测试了平衡零拍探测器在光功率分别为0.6 mW、1.2 mW、2.4 mW、4.8 mW、9.6 mW下的散粒噪声谱线。频谱分析仪的分辨率带宽（RBW）和视频带宽（VBW）分别为100 kHz和300 Hz。

测试结果如图4（a）所示，黑色曲线SA noise为频谱分析仪背景噪声，红色曲线Electronic noise为探测器的电子学噪声，其余曲线为不同光功率的散粒噪声。从图中看出，当注入光功率达到9.6 mW

时，平衡零拍探测器在15 MHz～1 GHz带宽范围内散粒噪声均超过电子学噪声10 dB以上，在1 GHz处最高信噪比为10.73 dB，而在550 MHz处最高信噪比为12 dB。据图4（a）中的散粒噪声功率谱，新研制的平衡零拍探测器带宽约为1 GHz。图4（b）分别展示了200 MHz、400 MHz、600 MHz、800 MHz和900 MHz处的量子噪声功率随着光功率的线性关系，整体上随着光功率增加散粒噪声线性增大，表明了该探测器有良好的交流响应特性，满足量子光学实验需求。

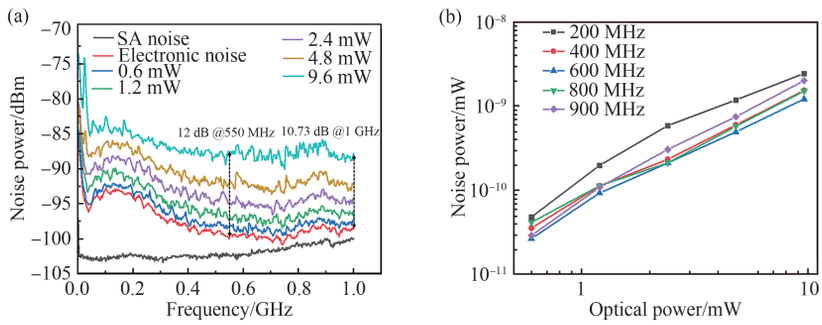

图4. 宽带平衡零拍探测器交流性能测试结果。（a）不同光功率注入噪声功率谱；（b）不同分析频率下噪声功率随注入光功率变化曲线。

Fig. 4. The AC performance test results of broadband balanced homodyne detector. (a) The quantum noise spectrum at different optical power. (b) The curves ofquantum noise power with optical power at different analysis frequencies.

（3）平衡零拍探测器的共模抑制比

共模抑制比是衡量平衡零拍探测器性能的另一项重要指标。信号源输出一个峰峰值为10 V_{pp}、频率为20 MHz的正弦信号，并加载到EOAM对功率为8 mW的光束进行振幅调制。当探测器的单端有激光注入时，其交流输出在20 MHz分析频率处获得一个强度为68.92 dB的调制，如图5黑色曲线所示。当探测器的双端同时有激光注入时，20 MHz分析频率处的振幅调制被抑制，最终获得了60.65 dB的共模抑制比。相比于传统的单面放置两个光电二极管的探测器，该探测器将两光电二极管对称放置在PCB的正反面，减小了两臂的不平衡，获得了较高的共模抑制比。高共模抑制比可以抑制共模噪声，降低噪声干扰，确保平衡零拍探测器实现对压缩态的精确探测。

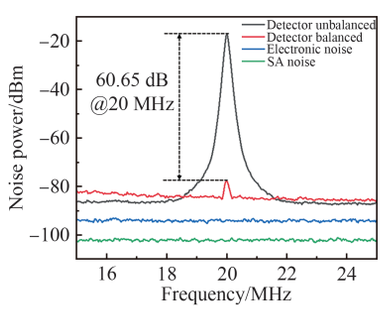

图5. 宽带平衡零拍探测器共模抑制比测试结果。

Fig. 5. The CMRR results of the broadband balanced homodyne detector.

（4）宽带压缩态探测

图6为制备和探测宽带压缩态光场的实验装置，光纤激光器输出的1550 nm激光经模式清洁器过滤后，小部分激光作为平衡零拍探测器的本阵光。大部分激光经过PBS2后分成两路，一路激光进入倍频腔SHG中制备775 nm倍频光，作为注入OPA腔的泵浦光；另一路光作为OPA腔的注入光。OPA腔的工作温度设定为35 ℃，阈值功率为73 mW。实验中先使用PID锁定OPA的腔长，然后调节泵浦光功率为50 mW，并将OPA的注入光和泵浦光的相对相位锁定为π以获得正交振幅压缩态光场。

使用我们研制的宽带平衡零拍探测器，将功率为8 mW的Local光和OPA产生的压缩光的相对位相锁定为0，探测到压缩态光场的正交振幅分量的噪声功率谱如图7的红色曲线所示，绿色曲线为频谱分析仪背景噪声，蓝色曲线为探测器的电子学噪声，黑色曲线为散粒噪声基准，红色曲线为压缩态光场的噪声。其中红色和黑色曲线上56.35 MHz的尖峰为实验所用的光学腔锁定频率。从图中可以看出，在3.5 MHz～71.5 MHz范围内正交振幅分量噪声均低于散粒噪声基准，表明我们探测到了3.5 MHz～71.5 MHz带宽的正交振幅压

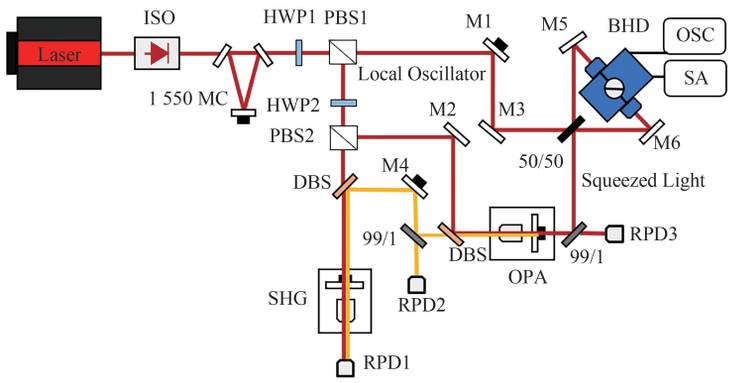

图 6. 宽带压缩态制备和测量光路。Laser：激光器；ISO：光隔离器；1550 MC：1550 nm 波段模清洁器；HWP：半波片；PBS：偏振分光棱镜；DBS：双色镜；M：高反镜；SHG：倍频腔；RPD：共振型探测器；OPA：光参量放大器；BHD：平衡零拍探测器；SA：频谱仪；OSC：示波器；Local Oscillator：本振光。

Fig. 6. The schematic of broadband squeezed state setup and measurement. ISO: isolator; 1550 MC: 1550 nm mode cleaner; HWP: half wavelength plate; PBS: polarization beam splitter; DBS: dichroic beam splitter; M: mirror; SHG: second harmonic generator; RPD: resonant photodetector; OPA: optical parametric amplifier; BHD: balanced homodyne detector; SA: spectrum analyzer; OSC: oscilloscope.

缩，在 21.5 MHz 分析频率处测得了最高−2.5 dB 的压缩度。

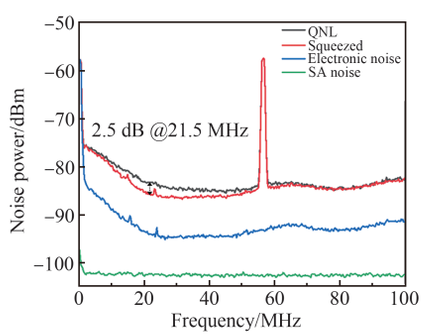

图 7. 宽带压缩的实验测量结果。

Fig. 7. The results of broadband squeezed state test.

4 结论

本文研制了一款高带宽、高共模抑制比、交直流分开的平衡零拍探测器。首先，交流放大部分采用了低噪声、高带宽的两级射频放大器，注入光功率达到 9.6 mW 时，在 15 MHz～1 GHz 的带宽范围内信噪比均在 10 dB 以上。其次，通过布局 PCB，将两光电二极管对称放置在电路板正反面，并精选探测器两臂的元器件，尽量减小两臂光电流的幅值差和相位差，在 20 MHz 处测到 60.65 dB 的共模抑制比。最后，为了用于宽带压缩态光场的探测，探测器采用交直流分开输出。直流输出监视并锁定压缩光和本阵光的相对相位，交流输出实现正交振幅压缩光场的压缩度的测量。使用该平衡零拍探测器最终观测到了带宽范围 3.5 MHz～71.5 MHz、最高压缩度为−2.5 dB 的正交振幅压缩态光场。我们研制的宽带平衡零拍探测器可以用于量子光学实验中宽带压缩和纠缠的探测，为宽带非经典光场的应用提供了关键测量技术。

参考文献

[1] FERCHER A F, DREXLER W, HITZENBERGER C K, *et al*. Optical coherence tomography-principles and applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2003, **66**(2):239–303. DOI: 10.1088/0034-4885/66/2/204.

[2] KUMAR R, BARRIOS E, MACRAE A, *et al*. Versatile wideband balanced detector for quantum optical homodyne tomography[J]. *Optics Communications*, 2012, **285**(24):5259–5267. DOI: 10.1016/j.optcom.2012.07.103.

[3] COOPER M, SLLER C, SMITH B J. High-stability time-domain balanced homodyne detector for ultrafast optical pulse applications[J]. *Journal of Modern Optics*, 2013, **60**(8):611–616. DOI: 10.1364/QELS.2012.QTu3E.5.

[4] LVOVSKY A I, RAYMER M G. Continuous-variable optical quantum-state tomography[J]. *Rev Mod Phys*, 2009, **81**(1):299–

332. DOI: 10.1103/RevModPhys.81.299.

[5] CHI Y M, QI B, ZHU W, *et al*. A balanced homodyne detector for high-rate Gaussian-modulated co-herent-state quantum key distribution[J]. *New Journal of Physics*, 2011, **13**(1):013003. DOI: 10.1088/1367-2630/13/1/013003.

[6] MA X C, SUN S H, JIANG M S, *et al*. Enhancement of the security of a practical continuous variable quantum-key-distribution system by manipulating the intensity of the local oscillator[J]. *Physical Review A*, 2014, **89**(3):032310. DOI: 10.1103/PhysRevA.89.032310.

[7] GROSSHANS F, ASSCHE G V, WENGER J, *et al*. Quantum key distribution using gaussian-modulated coherent states[J]. *Nature*, 2003, **421**(6920):238–241. DOI: 10.1038/nature01289.

[8] 钟海, 叶炜, 吴晓东, 等. 基于光前置放大器的量子密钥分发融合经典通信方案[J]. 物理学报, 2021, **70**(2):020301. DOI: 10.7498/aps.70.20200855.

[ZHONG H, YE W, WU X D, *et al*. Optical preamplifier based simultaneous quantum key distribution and classical communication scheme[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, **70**(2):020301. (in Chinese). DOI: 10.7498/aps.70.20200855.]

[9] HUANG D, LIN D K, WANG C, *et al*. Continuous-variable quantum key distribution with 1 Mbps secure key rate[J]. *Opt Express*, 2015, **23**(13):17511. DOI: 10.1364/OE.23.017511.

[10] ERIKSSON T A, HIRANO T, PUTTNAM B J, *et al*. Wavelength division multiplexing of continuous variable quantum key distribution and 18.3 Tbit/s data channels[J]. *Communications Physics*, 2019, **2**(1):9. DOI: 10.1038/ s42005-018-0105-5.

[11] HUANG D, FANG J, WANG C, *et al*. A 300-MHz bandwidth balanced homodyne detector for continuous variable quantum key distribution[J]. *Chin Phys Lett*, 2013, **30**(11):114209. DOI: 110.1088/0256-307X/30/11/114209.

[12] TANG X, KUMAR R, REN S, *et al*. Performance of continuous variable quantum key distribution system at different detector bandwidth[J]. *Optics Communications*, 2020, **471**:126034. DOI: 10.1016/j.optcom.2020.126034.

[13] CHI Y M, QI B, ZHU W, *et al*. A balanced homodyne detector for high-rate Gaussian-modulated coherent-state quantum key distribution[J]. *New Journal of Physics*, 2011, **13**(1):013003. DOI: 10.1088/1367-2630/13/1/013003.

[14] DU S N, LI Z Y, LIU W Y, *et al*. High-speed time-domain balanced homodyne detector for nanosecond optical field applications[J]. *J Opt Soc Amer*, 2018, **35**(2):481–486. DOI: 10.1364/JOSAB.35.000481.

[15] YOKOYAMAl S, UKAI R, ARMSTRONG S C. Ultra-large-scale continuous-variable cluster states multiplexed in the time domain[J]. *Nat Photonics*, 2013, **7**(12):982–986. DOI: 10.1038/nphoton.2013.287.

[16] KASHIWAZAKI T, TAKANASHI N, YAMASHIMA T, *et al*. Continuous-wave 6-dB-squeezed light with 2.5-THz-bandwidth from single-mode PPLN waveguide[J]. *APL Photonics*, 2020, **5**(3):036104. DOI: 10.1063/1.5142437.

[17] TAKANASHI N, INOKUCHI W, SERIKAWA T, *et al*. Generation and measurement of a squeezed vacuum up to 100 MHz at 1550 nm with a semimonolithic optical parametric oscillator designed towards direct coupling with waveguide modules[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(13):18900. DOI: 10.1364/OE.27.018900.

[18] YOSHINO K, AOKI T, FURUSAWA A. Generation of continuous-wave broadband entangled beams using periodically poled lithium niobate waveguides[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, **90**(4):041111. DOI: 10.1063/1.2437057.

[19] YOSHIKAWA J, YOKOYAMA S, KAJI T, *et al*. Invited article: Generation of one-million-mode continuous-variable cluster state by unlimited time-domain multiplexing[J]. *APL Photonics*, 2016, **1**(6):060801. DOI: 10.1063/1.4962732.

[20] ASAVANANT W, SHIOZAWA Y, YOKOYAMA S, *et al*. Generation of time-domain-multiplexed two-dimensional cluster state[J]. *Science*, 2019, **366**(6463):373–376. DOI: 10.1364/OL.37.002367.

[21] ZAVATTA A, VICIANI S, BELLINI M. Tomographic reconstruction of the single-photon fock state by high-frequency homodyne detection[J]. *Phys Rev A*, 2004, **70**(5):053821. DOI: 10.1103/PhysRevA.70.053821.

[22] SENIOR R J, MILFORD G N, JANOUSEK J, *et al*. Observation of a comb of optical squeezing over many gigahertz of bandwidth[J]. *Opt Express*, 2007, **15**(9):5310–5317. DOI: 10.1364/OE.15.005310.

[23] AST S, SAMBLOWSKI A, MEHMET M, *et al*. Continuous-wave nonclassical light with gigahertz squeezing bandwidth[J]. *Opt Lett*, 2012, **37**(12):2367–2369. DOI: 10.1364/OL.37.002367.

[24] ZHANG Z S, MOURADIAN S, WONG F N C, *et al*. Entanglement-enhanced sensing in a lossy and noisy environment[J].

Phys Rev Lett, 2015, **114**(11):110506. DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.110506.

[25] COLANGELO G, CIURANA F M, PUENTES G, *et al*. Entanglement-enhanced phase estimation without prior phase information[J]. *Phys Rev Lett*, 2017, **118**(23):233603. DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.233603.

[26] XIA Y, LI W, CLARK W, *et al*. Demonstration of a reconfigurable entangled radio-frequency photonic sensor network[J]. *Phys Rev Lett*, 2020, **124**(15):150502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.150502.

[27] LI Z H, LIU J GUO F, *et al*. 20 MHz resonant photodetector for the homodyne measurement of picosecond pulsed squeezed light[J]. *Optics Continuum*, 2023, **2**(2):490–497. DOI: 10.1364/OPTCON.481271.

[28] YUEN H P, CHAN V W S. Noise in homodyne and heterodyne detection[J]. *Opt Lett*, 1983, **8**(3):177–179. DOI:10.1364/ol.8.000177.

[29] KUMAR R, BARRIOS E, MACRAE A, *et al*. Versatile wideband balanced detector for quantum optical homodyne tomography[J]. *Opt Commun*, 2012, **285**(24):5259–526. DOI: 10.1016/j.optcom.2012.07.103.

[30] SERIKAWA T, FURUSAWA A. 500 MHz resonant photodetector for high-quantum-efficiency, low-noise homodyne measurement[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, **89**(6):063120. DOI: 10.1063/1.5029859.

[31] ZHANG X X, ZHANG Y C, LI Z Y, *et al*. 1.2-GHz balanced homodyne detector for continuous-variable quantum information technology[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, **10**(5):1–10. DOI: 10.1109/JPHOT.2018.2866514.

[32] 王少锋, 刘宣泽, 李汉卿, 等. 基于R-C耦合跨阻设计的1 kHz～200 MHz宽带平衡零拍探测器[J]. 光学学报, 2023, **43**(09):0923001. DOI: 10.3788/AOS221746.
[WANG S F, LIU X Z, LI H Q, *et al*. Design of 1 kHz-200 MHz Broadband Balanced Homodyne Detector Based on R-C Combination Circuit[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, **43**(09):0923001. (in Chinese). DOI: 10.3788/AOS221746.]

[33] 邓娟, 郭龑强, 林鸿, 等. 面向连续变量量子随机数产生的宽带高平坦度平衡零拍探测器[J]. 激光与电子学进展, 2024, **61**(11):1104001. DOI: 10.3788/LOP231233.
[DENG J, GUO Y Q, LIN H, *et al*. Wideband and high-flatness homodyne detector for continuous-variable quantum random number generation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, **61**(11):1104001. (in Chinese). DOI: 10.3788/LOP231233.]

[34] JIN X L, SU J, ZHENG Y Y, *et al*. Balanced homodyne detection with high common mode rejection ratio based on parameter compensation of two arbitrary photodiodes[J]. *Opt. Express*, 2015, **23**(18):23859–23866. DOI: 10.1364/OE.23.023859.

[35] LANG S B, ZHANG S C, LI X L, *et al*. Low noise balanced homodyne detector for quantum noise measurement[J]. *IEEE Access*, 2022, **10**:27912–27916. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3156094.

[36] 王金晶, 贾晓军, 彭堃墀. 平衡零拍探测器的改进[J]. 光学学报, 2012, **32**(1):0127001. DOI: 10.3788/AOS201232.0127001.
[WANG J J, JIA X J, PENG K C. Improvement of balanced homodyne detector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1):0127001. (in Chinese). DOI: 10.3788/AOS201232.0127001.]