

# 具有两级放大的平衡零拍光电探测器

郑公爵 戴大鹏 方银飞 李兴佳 尹燕宁 杜向丽 夏勇 印建平

华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062

**摘要** 平衡零拍探测技术具有低噪声和高灵敏度的特性,是量子噪声谱测量的主要方法之一。采用基尔霍夫定律,设计并研究了一种具有两级放大的平衡零拍光电探测器。由两个性能匹配的光电管相减产生的光电流经过一级跨阻放大后差分输出,再经过二级差分放大电路进行放大输出。结果表明,探测器饱和功率为 5 mW,信号响应带宽约 140 MHz。当入射光功率为 2 mW、分析频率小于 30 MHz 时,探测的光学噪声功率高于探测器电子噪声 10 dB 以上。在 20 MHz 附近,该探测器的共模抑制比达 55 dB。

**关键词** 探测器;平衡零拍探测器;跨阻与差分放大;量子噪声;共模抑制比

**中图分类号** O431.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP51.040401

## Balanced Homodyne Detector Based on Two-Stage Amplification

Zheng Gongjue Dai Dapeng Fang Yinfei Li Xingjia Yin Yanning

Du Xiangli Xia Yong Yin Jianping

State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China

**Abstract** With the characteristics of high sensitivity and low noise, balanced homodyne detection technique has been one of the main methods in quantum noise measurement. Based on the Kirchhoff's law, a balanced homodyne photoelectric detector with two-stage amplification is designed and studied. The differential photocurrent of two similar photodiodes is primarily amplified by a trans-impedance amplifier, and then sent into the secondary differential amplifier. Experimental results show that the saturation power of this detector is 5 mW, and the signal response bandwidth is about 140 MHz. When the input laser power is equal to 2 mW and the frequency is lower than 30 MHz, the optical shot noise is 10 dB larger than the electronic noise. Near 20 MHz, the common mode rejection ratio of the detector could reach 55 dB.

**Key words** detectors; balanced homodyne detector; trans-impedance and differential amplification; quantum noise; common mode rejection ratio

**OCIS codes** 040.5570; 040.5160; 040.6040; 270.5570

## 1 引言

平衡零拍探测技术在量子噪声测量、光谱测量、外差探测、太赫兹探测等领域有着重要的应用<sup>[1-14]</sup>。在量子光学实验中,由于压缩态等非经典态均为弱光,且其正交振幅或相位分量已经低于真空涨落,因此要对压缩态进行测量,必须使用对相位敏感的探测技术并突破量子噪声极限<sup>[1]</sup>。平衡零拍探测技术即是一种具有高敏感度、且对入射光振幅、相位均敏感的探测技术<sup>[2-3]</sup>。自 1985 年 Slusher 等<sup>[4]</sup>首次将平衡零拍探测技术应用到光学压缩态的测量以来,平衡零拍探测技术已经被广泛用于各类光学实验中<sup>[5-10]</sup>,并成为测量量子噪声与突破量子噪声极限的标准方法<sup>[11]</sup>。2010 年周倩倩等<sup>[12]</sup>研制了一种宽带低噪声探测器,交流信号经过一级跨阻运算放大器 LMH6624 放大输出,在带宽 2~31 MHz 范围内,其共模抑制比大于 30 dB。之后王金晶等<sup>[13]</sup>对平衡零拍探测器进行了改进,交流信号经过一级运算放大器 AD829 放大输出,这种方案提高了入射光饱

收稿日期: 2013-11-05; 收到修改稿日期: 2013-12-09; 网络出版日期: 2014-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(11374100)、上海市自然科学基金(13ZR1412800)、国家 973 计划(2011CB921602)

作者简介: 郑公爵(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光稳频方面的研究。E-mail: gongjue.zheng@gmail.com

导师简介: 夏勇(1977—),男,博士,副教授,主要从事分子激光冷却方面的研究。

E-mail: yxia@phy.ecnu.edu.cn(通信联系人)

和光强和在 2 MHz 处的共模抑制比。本文根据基尔霍夫定律,设计并研究了一种交流信号经过两级放大的平衡零拍探测器,测量了探测器的主要性能,并验证了其在量子光学实验中的应用。相较于仅有一级跨阻放大电路的平衡零拍探测器而言,这种设计在增大探测器的放大倍数的同时也拓宽了探测器的带宽。

## 2 平衡零拍光电探测器的原理

平衡零拍探测技术的基本原理如图 1(a)所示<sup>[3-4]</sup>。弱信号光与一束强本振光在低损耗的分束器上相干结合后分别入射到两个相似的探测器上,探测到的电信号再经减法器相减,所得的差值信号即可反映出信号光的相关信息。根据基尔霍夫定律设计的平衡零拍探测器则使用两个性能相似的光电管对两束入射光进行探测,实际输出的电流信号为两个光电管输出电流信号的差值<sup>[13-15]</sup>。这种设计的优点是免去了减法器,同时可以抑制两束光的共模噪声。

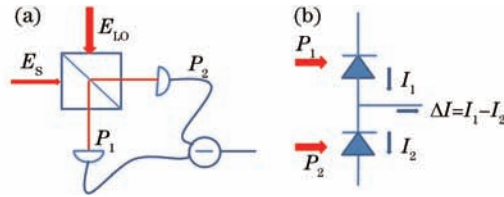


图1 平衡零拍探测器示意图。(a) 采用两个探测器的平衡零拍探测系统;(b) 基于基尔霍夫定律的平衡零拍探测器

Fig.1 Diagram of balanced homodyne detectors. (a) Balanced detection system consisting of two detectors;

(b) balanced homodyne detector based on the kirchhoff's law

## 3 探测器的设计

### 3.1 光电管的选择

光电管的选择在很大程度上决定了探测器的灵敏度与响应速率。常用的具有高灵敏度、高速响应特性的光伏探测器主要有 PIN 光电二极管以及雪崩光电二极管(APD)。由于 APD 具有雪崩倍增效应,因此在倍增过程中会引入附加噪声。同时,APD 的性能还与入射光功率有关,通常入射光功率在 1 nW 至几微瓦之间时,倍增电流与入射光具有较好的线性关系,但入射光功率过大时,倍增系数反而会下降,从而引起光电流的畸变。这对于要求高饱和功率且希望噪声光电流与入射光功率成线性关系的量子光学实验来说,显然并不适宜。相较而言,PIN 管具有结构简单、暗电流和结电容小、线性范围宽等优点,更适合要求低噪声的应用。设计中选择 S5973 (Hamamatsu) 作为光电探测器件。S5973 的截止频率高达 1 GHz,结电容约为 1.6 pF,暗电流为 1 pA,在 760 nm 处的量子效率为 85%,在 577 nm 处的量子效率约为 75%。此外,其耗散功率为 50 mW,在反向偏压为 10 V 时,其能承受的最大电流为 5 mA,相对于 0.5 A/W 的电流响应率来说,能够承受的最大光强为 10 mW。由于 S5973 的结电容很小,因此实际使用时其频响特性主要由电路的时间常量  $\tau_d = C_d R_L$  决定,其中  $C_d$  为 PIN 管结电容,  $R_L$  为 PIN 管负载电阻。设计时应仔细选择  $R_L$  以获得尽量高的频率性能以及较大的取样电压。

### 3.2 信号放大电路

一般来说,平衡零拍探测器的放大电路分为交流和直流两部分<sup>[13,16]</sup>,其中直流部分用于监视入射光功率并提供参考,交流部分则将所需的待测信号或光学噪声放大并输出。探测器详细的原理图如图 2 所示。其中,光电流被电感 L2 分为交流与直流两部分。L2 的大小决定了直流部分的低频响应特性<sup>[12]</sup>。为了过滤交流信号,采用 C14 与 L2 组成 LC 低通滤波器。此外,R7、C13 也构成一个 RC 低通滤波器进一步过滤信号。根据基尔霍夫定律,相减后的电流方向不定,输入直流放大器的电流可能为正亦可能为负,因此,最好采用双电源供电的放大器。这里采用 OP27 组成比例运算放大电路实现直流功能。

对于交流部分即信号光电流或光学噪声电流,则经耦合电容 C5 后由跨阻放大器 SA5211(180 MHz)实现一级放大并差分输出,其输出为

$$(V_{01+} - V_{01-}) = I_{pd} \times R_T, \quad (1)$$

对于量子光学实验来说,  $I_{pd}$  为光学噪声电流即  $\bar{i}_{Np}$ ,  $R_T = 28.8 \text{ K}$  为 SA5211 的跨阻。之后,差分信号再与

超低失真宽带放大器 LMH6702(1.6 GHz)组成二级差分放大电路并输出:

$$V_o = -\frac{R_2}{R_3}(V_{o1+} - V_{o1-}) = -I_{pd} \cdot R_T \cdot \frac{R_2}{R_3}. \quad (2)$$

关于放大器饱和问题,由于量子光学实验中交流信号主要是光学噪声电流,当一束完全相干光输入到光电二极管后,光学量子噪声转化产生的噪声电流为<sup>[17]</sup>

$$\bar{i}_{Np}^2 = 2 \frac{e^2 \eta}{h\nu} P \Delta f, \quad (3)$$

式中  $e$  为电子电荷,  $P$  为入射光功率,  $\Delta f$  为探测器带宽,  $\eta$  为光电量子效率,  $h$  为普朗克常量,  $\nu$  为入射光频率。若按照  $P=10 \text{ mW}$ ,  $\Delta f=100 \text{ MHz}$ , 入射光波长  $760 \text{ nm}$ (此时 S5973 的电流响应率最大, 为  $0.52 \text{ A/W}$ , 量子效率  $\eta=85\%$ ) 计算, 则  $\bar{i}_{Np}$  最大为  $0.40 \text{ }\mu\text{A}$ 。实验中采用  $577 \text{ nm}$  激光进行测试, 由于  $577 \text{ nm}$  激光波长更短, S5973 在该点的量子效率也比  $760 \text{ nm}$  的低, 相同入射功率情况下光噪声电流比  $760 \text{ nm}$  光入射要小(约为  $0.33 \text{ }\mu\text{A}$ ), 因此通过耦合电容 C5 后流入 SA5211 的电流实际上远小于 SA5211 的饱和电流 ( $60 \text{ }\mu\text{A}$ ), 故 SA5211 并不会产生饱和。

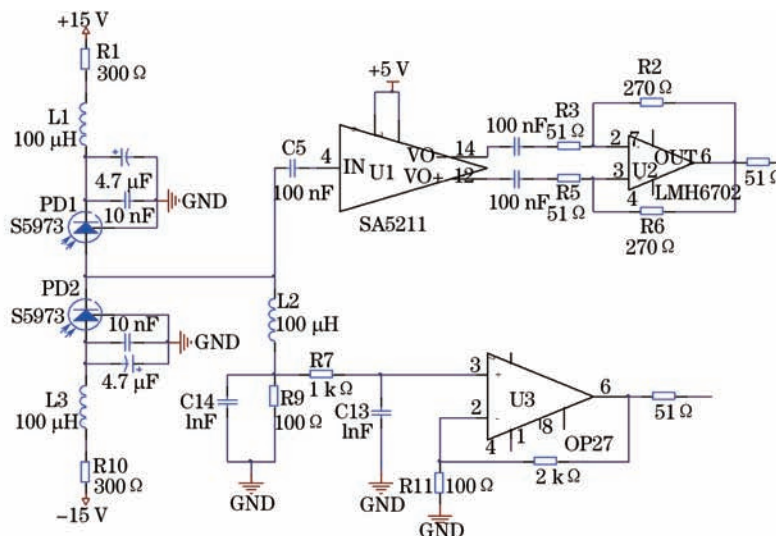


图2 探测器原理图

Fig.2 Schematic of detector

### 3.3 探测器的制作

为了保证探测器能稳定可靠地工作,降低探测器的噪声、提高探测器抗干扰能力,在设计印刷电路板(PCB)时采用了贴片元件,并选用双层板制作,一面作为参考地层敷铜并充分过孔,另一面放置元件布线。在元件布局时,按照信号流程布置元件,使信号保持一致的方向,尽可能缩短元件之间的引线和连线,设法减小它们的分布参数和相互间的电磁干扰。布线时,尽量加粗电源线,以降低环路电阻。交流放大器输入引脚可采用保护环设计,以屏蔽噪声拾取。设计的PCB大小为  $55 \text{ mm} \times 33 \text{ mm}$ , 放置于  $66 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  的铝盒中,并使铝盒与PCB地线相连,以屏蔽外部噪声的干扰。

## 4 探测器的性能测试

为了对探测器性能进行测试,采用  $577 \text{ nm}$  染料稳频激光(Sirah, Matisse DX, MOS-4)作为光源,并搭建了如图3所示的测试光路图,以便对平衡探测器的性能进行测试。其中, M0、M1 为全反镜, M2 为带压电陶瓷(PZT)的全反镜; EOM 为相位谐振电光调制器(型号 EO-PM-R-20-C1), 谐振频率为  $20 \text{ MHz}$ ;  $1/2$  波片 HWP1 与偏振分束器 PBS1 组成功率衰减器, 以实现初始入射光功率的衰减; HWP2 与 PBS2 组成功率分束器, 调节 HWP2 可以调节两路光的功率比。测试时首先调整 HWP2 使两路光分束比为  $50:50$ , 之后如需增加或减小入射光强, 则只需调节 HWP1 即可同步改变两路入射光光强。分束后的光经过反射镜后, 入射到探测器上进行探测。由于光电管的光敏面积只有  $0.12 \text{ mm}^2$ , 因此光路中采用了两个焦距  $50 \text{ mm}$  的平凸透镜,

以实现光束的聚焦。探测器的直流输出信号接到示波器上进行读数,交流输出信号则送入频谱仪以便对光功率噪声谱进行分析。

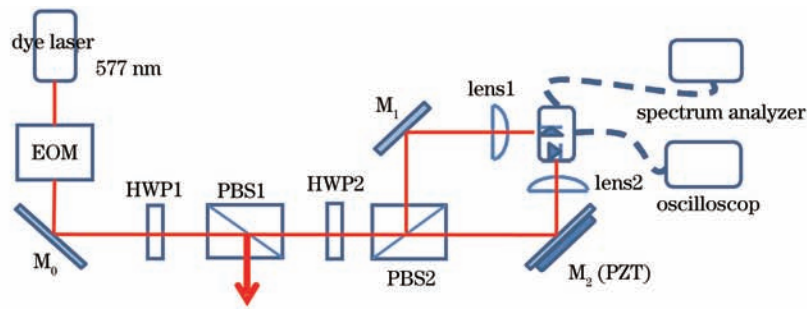


图3 测试光路图

Fig.3 Diagram of the testing optical path

为了测试光电管的平衡性,首先对探测器直流(DC)部分的性能进行了测试。调节HWP1,使入射光功率从 $100 \mu\text{W}$ 逐渐增加至 $5 \text{ mW}$ ,并测量单管的直流输出电压(测量PD1时挡住PD2,测量PD2时反之)。测量结果如图4所示。图4中PD2输出实际为负值,为了便于对比图中取其绝对值。由图可知,在小于 $5 \text{ mW}$ 时,探测器的响应为线性响应。在低入射光功率时,两管具有高的匹配性,随着光功率的增强,两光电管略有失配,但不是很大。

其次测量了探测器频率响应特性。方法是采用 $2 \text{ mW}$ 的光照射PIN管,并用频谱仪[参数为分辨带宽(RBW)300 kHz,视频带宽(VBW)300 kHz,扫描时间(SWT)1.66 s,衰减(ATT)10 dB]采集光学噪声功率谱,图5为测量结果。可以看到,在 $140 \text{ MHz}$ 时光学噪声功率下降了3 dB,故信号带宽约为 $140 \text{ MHz}$ 。但随着分析频率的增加,探测器的本底噪声(电子噪声)也大大增强了。事实上,本设计中,入射噪声以及电子噪声功率与二级放大倍数有关。对二级放大倍数 $A=2, 4, 10$ ( $A=R2/R3=R6/R5$ ,  $R2, R3, R5, R6$ 分别为图2中 $R2, R3, R5, R6$ 的电阻值)时的情况进行测量,结果发现只有在 $A=4$ 时光学噪声功率与电子学噪声功率的差值最大,但此时电子学噪声也最大。因此应用时需综合考虑探测器的应用场所,选择合适的放大倍数。

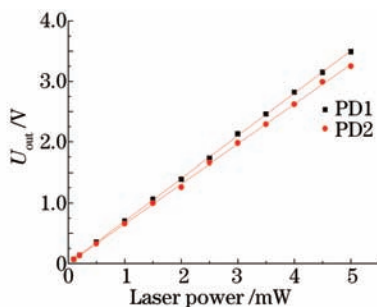


图4 探测器直流输出响应

Fig.4 DC response of detector

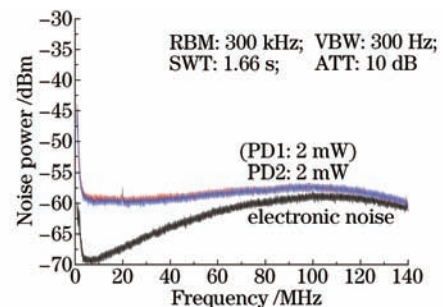


图5 探测器交流响应特性

Fig.5 AC response of detector

在量子光学实验中,比如对光场压缩态的探测,探测器不仅要能够有效探测光学散粒噪声,而且要求探测器本身的电子学噪声远低于散粒噪声,一般希望光学散粒噪声高于电子学噪声 $10 \text{ dB}^{[12-13]}$ 以上,故为了观察该探测器的性能,对 $30 \text{ MHz}$ 以内入射光的量子噪声功率进行了更细致的测量,扫描得出的量子噪声数据经处理后如图6所示。由图6可知,在入射功率高于 $2 \text{ mW}$ ,频率小于 $25 \text{ MHz}$ 时,光学量子噪声极限高于电子学噪声 $10 \text{ dB}$ ,在此范围内,探测器可以实现对压缩态的测量。在分析频率大于 $25 \text{ MHz}$ 之后,由于电子学噪声劣化,光学量子噪声极限与电子学噪声的差值减小。为了得到不同分析频率下入射光功率与光学噪声功率之间关系,对上述数据进行了处理,处理后的结果如图7所示。由图可知,在不同频率下,入射光与噪声功率均成正比且保持良好的线性关系,说明该探测器探测的量子噪声能够反映真实的入射光量子噪声起伏。

再次,测量了双管入射与单管入射的噪声功率。图8为入射功率均为 $2 \text{ mW}$ 时的噪声谱图。由于两PIN管差分输出的噪声光电流是单管时的两倍,因此图中双管入射的噪声功率比单管入射时高出约 $3 \text{ dB}$ 。此外,还注意到单管入射在 $20 \text{ MHz}$ 处有两个小的峰值突起,这是由于染料激光稳频时的剩余调制所引起的,可以

发现该峰值在双管入射时被抑制了。

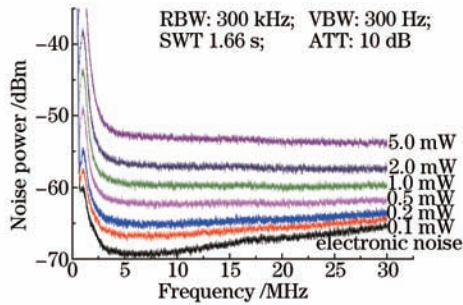


图6 输出噪声功率随入射光功率变化曲线

Fig.6 Curves of quantum noise power of light under different input light powers

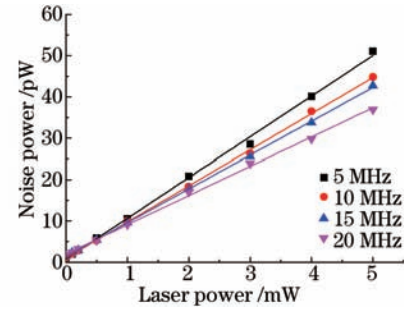


图7 不同分析频率下,光噪声功率的变化曲线

Fig.7 Curves of quantum noise power under different input light frequencies

最后,我们还进一步测量了探测器的共模抑制比<sup>[15]</sup>。采用谐振频率为20 MHz的电光调制器(EOM)对入射光进行了相位调制,并分别记录了单管入射与双管入射的噪声功率。由于采用了相位调制,探测器测量的信号实际是拍频光信号。图9为探测器在入射光功率为70  $\mu$ W,调制频率为20 MHz时的共模抑制比测量结果。可以看到,在单管入射时,光学噪声为-8 dBm。双管入射时从图中插图可知调制信号幅度降到-63 dBm,故其共模抑制比约为55 dB。由于我们的设计中采用了差分放大,引入了共模负反馈,因此具有非常好的共模抑制性能。注意到双管光学噪声比单管入射时增加了约2 dB,说明光学噪声相加而信号相减。

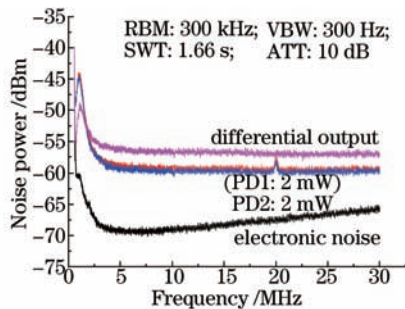


图8 入射功率为2 mW时的功率噪声谱

Fig.8 Noise spectra when the input light power is 2 mW

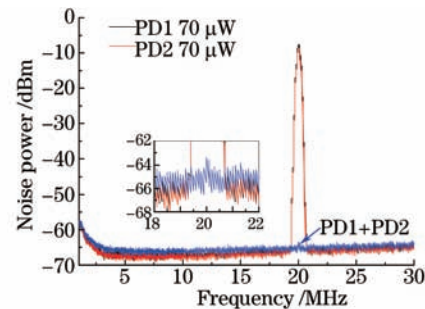


图9 共模抑制比测量结果

Fig.9 Result of common mode rejection ratio at 20 MHz

## 5 结 论

采用两级放大器的设计,对平衡零拍探测器进行了改进。改进后的探测器信号带宽达到140 MHz,可以对经过调制的微瓦级弱光进行探测。对于量子光学实验来说,其可用带宽也达到30 MHz,饱和功率高于5 mW,且在20 MHz处其共模抑制比更高达55 dB,具有非常突出的优点。由于在高频处电子学噪声增大,限制了该探测器应用到更高频段的量子光学实验中,因此下一步的工作是选择合适的二级放大芯片,并对探测器的各项参数进行优化,以减小探测器的电子学噪声,增大探测器的实际可用范围。

## 参 考 文 献

- 1 Li Fuli. Advanced Laser Physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. 373-380.  
李福利. 高等激光物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. 373-380.
- 2 Yuen H P, Chan V W. Noise in homodyne and heterodyne detection[J]. Opt Lett, 1983, 8(6): 177-179.
- 3 Abbas G L, Chan V W, Yee T K. Local-oscillator excess-noise suppression for homodyne and heterodyne detection[J]. Opt Lett, 1983, 8(8): 419-421.
- 4 Slusher R E, Hollberg L W, Yurke B, *et al.*. Observation of squeezed states generated by four-wave mixing in an optical cavity[J]. Phys Rev Lett, 1985, 55(22): 2409-2412.
- 5 Kumar V, Casella M, Molotokaite E, *et al.*. Balanced-detection Raman-induced Kerr-effect spectroscopy[J]. Phys Rev A, 2012, 86(5): 053810.

- 6 Breitenbach G, Schiller S, Mlynek J. Measurement of the quantum states of squeezed light[J]. *Nature*, 1997, 387(6632): 471-475.
- 7 Alexander K, Henning V, Nico L, *et al.*. Long-term stable squeezed vacuum state of light for gravitational wave detectors[J]. *Class Quantum Grav*, 2012, 29(7): 075001.
- 8 Jouguet P, Kunz-Jacques S, Leverrier A, *et al.*. Experimental demonstration of long-distance continuous-variable quantum keydistribution[J]. *Nature Photon*, 2013, 7(5): 378-381.
- 9 Cooper M, Söller C, Smith B J. High-stability time-domain balanced homodyne detector for ultrafast optical pulse applications [J]. *J Mod Opt*, 2013, 60(8): 611-616.
- 10 Kim Jae-Young, Song Ho-Jin, Ajito K, *et al.*. Continuous-wave THz homodyne spectroscopy and imaging system with electro-optical phase modulation for high dynamic range[J]. *Terahertz Science and Technology*, 2013, 3(2): 158-164.
- 11 Kolobov M I, Fabre C. Quantum limits on optical resolution[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 85(18): 3789-3792.
- 12 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.
- 13 Wang Jinjing, Jia Xiaojun, Peng Kunchi. Improvement of balanced homodyne detector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 31(1): 0127001.  
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, 31(1): 0127001.
- 14 Haderka O, Michalek V, Urbasek V. Fast time-domain balanced homodyne detection of light[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(15): 2884-2889.
- 15 Painchaud Y, Poulin M, Morin M. Performance of balanced detection in a coherent receiver[J]. *Opt Express*, 2009, 17(5): 3659-3672.
- 16 Gray M B, Shaddock D A, Harb C C, *et al.*. Photodetector designs for low-noise, broadband, and high-power applications[J]. *Rev Sci Instrum*, 1998, 69(11): 3755-3762.
- 17 Wong N C, Hall J L. Servo control of amplitude modulation in frequency-modulation spectroscopy: demonstration of shot-noise-limited detection[J]. *J Opt Soc Am B*, 1985, 2(9): 1527-1533.