

文章编号 1004-924X(2013)11-2737-07

高增益散粒噪声探测器的性能改进

周海军, 王文哲, 郑耀辉*

(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)

摘要:针对量子光学实验对低噪声探测器的特殊需求,采用交流电流耦合跨阻抗前置放大电路和 ETX500 光电二极管设计了高增益散粒噪声探测器。与现有的探测器相比,该探测器在增益、带宽、交直流饱和特性 3 方面的性能均有明显提升。采用 1 064 nm 的单频激光器作光源,频谱分析仪作噪声测量工具,测量了探测器的输出特性。在分析频率 2 MHz 处,测量得到注入探测器的功率为 850 μ W 时,输出的噪声功率谱较电子学噪声谱高 10 dB;注入探测器的功率大于 1.62 mW 时,探测器的带宽达到 5 MHz。注入的光功率为 0.85~36 mW 时,探测器保持良好的交流与直流线性特性。设计的高增益与较高的交直流饱和特性,为量子光学实验提供了重要的探测工具。

关键词:量子光学;散粒噪声探测器;跨阻抗前置放大电路;增益;饱和特性

中图分类号:TP212.14 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132111.2737

Improvement of high-gain shot-noise detector

ZHOU Hai-jun, WANG Wen-zhe, ZHENG Yao-hui*

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optical Devices,
Institute of Opto-electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

* Corresponding author, E-mail: yhzheng@sxu.edu.cn

Abstract: Based on the special demands of quantum optical experiments for low noise detectors, a high gain and shot noise detector was designed by combing an AC current coupled trans-impedance pre-amplify circuit and an ETX500 photodiode. Compared with existing detectors, the designed detector shows better characteristics in gain, bandwidth and AC & DC saturation. The output characteristics of the detector were measured by using a 1 064 nm single frequency laser as a source and a frequency spectrum analyzer as the measuring instrument. Measuring results show that the power noise spectrum of the detector is 10 dB higher than that of electronic noise spectrum when the injecting power for the detector is more than 850 μ W at 2 MHz. Furthermore, the bandwidth of the shot noise detector reaches 5 MH when the input infrared laser power is above 1.62 mW. The remarkable linearities for the DC and AC currents are available when the input infrared laser power is increased to 36 mW. Considering its higher gain and better DC & AC saturation characteristics, the detector is advantageous to quantum optic experiments.

Key words: quantum optics; shot noise detector; trans-impedance pre-amplify circuit; gain; saturation characteristic

收稿日期:2013-06-07;修订日期:2013-07-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61008001, No. 61227015);山西省自然科学基金资助项目(No. 2011021003-2)

1 引 言

20 世纪 80 年代以来,光场散粒噪声及其压缩特性的探测一直是量子光学实验研究的热点^[1-5]。散粒噪声是叠加在光场直流分量上的微弱交流分量(噪声起伏),它体现了光场的非经典特性。由于无论利用何种光学和电子学的措施来抑制光场和测量过程中的误差与经典噪声,也无法消除散粒噪声^[6],这从根本上限制了光学测量灵敏度和光通信精度的提高^[7-8]。

散粒噪声及其压缩特性不仅是量子光学实验的研究热点,在激光与精密光谱技术^[9-11]、光学遥感^[12]、引力波探测^[13]、相干光学与探测^[14-17]以及医学与生物光学成像^[18]等领域也受到了广泛的关注。目前,商用探测器多用来探测微弱的光强信号或者光场的额外噪声,很少用来探测光场散粒噪声^[21-23]。这是由于散粒噪声谱远低于光场的额外噪声谱,而量子光学实验不仅要求探测器具有较高的灵敏度和低噪声特性,而且所探测的毫瓦(mW)级光场的散粒噪声谱至少要比探测器的电子学噪声谱高 10 dB 以上,才能避免散粒噪声被探测器的电子学噪声淹没,此时探测器达到散粒噪声极限。此外,为使所探测的散粒噪声谱成为主要输出,探测器还应具有交流、直流饱和与增益稳定等特性^[19-20]。

本文根据现有 1 064 nm 光场散粒噪声探测器的性能^[19-20],设计并调试出改进的交流电流耦合跨阻抗前置放大器。与原有的探测方案相比,该方案不仅有效降低了探测器达到散粒噪声极限时的最低探测光功率;而且在相同带宽下,增加了探测器的交流、直流响应动态范围,能够满足量子光学实验对探测器的增益、带宽与交直流饱和特性的特殊要求。

2 探测方案的分析与选取

探测 1 064 nm 光场散粒噪声的探测器主要由光电转换、交流放大与输出、直流放大与输出^[19-20]3 部分构成,如图 1 所示。

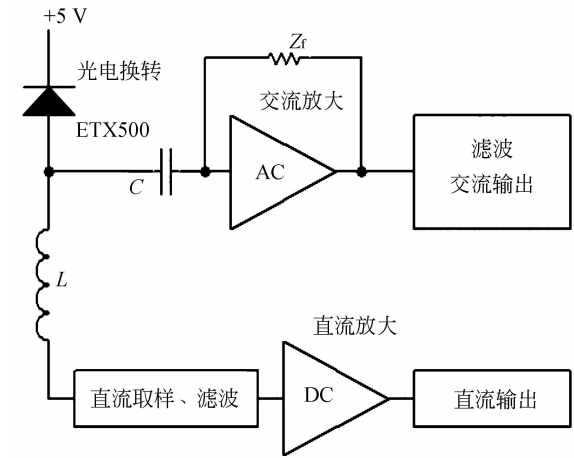


图 1 散粒噪声探测器的结构图
Fig. 1 Structure of shot noise detector

2.1 光电探测器的选择

探测 1 064 nm 光场散粒噪声要求光电二极管的量子效率高,且暗电流极小。ETX500 具有极高的量子效率(800~1 550 nm 波段)和极低的暗电流噪声,非常适合分析频率在 2~20 MHz 内探测到的 1 064 nm 红外光场的散粒噪声^[19],其详细参数为:ETX500 响应红外光场时,量子效率最高可达 95% 左右;工作于 +5 V 反向偏压时,暗电流的典型值为 12 nA,结电容的典型值为 35 pF,内阻的典型值高达 250 MΩ,探测带宽最高可达 140 MHz。

2.2 交流信号放大方案

当入射激光达到散粒噪声极限时,ETX500 探测到的直流电流 I_{dc} 所对应的交流噪声电流分量 $i_{shot} = \sqrt{2e \cdot I_{dc}}$ (e 为电子电荷),这就是光场的散粒噪声^[19-20,26]。若先将噪声电流转换为噪声电压后再放大^[19],散粒噪声电流很容易被负载电阻 R 的热噪声电流 $i_{thermal} = \sqrt{4KT/R}$ (K 为波尔兹曼常数, T 取 300 K)淹没。因此取样电阻值要较大,但较大的取样电阻会明显降低散粒噪声探测器的测量带宽,而且所产生的负载效应难以保证 ETX500 稳定、低噪声工作^[19-26]。虽然直流电流跨阻抗前置放大器能在测量带宽与信号增益之间取得平衡,但是由于直流电流的影响,探测系统的电子学噪声较高。在改进的交流电流耦合跨阻抗前置放大器探测方案中,通过合理的参数设计和带宽优化,能在较低的噪声条件下实现稳定工作,

既能有效将噪声电流转换为噪声电压,还能改善探测信号的增益、带宽等特性^[26]。

2.3 直流信号监视

用示波器和数字万用表同时测量 DC 电压输出,示波器可以监视直流与交流电路是否发生振荡,而精确的直流电压(电流)值有利于预估探测器系统的交流、直流饱和特性。

3 探测系统的增益及带宽分析

3.1 散粒噪声探测器的设计难点

商用的宽带、高增益、低噪声探测器或者光场额外噪声探测器常采用多级放大来探测微弱信号,虽然在较高带宽情况下实现了较高增益,但是在第一级放大之前并没有达到散粒噪声极限,只达到了热噪声极限,光场的散粒噪声完全被热噪声所淹没;而只有在第一级放大时探测器达到散粒噪声极限,才能真实地测量光场的散粒噪声特性。因此,要获得达到散粒噪声极限的宽带、高增益探测器是工作的难点。

3.2 ETX500 低噪声工作

因为量子光学实验对探测器的噪声抑制有较高要求,本文采用+5 V 的反偏电压,而不是+15 V 反偏电压^[19-20]。其原因是+15 V 反偏电压不能显著降低 ETX500 的结电容(或者提升信号带宽),却很容易增加暗电流噪声,降低探测灵敏度^[1-5]。

3.3 交流与直流放大的芯片选取

交流电流耦合跨阻抗前置放大器所选芯片为 AD8067(JFET 型),输入阻抗高,非常适合作为较高源阻抗的前置放大器。相比实验室现有的芯片 AD829^[19],AD8067 虽然噪声电压较高,但是由于其 JFET 的输入阻抗特性高,因此可以忽略其噪声电流和输入偏置电流对光场散粒噪声的影响^[25-26]。AD8067 与 AD829 芯片的低噪声和带宽参数对比如表 1 所示。

虽然 AD829 的增益带宽积大约是 AD8067 的二倍,但是鉴于原有方案^[19]中使用低噪声电压前置放大,探测不小于 2 mW 的红外光时的有效带宽为 5 MHz 左右,并没有完全利用其增益带宽积高的优势;而使用交流电流耦合跨阻抗放大方案时,同时考虑寄生电感和杂散电容等限制因素^[22],探测不小于 1.62 mW 的红外光时的有效

带宽达到 5 MHz,较好地实现了增益带宽积与低噪声参数的折中处理。

表 1 AD8067 与 AD829 的低噪声和带宽参数对比(±5 V 供电,测量频率为 10 kHz)

Tab. 1 Comparison of low noise and bandwidth parameters between AD8067 and AD829(powered by ±5 V at 10 kHz)

型号	噪声电压/ (nV · Hz ^{-1/2})	噪声电流/ (fA · Hz ^{1/2})	偏置电流/ /PA	增益带宽积 /MHz
AD8067	6.6	0.6	0.6	330
AD829	1.7	600	3 300	600

本文选用输入偏置电流小,输入失调电压极小且单位增益工作稳定的 OP27^[19-20] 探测 ETX500 输出的直流电流。

3.4 探测器带宽分析

量子光学实验通常在 2~5 MHz 频率测量 1 064 nm 光场的散粒噪声及其压缩特性^[1-5],故结合 ETX500 光电二极管的特性,探测器的有效带宽应在 5 MHz 左右。

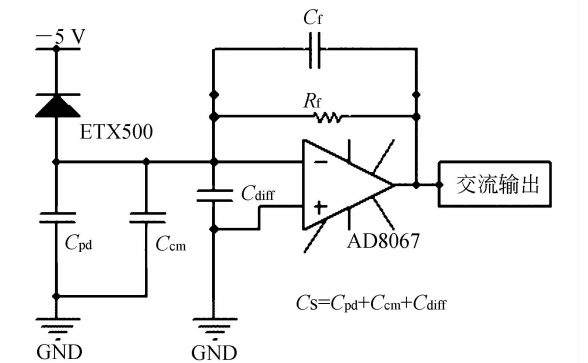


图 2 跨阻抗前置放大器的等效电路图
Fig. 2 Equivalent circuit for trans-impedance detector

交流(耦合)探测部分的等效电路图与直流电流跨阻抗前置放大器^[26]一致,如图 2 所示。跨阻抗前置放大器的闭环增益带宽为:

$$f_{\text{closed}} = \sqrt{\frac{GBP}{2\pi \times R_f \times C_s}}.$$

(1)

跨阻抗前置放大器的一 3 dB 带宽为:

$$f(-3 \text{ dB}) = 1/(2\pi \cdot R_f \cdot C_f). \quad (2)$$

噪声增益的零点频率为:

$$f_{\text{zero}} = 1/(2\pi \times R_f \times C_s). \quad (3)$$

C_s 是放大器反向输入端的等效输入电容,考虑 ETX500 的结电容 C_{pd} 、放大器的差、共模输入电容(C_{diff} , C_{cm}), C_s 取 40 pF。当 $R_f=10 \text{ k}\Omega$, $C_f=2.7 \text{ pF}$, 由公式(1)、(2)、(3), 计算得到:

$$f_{\text{closed}} = 11.5 \text{ MHz}, \quad (4)$$

$$f(-3 \text{ dB}) = 5.8 \text{ MHz}, \quad (5)$$

$$f_{\text{zero}} = 0.4 \text{ MHz}. \quad (6)$$

考虑寄生电感、杂散电容的影响^[22], 实际的-3 dB带宽约为 5 MHz, 且闭环增益带宽也约为 5 MHz, 符合量子光学实验对探测器带宽的要求。

3.5 信号增益分析

运放的开环增益特性曲线为一阶响应(暂不考虑为二阶响应)时, 输入噪声电流的增益($G=V_{\text{ac/ishot}}$)为:

$$G = -R_f / (1 + R_f \cdot C_f \cdot s), \quad (s = j \cdot 2\pi \cdot f) \quad (7)$$

因为散粒噪声电流、ETX500 的暗噪声电流和运放的等效噪声电流都为白噪声, 且增益都满足公式(7), 故要求整个探测系统在低噪声条件下运行。

由公式(1)、(7)可知, 若 R_f 的取值过大, -3 dB 带宽将严重减小; 随着频率的增加, 噪声电流的增益也逐渐下降。

在分析频率大于零点频率时, 运放的等效输入噪声电压产生高频增益。当频率达到-3 dB 带宽后, 噪声电压增益为 $(1 + C_s/C_f)$, 这导致电子学噪声在零点频率以后快速上升, 对探测器的高频电子学噪声起了主要作用。因此要求探测器在低噪声、高增益与较高带宽之间做出优化处理。

4 散粒噪声探测电路原理图分析

散粒噪声探测器的详细电路原理图如图 3 所示。为了充分降低电源的噪声, 本文在芯片供电端与 ETX500 的反向偏压端设计 π 型滤波电路。ETX500 探测的直流电流流经电感 L_2 和直流取样电阻 R_9 , 测得直流电流对应的 DC 电压值; 交流电流(噪声电流)经过耦合电容 C_5 耦合后流入 AD8067 的反馈电阻 R_f , 转换为噪声电压信号, 然后经过滤波和匹配后输入频谱分析仪中。

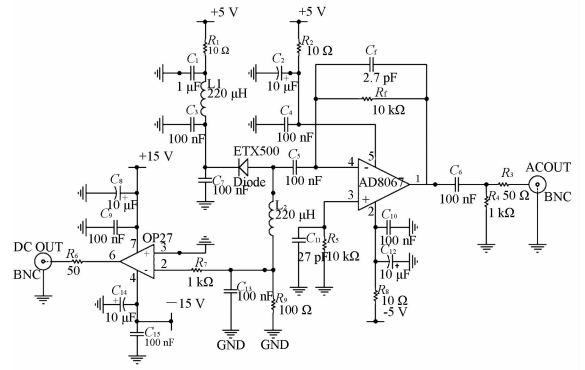


图 3 散粒噪声探测器的详细电路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of circuit of shot noise detector

在直流电流跨阻抗前置放大器中, 为了获得较高的信噪比, 反馈电阻 R_f 一般取值很高; 但在量子光学实验中, 由于在 2~5 MHz 分析频率内探测交流电流部分, 若 R_f 的取值较高, 会导致散粒噪声探测器的带宽严重下降。反馈电容 C_f (pF 量级) 与反馈电阻 R_f 并联, 其主要作用是防止 AD8067 自激并限制探测器的信号带宽; 否则 AD8067 将严重自激, 探测器无法正常工作。

常规的微弱探测中, 所探测信号的频谱特性与探测器噪声的频谱特性不同, 因此通常在时域内测量输出交流电压的有效值, 并接入低通滤波器以提高信噪比; 但是量子光学主要在频域内测量噪声功率谱, 在输出端加低通滤波器并不能改善频域内的信噪比, 反而对散粒噪声信号产生衰减作用。

5 实验结果与分析

在测量过程中, 选用实验室自制的单频 1 064 nm 激光器作激光光源, Agilent 公司生产的 E4402B 频谱分析仪作为散粒噪声信号的低噪声测量设备, 其测量带宽为 20 kHz~3 GHz。另外, 选用 Thorlabs 公司生产的 PM1000 系列红外光功率计测量光功率, 其测量精度高达 nW 级, 可满足 μW 量级光功率的测量要求。

5.1 探测器的输出特性

选用取样电阻 $R_f=10 \text{ k}\Omega$, 反馈电容 $C_f=2.7 \text{ pF}$ 时, 注入不同功率的红外光, 探测器的输出特性如图 4 所示。频谱分析仪的设置参数为 $R_{\text{BW}}=30 \text{ kHz}$, $V_{\text{BW}}=100 \text{ Hz}$, $\text{Sweep Time}=1.35 \text{ s}$ 。由

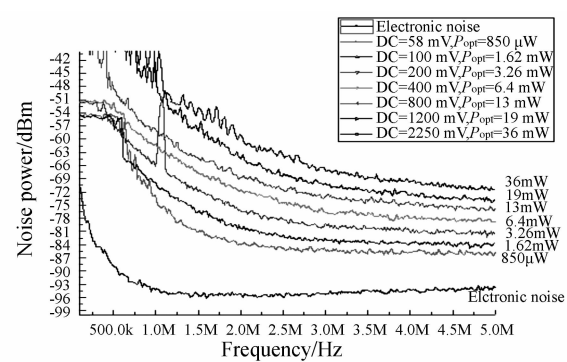


图 4 不同注入 1 064 nm 红外激光光功率下,散粒噪声探测器探测到的噪声谱

Fig. 4 Noise spectra under different input powers from 1 064 nm infrared laser, detected by developed shot noise detector

图 4 可知,2 MHz 以内,光功率每增加(减小)一倍时,噪声谱增加(减小)3~6 dB,激光光场既有额外噪声又有散粒噪声;2~5 MHz 内,光功率每增加(减小)一倍时,噪声谱增加(减小)3 dB,激光光场只含有散粒噪声。此结果说明改进的探测器的交流响应线性度良好^[19-20]。

同原有电压前置放大器方案^[19]相比,本文提出的方案在 2 MHz 处,红外光场的散粒噪声谱高于电子学噪声谱 10 dB 的最低光功率,由以前的 2 mW 降低到现在的 850 μW 左右,且光功率大于 1.62 mW 及以上的探测带宽达到 5 MHz。当入射红外光功率为 1.62 mW 时,2 MHz 处的散粒噪声谱高于电子学噪声 13 dB 左右,比以前的方案提高了 3 dB 左右。

从图 4 中还可观测到,当分析频率大于 2 MHz 时,电子学噪声谱产生高频增益。零点频率远大于直流跨阻抗前置放大器的预测值,这说明交流电流耦合跨阻抗前置放大器的电子学噪声更低。随着频率的增加,在高于 5 MHz 时,散粒噪声逐渐被电子学噪声淹没^[24-26]。

5.2 探测器的交流、直流响应分析

表 2 为 2 MHz 处,入射光功率 P_{opt} 、DC 电压增益与交流增益 AC_{gain} (dB) 的关系。

所测数据不仅验证了探测的光功率增加一倍时,散粒噪声谱满足 3 dB 增加的关系;也说明相比以前的方案^[19-20],在响应高达 36 mW 红外激光输入时,探测器仍然具有较高的交流增益线性和直流增益线性。

表 2 入射光功率 P_{opt} 、DC 数值与交流增益 AC_{gain} 的关系在 2 MHz ($R_f=10\text{ k}\Omega, C_f=2.7\text{ pF}$)

Tab. 2 Relationship among input infrared laser power P_{opt} , DC value and AC_{gain} at 2 MHz ($R_f=10\text{ k}\Omega, C_f=2.7\text{ pF}$)

P_{opt} at 1 064 nm /mW	DC /mV	DC ratio	AC_{gain} at 2 MHz /dB	ΔAC_{gain} at 2MHz /dB
0.850	58	—	10	—
1.62	110	1.89	13	3
3.26	210	1.90	16	3
6.32	420	1.90	19	3
13.1	850	2.02	22	3
19	1 250	1.47	24	2
36	2 350	1.88	27	3

5.3 R_f 的实际取值较高的分析

当入射到 ETX500 的红外光功率为 850 μW 时,直流电流约为 0.6 mA,光场的散粒噪声频谱为 14 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。考虑电阻热噪声和 AD8067 的等效输入噪声,探测器达到散粒噪声极限时, R_f 取值约为 8 kΩ。

但 R_f 的实际取值(10 kΩ)大于理论值,其原因有:(1)ETX500 的光感受面较小(直径为 0.5 mm),入射光场在光感受面上的反射和入射红外光并未完全被转换为光电流信号;(2)ETX500 的等效负载阻抗随着频率的增加而急剧上升,不仅导致信号带宽的快速降低,而且 ETX500 较高的容抗与等效输入阻抗产生不可忽略的分流作用,降低了散粒噪声的高频增益;(3)探测电路存在漏电流和寄生电容分流作用等影响因素。鉴于光电探测电路具有杂散电容、暗电流、寄生效应等高频特性,光电探测电路还有待进一步的优化。

6 结 论

本文以改进量子光学实验所用探测器的增益、带宽、饱和响应和低噪声等特性为目标,采用交流电流耦合跨阻抗前置放大电路思路,设计实现了高增益散粒噪声探测器。采用波长为 1 064 nm 的单频激光器作为激光光源,频谱分析仪作为噪声测量工具,测量了探测器的输出特性。在

分析频率为 2 MHz 处,实测注入探测器功率为 $850\ \mu\text{W}$ 时,输出的噪声功率谱较电子学噪声谱高出 10 dB。当注入探测器的功率大于 1.62 mW 时,探测器的带宽达到 5 MHz。探测器在输入光

功率为 0.85~36 mW 时能保持良好的交流与直流线性特性。该探测器拓宽了量子光学实验可测量的光功率范围,是量子光学实验的重要探测工具。

参考文献:

- [1] 彭堃堦. 光场压缩态的产生及其亚散粒噪声光学测量和量子信息中的应用[J]. 物理, 2001, 30(5): 300-305.
PENG K C. Generation and application of squeezed state light: sub-shot-noise-limited optical measurement and quantum information[J]. *Physics*, 2001, 30(5): 300-305. (in Chinese)
- [2] WU L A, KIMBLE H J, HALL J, *et al.*. Generation of squeezed states by parametric down conversion [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, 57 (20): 2520-2523.
- [3] HANSEN H, AICHELE T, HETTICH C, *et al.*. Ultrasensitive pulsed, balanced homodyne detector; application to time-domain quantum measurements [J]. *Opt. Lett.*, 2001, 26(21): 1714-1716.
- [4] QUINLAN F, FORTIER T M, JIANG H, *et al.*. Exploiting shot noise correlations in the photodetection of ultrashort optical pulse trains[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7: 290-293.
- [5] BACHOR H A, MANSON P J. Practical implications of quantum noise [J]. *Journal of Modern Optics*, 1990, 37(11): 1727-1740.
- [6] SCULLY M O, ZUBARY M S. *Quantum Optics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 128.
- [7] JIANG Y J, MA J, TAN L Y, *et al.*. Measurement of optical intensity fluctuation over an 11.8 km turbulent path [J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 6963-6967.
- [8] HEIM B, EISER D, BARTLEY T, *et al.*. Atmospheric channel characteristics for quantum communication with continuous polarization variables[J]. *Appl. Phys. B*, 2010(98): 635-640.
- [9] WANG Y J, ZHENG Y H, XIE C D, *et al.*. High-power low-noise Nd: YAP/LBO laser with dual wavelength outputs[J]. *Quantum Electronics*, 2011 (47): 1006-1013.
- [10] WANG X, JEFFERSON M, HOBBS P C D, *et al.*. Shot-noise limited detection for surface plasma sensing [J]. *Optics Express*, 2010, 19(1): 107-117.
- [11] 庞春颖, 张涛. 激光主动成像系统信噪比模型的研究[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(2): 319-324.
PANG CH Y, ZHANG T. Signal-to-noise ratio mode of laser active imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 319-324. (in Chinese)
- [12] 王兴玲, 刘龙飞, 于钢, 等. 全球陆地光学遥感影像获取技术与应用[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(10): 2324-2330.
WANG X L, LIU L F, YU G, *et al.*. Global optical image acquisition technology and its application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2324-2330. (in Chinese)
- [13] The LIGO Scientific Collaboration. A gravitational wave observatory operating beyond the quantum shot-noise limit [J]. *Nature Physics*, 2011, 7: 962-965.
- [14] 李醒飞, 王驰, 向红标, 等. 光学外差干涉法检测微弱超声振动[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(7): 1158-1162.
LI X F, WANG CH, XIANG H B, *et al.*. Detection of weak ultrasonic signal using optical heterodyne interferometry [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1158-1162. (in Chinese)
- [15] 张合勇, 赵帅, 郭劲, 等. 相干和多模热光场的光子统计实验[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(10): 2132-2139.
ZHANG H Y, ZHAO SH, GUO J, *et al.*. Experiment of coherent and multi-mode thermal light statistics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2132-2139. (in Chinese)
- [16] 俞文凯, 姚旭日, 刘雪峰, 等. 压缩传感用于极弱光计数成像[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(10): 2283-2292.
YUE W K, YAO X R, LIU X F, *et al.*. Compressed sensing for ultra-weak light counting imaging [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10):

- 2283-2292. (in Chinese)
- [17] 王志斌,史国华,何益,等. 相干层析技术在光学表面间距测量中的应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7):1469-1474.
WANG ZH B, SHI G H, HE Y, *et al.*. Application of optical coherence tomography to distance measurement of optical surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7):1469-1474. (in Chinese)
- [18] TALLOR M A, JANOUSEK J, DARIA V, *et al.*. Biological measurement beyond the quantum limit [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7:229-233.
- [19] 王晶晶,贾晓军,彭堃. 平衡零拍探测器的改进[J]. 光学学报, 2012, 32(1):0127001-1-7.
WANG J J, JIA X J, PENG K C. Improvement of balanced homodyne detector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1):0127001-1-7. (in Chinese)
- [20] 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.
ZHOU Q Q, LIU J L, ZHANG K SH. Low-noise, broadband photodetector designs in quantum optics [J]. *Acta Sinica Quantum Optics*, 2010, 16(2):152-157. (in Chinese)
- [21] 卜绍芳, 尼启良, 何玲平, 等. 极紫外波段微通道板光子计数探测器[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 302-309.
BU SH F, NI Q L, HE L P, *et al.*. Microchannel plate photon counting detector in UV range [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 302-309. (in Chinese)
- [22] 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.
- [23] LAU K S, TAN C H, NG B K, *et al.*. Excess noise measurement in avalanche photodiodes using a transimpedance amplifier front-end [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, 17:1941-1946.
- [24] MENG L, YU L L, PU Y Q, *et al.*. Design of amplifying circuit for tiny signal [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(6):1012-1013.
- [25] 胡涛, 司汉英. 光电探测器前置放大电路设计与研究[J]. 光电技术应用, 2010, 25(1):52-55.
HU T, SI H Y. Design and research of preamplifier circuit for a photoelectric detector [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2010, 25(1): 52-55. (in Chinese)
- [26] JOHNSON M. *Photodetection and Measurement: Maximizing Performance in Optical Systems* [M]. First edition. New York: McGraw-Hill Professional, 2003.

作者简介:



周海军(1987—),男,四川资阳人,博士研究生,2011年于太原科技大学获得学士学位,主要从事激光技术与光量子器件的研究。E-mail: zhouhaijun0351@163.com



郑耀辉(1979—),男,山西石楼人,副教授,2009年于山西大学获得博士学位,主要从事激光技术与光量子器件的研究。E-mail: yhzhen@sxu.edu.cn



王文哲(1963—),男,山西太原人,高级工程师,2013年于山西大学获得博士学位,主要从事激光技术与光量子器件的研究。E-mail: wang_wenzhe@sxu.edu.cn