文章编号:1001-5078(2013)02-0190-05 ·电子电路·

# 电荷灵敏前置放大器消除电源噪声的设计

肖海军,张流强,肖沙里,李先仓,黄振华
(重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室,重庆 400030)

**摘 要**:在高灵敏度光电探测领域,常常采用雪崩二极管(APD)等高增益探测器,这些探测器通常需要上百伏的工作电压,因此电源噪声对探测器的性能影响很大。针对单光子探测的需要,论文提出了一种电荷灵敏前置放大器消除电源噪声的设计,通过采用匹配的差分输入,可以有效抵消电源的共模噪声。论文首先对APD探测器在不同偏压下的结电容进行测试,然后采用可调电容对APD电容进行匹配,用MultiSim对提出的电路进行了仿真分析,最后制作实验电路进行了测试和验证。结果表明:差分输入电荷灵敏前置放大器能够有效消除电源噪声(包括低频噪声和高频噪声),实现高灵敏度的光探测。

**关键词**:电荷灵敏前置放大器;APD;差分放大;Multisim仿真;电源噪声
**中图分类号**:TN29 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2013.02.016

# Power supply denoising design for charge-sensitive preamplifier

XIAO Hai-jun, ZHANG Liu-qiang, XIAO Sha-li, LI Xian-cang, HUANG Zhen-hua
(Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems attached to Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract**: High gain photon detectors such as avalanche photo diode (APD) are widely used for high-sensitivity photon detection. However, the high voltage applied to these detectors often makes serious noise. In order to perform high-sensitive photon detection, an innovative denoising design for charge-sensitive preamplifier is proposed, which can reduce the power-supply noise by differential amplification. Firstly, the junction capacitance of APD is tested under various bias voltages. Then capacitance matching is made with an adjustable capacitor and circuit simulation is performed with Multisim software. Finally the fabricated circuit is tested. It is shown that the charge-sensitive pre-amplifier with differential input can significantly reduce the power-supply noise (both low frequency and high frequency) and realize high sensitivity.

**Key words**: sensitive charge preamplifier; APD; differential amplification; Multisim simulation; power-supply noise

## 1 引 言

高灵敏度光探测器在成像、光谱和光通讯领域有着广泛的应用,随着应用需求的发展,高速和高灵敏度光探测器越来也受到业界的重视,其最新发展就是以单光子探测为标志的新型光探测技术。单光子探测是以探测单个光子形成的电流脉冲为目标并通过光子计数进行光强和光谱分析的高速高灵敏度光探测技术,其核心是高灵敏度光探测器和低噪声前置放大器。目前,单光子探测通常采用雪崩二极管(APD)光探测器,雪崩二极管具有很高的电流增益,但这种高增益必须在上百伏的偏置电压下才能实现,因此电源的微小波动必然对APD的探测信号产生巨大影响[1-2]。

传统的电荷灵敏前置放大器采用的是单端输

**基金项目**:国家自然科学基金中国工程物理研究院联合基金项目(No. 10876044)资助。
**作者简介**:肖海军(1986-),男,硕士研究生,主要从事光电探测,核探测电路方面的研究。E-mail:navy2010xhj@yahoo.com.cn
**收稿日期**:2012-07-17;**修订日期**:2012-08-07

入,即将 APD 电流信号直接输入前置放大器的正相或负相输入端进行放大[3-6],由于 APD 具有一个小的结电容(几皮法),电源噪声将不可避免的通过该电容耦合到前置放大器中,从而使探测电路的信噪比大幅降低,这在很多时候是限制探测器灵敏度提高的一个主要障碍。

虽然偏置电源经过滤波电容、电感进行滤波,使其纹波能达到 0.005% 精度,温漂与时漂都可能很低,但在实际测试的上百伏电压情况下,电源噪声峰值仍可能达到几十毫伏。可能的电源噪声和共模信号包括:①由于电源不稳定而引起的电压波动(纹波),一般为低频,很难通过滤波电容去除;②高压电源的各种噪声,包括低频的工频噪声和高频的反激噪声等,虽然可以滤除但仍有残余;③串联大电阻的热噪声和并联大电容的介电噪声;④由于电磁屏蔽不好而从电源线上串入的无线电干扰噪声。这些共模噪声往往叠加在一起,使得探测器的噪声源变得复杂且不能忽略。

针对高灵敏度高速光探测的需要,本文提出一种差分输入电荷灵敏前置放大器设计,它能有效抑制或消除偏置高压电源的噪声,使光探测系统可以实现更高的灵敏度。

## 2　差分输入电荷灵敏前置放大器

为了抑制高压电源的噪声,采用差分输入电荷灵敏前置放大器,即将电源上的共模噪声信号通过一个与 APD 结电容匹配的耦合电容输入到前置放大器的正向端,而 APD 的电流信号和耦合噪声从放大器的负相端输入,由于前置放大器的差分作用,电源的共模噪声信号被相互抵消,放大输出信号仅为 APD 的电流积分信号。

设计的电荷灵敏前置放大器由带有结型场效应管(JFET)的低噪声高速运放和反馈电容构成。图 1 是被动抑制下APD工作的电路原理图。选择带

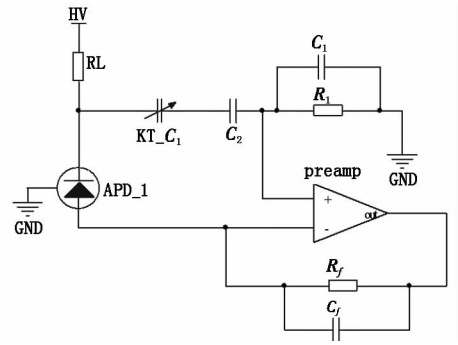



图 1　差分输入电荷灵敏前置放大器原理图

Fig. 1　the principle of charge-sensitive preamplifier with differential input

JFET 输入的低噪声电压放大器 OPA657 做前置放大器。反馈电容选择温度系数很小的电容,电阻也应选择性能好的金属膜电阻以减小热噪声。可调电容 KT - $C_1$,与电容 $C_2$ 均为耐高压电容,调节 KT - $C_1$ 目的是匹配 APD 的结电容使输出端共模噪声最小。

对于差分输入前置放大器来说,输入电容的匹配非常关键,因此,首先必须测量出偏压作用下的 APD 探测器的结电容。通常 APD 结电容可以参考器件厂商提供的数据资料,但这些数据仅仅是一些参考值,实际上每个 APD 的结电容及对应的雪崩电压都不可能完全一致,因而必须通过精确的实验测试来获得。

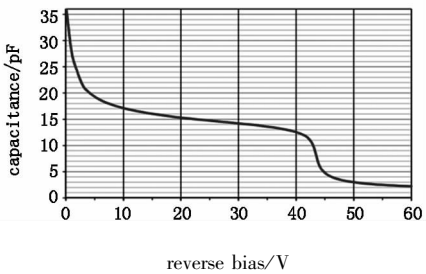



图 2　APD 结电容随反偏电压变化关系

Fig. 2　the relationship of APD junction capacitance changing with reverse bias

图 2 是 Silicon Sensor 公司提供的雪崩光电二极管 AD500 - 8TO52 的结电容随偏置电压变化的 $C-V$ 曲线,该曲线反映了结电容的大小随偏压变化的总体趋势。为了获得该 APD 器件的实际结电容,我们用示波器对不同偏压下的 APD 电容进行了精确测量,其结果如图 3 所示。测试数据给出的 APD 结电容的变化趋势与参考曲线基本一致,但对应的偏压值有很大差别。在偏压 92 ~ 140 V(140 V 为雪崩电压)下,测得结电容为 1.1 ~ 1.93 pF(测量误差小于 1 pF)。

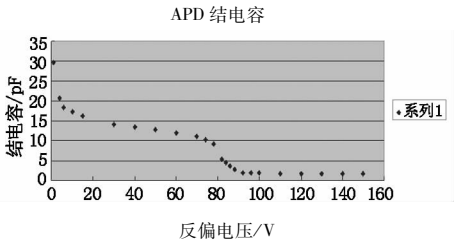



图 3　实测 APD 结电容变化随反偏电压变化关系

Fig. 3　the practical relationship of APD junction capacitance changing with reverse bias

假设 APD 探测器输出的光电流为 $i_0(t)$,则电荷灵敏前置放大器输出的峰值电压 $V_{0max}$ 近似等于

$C_f$ 上的电压[8],即:

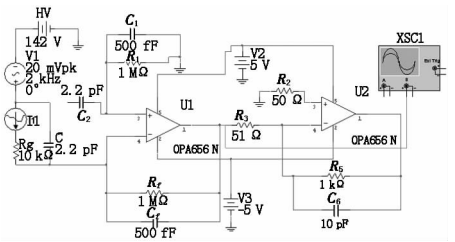
$$V_{0\max} \approx \frac{Q}{C_f} = \frac{1}{C_f}\int_0^{t_m} i_0(t)\,\mathrm{d}t \tag{1}$$

其中,$C_f$ 是反馈电容;$t_m$ 是电荷积分时间。

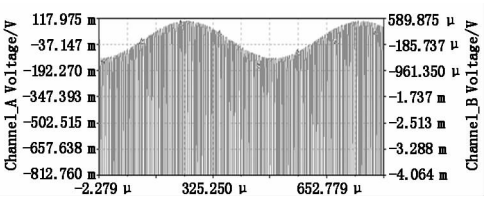
## 3 电路仿真

采用 NI 公司的仿真软件 Multisim10.1 进行电路仿真。将 APD 等效为理想脉冲电流源 $I$、导通电阻 $R$ 以及结电容 $C$ 所构成的电路。考虑 APD 电源纹波精度为 0.01%,时漂和温漂均较小。APD 工作电压设为 140 V,则可能的噪声电压幅度大概在 20 mV 左右,因此将共模噪声等效为一个幅值 20 mV 频率 1 kHz 的交流电压源。考虑到探测器会接受不同频率的光信号,信号源设为一系列幅值和时间间隔随机变化的脉冲电流信号,电流大小为 10~100 nA,脉冲宽度在 100 ns 以内,两个脉冲时间间隔在 500 ns~5 μs 之间。APD 结电容 $C$ 设为 2.2 pF,内阻 $R_g$ 设为 10 kΩ。一般为了将信号产生的电荷尽可能完全收集,$R_f$ 的取值应根据探测信号的频率和幅值以及匹配后级电路的需要来选取。$R_f$ 取值过大会造成电荷在电容 $C_f$ 上堆积而无法得到泄放;$R_f$ 过小又会造成电荷收集不完全,由公式(1)可知输出电压幅值将小于理论幅值;如果电容存在漏电流,则信号衰减将更严重。

图 4 是单端输入电荷灵敏前置放大器的电路图和仿真结果。由于电源的噪声从 APD 的结电容耦合进入前置放大器,使得输出信号叠加在一个噪声信号上面。如果检测电流非常小或高压电源噪声较大,那么这种影响将使探测器信噪比大大降低。




(a)单端输入电荷灵敏前置放大电路

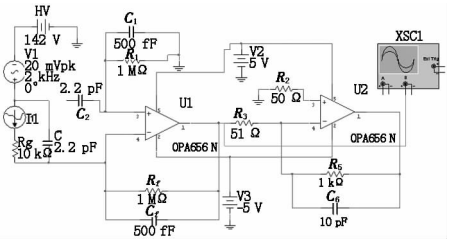



(b)仿真结果

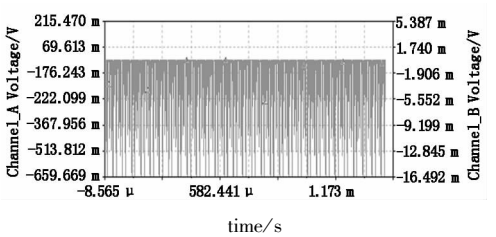
图 4 单端输入电荷灵敏前置放大电路和仿真结果

Fig. 4 the circuit of single input charge-sensitive pre-amplifier and its simulation results

图 5 是匹配 2.2 pF 电容后的差分输入电荷灵敏前置放大电路和仿真结果。可以看出,改进的电路输出信号与电源噪声完全无关。由于测量的 APD 结电容存在一定的误差,购买的贴片电容也存在一定的容差值,如果匹配电容小于或大于 2.2 pF,则共模噪声不能完全抑制。图 6 为不完全匹配时输出信号的仿真结果,匹配电容 $C_2$ 等于 1.5 pF。与图 5 对比可知,信号中存在共模噪声,但仍比没有匹配时的噪声更小。




(a)匹配的差分前放电路




(b)仿真结果

图 5 匹配的差分前放电路和仿真结果

Fig. 5 the circuit of well matched differential input pre-amplifier and its simulation results

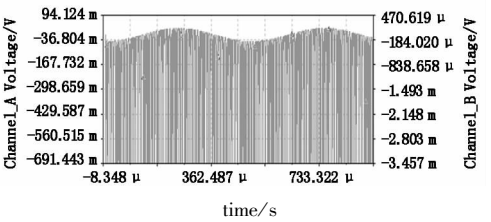



图 6 不完全匹配时输出信号的仿真结果

Fig. 6 the simulation results of a not well matched preamplifier

经过多次仿真发现,匹配电容 $C_2$ 越接近 APD 结电容输出信号的噪声抑制能力越强。如果匹配电容大于结电容的 2 倍,则噪声抑制基本失效。如果匹配电容小于结电容,在 1/5 到 1 个结电容范围内仍然有一定的噪声抑制作用。因此,匹配电容应选取标称值略小于结电容为宜。

## 4 实验测试

实验电路如图 7 所示,APD 采用德国 Silicon

Sensor 公司 AD500 - 8TO52。PCB 板的各个电阻、电容参数与仿真电路参数一致。KT_$C_1$ 是村田 1 ~ 3 pF 可调电容,电容 $C_2$ 为 10 pF,与 KT_$C_1$ 串联后总电容在 2 pF 左右,以匹配 APD 结电容。高压电源采用 0 ~ 500 V 可调高压电源,输出电流 5 mA,纹波系数 0.01%,温度系数 0.01%/℃,时漂 0.01%/h。

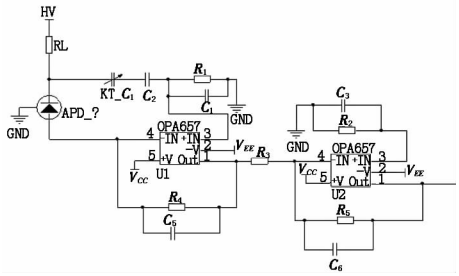



图 7　电荷灵敏前置放大器电路图

Fig. 7　the circuit of charge-sensitive preamplifier

为了验证共模噪声抑制,将一个 3 V 的正弦波电压,通过一个 56 pF 的耐高压电容耦合到高压输入端作为共模噪声。电容的匹配通过调节可调电容 $C_1$ 来实现;取消电容匹配时,则将匹配电容 KT_$C_1$ 与 $C_2$ 的输入端接地。

测试结果如图 8 所示,图 8(a)、图 8(b)分别为低频 1 kHz 的共模信号在加上匹配电容和取消匹配电容时的输出情况。可以看到,在电容匹配情况下,共模噪声几乎完全消失;而取消匹配时,输出一定比例的共模噪声。图 8(c)、图 8(d)分别为极低频 5 Hz 共模信号的作用情况。此时因共模噪声的频率很低,通过电容耦合后的共模信号值很小,与之相比高压电源噪声此时占主导作用。当电容匹配时输出信号仅有很小的高频噪声,如图 8(c)所示;而当去除电容匹配时,高频噪声幅值提高了一个数量级,如图 8(d)所示。综合低频和高频结果可知,差分输入电荷灵敏前置放大器的耦合电容能显著抑制电源噪声。

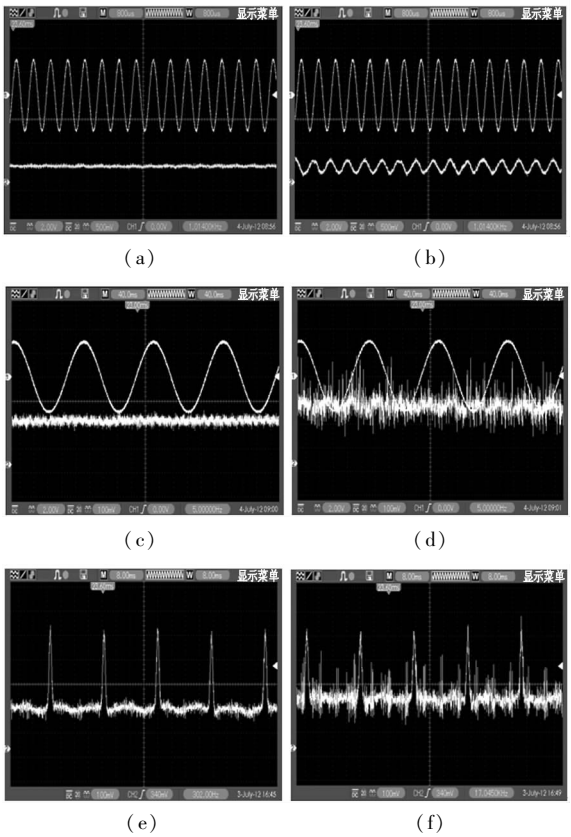



图 8　电源噪声的抑制情况

Fig. 8　test of power supply noise suppression

为了进一步考察设计的前置放大电路在实际工作时的噪声抑制效果,采用 LED 脉冲光源进行光探测实验,当电容匹配时,获得的光信号如图 8(e)所示,噪声与信号相比保持在一个很低的水平。同等情况下,取消电容匹配,测得的光信号如图 8(f)所示,此时噪声已达到与信号幅值相当的水平。

## 5　结　论

本文提出了一种差分输入的电荷灵敏前置放大电路,该电路通过匹配电容来抵消 APD 耦合的电源噪声,仿真和实验结果表明该电路确实可以显著降低电源引起的各种噪声的影响,从而实现更高的光探测灵敏度。该电路可以应用于各种单光子探测电路。

## 参考文献:

[1]　Zhang Xuejiao, Wan Junli. The development and application of single-photon detectors[J]. Laser Journal, 2007, 28(5): 13 - 15. (in Chinese)
张雪皎,万钧力. 单光子探测器件的发展与应用[J]. 激光杂志,2007,28(5):13 - 15.

[2]　Li Xia, Chu Junhao, Li Longxia, et al. Development of room temperature CdZnTe nuclear radiation detector[J]. Semiconductor Technology, 2008, 33(11): 941 - 946. (in Chinese)
李霞,褚君浩,李陇遐,等. 室温 CdZnTe 核辐射探测器研究进展[J]. 半导体技术,2008,33(11):941 - 946.

[3]　Deng Zhi, Zhu Weibin, Li Yuanjing, et al. Low noise charge sensitive preamplifier A250 for CZT detector readout[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2007, 27(6): 1103 - 1105.

[3]　邓智,朱维彬,李元景,等. 用于 CZT 探测器信号读出的低噪声电荷灵敏前放 A250[J]. 核电子学与探测技术,2007,27(6):1103 - 1105.

[4] M Goyot. A versatile fast low noise preamplifier in UHF bipolar technology[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A, 2000, 442: 374 – 377.

[5] Xu Wei, Chen Qian, Gu Guohua, et al. Charge sensitive preamplifier design for APD detection system of laser pulse[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(1): 27 – 30. (in Chinese)
徐伟,陈钱,顾国华,等. 用于 APD 激光探测器的电荷灵敏前置放大器设计[J]. 激光与红外, 2011, 41(1): 27 – 30.

[6] Guo Yu, Zhao Shunping. The choice of active device about low-noise preamplifier[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2007, 44(498): 62 – 64. (in Chinese)
郭玉,赵顺平. 低噪声前置放大器有源器件的选择[J]. 电测与仪表, 2007, 44(498): 62 – 64.

[7] Wang Zhiying, et al. Principle of nuclear technology [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1989, 6. (in Chinese)
王芝英,等. 核电子技术原理[M]. 北京:原子能出版社, 1989, 6.