

·电路与控制·

硅光电倍增管(SiPM)适配电路设计

桑 涛,郝晓剑,张根甫

(中北大学 电子测试技术国家重点实验室,太原 030051)

摘要:硅光电倍增管(SiPM)是一种新型的光电探测器件,具有增益高、灵敏度高、偏置电压低、对磁场不敏感、结构紧凑等特点。研究并设计了硅光电倍增管(SiPM)的适配电路,包括电源电路及跨阻放大电路。应用仿真软件对设计的电路进行仿真,并对电路的结构参数进行了优化。最后,制作了适配电路。测试结果表明,该适配电路对频率100 kHz的光信号有较好的输出响应,输出幅值达到伏级,满足设计要求。

关键词:硅光电倍增管(SiPM);光电探测;适配电路;电路设计

中图分类号:TN702

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2015)-04-0046-05

Design of Adapter Circuit for Silicon Photomultiplier Tube (SiPM)

SANG Tao, HAO Xiao-jian, ZHANG Gen-fu

(National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Silicon photomultiplier tubes (SiPM) is a new type of photoelectric detector, which has the advantages, such as high gain, high sensitivity, low bias voltage, insensitive to magnetic field and compact structure. The adapter circuit of SiPM is researched and designed, which includes a power supply and transimpedance amplifier circuits. Simulation software is used to simulate the designed circuits. And the structural parameters of the circuits are optimized. Finally, the adapter circuit is made and the test results show that the adapter circuit has a good output response to 100 kHz optical signal, output amplitude reaches volt level, which meets the design requirements.

Key words: Silicon photomultiplier tubes (SiPM); photoelectric detection; adapter circuit; circuit design

光电探测器,是利用物质的光电效应把光辐射信号转换成电压或者电流等电信号的器件。其在光电技术中的作用是发现信号、测量信号,并为随后的应用提取某些必要的信息。光电探测在军事、空间技术和其他科学技术以及工农业生产上得到广泛应用,它的性能对光电信息系统的性能影响很大,如在缩小系统的体积、减轻系统的质量、增大系统的作用距离等方面都有较大影响。

在众多光电探测器件中,硅光电倍增管(silicon photomultiplier, SiPM)是一种新型的光电探测器件,由工作在盖革模式的雪崩二极管阵列组成,一般具有增益高、灵敏度高、偏置电压低、对磁场不敏感、结

构紧凑等特点^[1]。广泛应用于微光探测、光子计数、高能物理及核医学(PET)等领域^[2-4],被认为是未来极微弱光探测器的发展方向。

1 SiPM的工作原理

硅光电倍增管由大量的雪崩二极管(APD)单元组成,每一个单元由一个APD和一个大阻值淬灭电阻串联而成,这些微元并联成一个面阵列。为硅光电倍增管加上反偏电压后,每个APD耗尽层就有很高的电场,当有光子射入耗尽层时,APD因雪崩效应而产生较大电流。随着电流的增大,淬灭电阻两端

收稿日期:2015-07-13

作者简介:桑涛(1989-),男,硕士研究生,主要研究方向为光信息处理技术;郝晓剑(1969-),女,博士,教授,主要研究方向为光电探测;张根甫(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为光电探测。

电压增大,耗尽层上的分压就会下降,APD输出一个瞬时电流脉冲后雪崩停止,每个微元产生的电流被累加起来,形成SiPM的输出电流^[5]。在硅光电倍增管的动态范围内,它输出电流的大小和发生雪崩的微元数成正比。每个微元恢复初始状态的时间(淬灭时间)非常短,通常为纳秒级,保证了SiPM具有极短的响应时间。

光子探测率及增益是光电探测器两个重要的指标参数。在室温下,感光面积为 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 的SiPM光子探测效率(PDE)曲线和增益曲线如图1和图2所示。从图1中可以看出,其探测的峰值波长为620 nm;从图2中可以看出,其增益在106数量级,并与偏置电压成正比例关系。

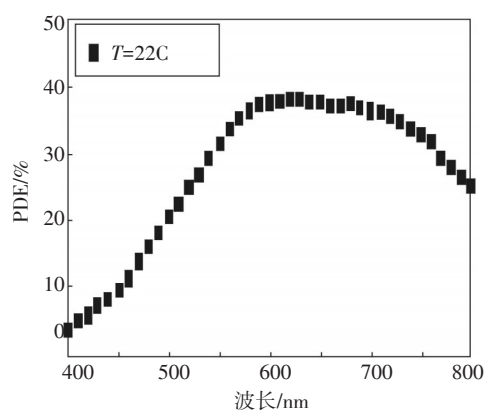


图1 SiPM光子探测效率曲线

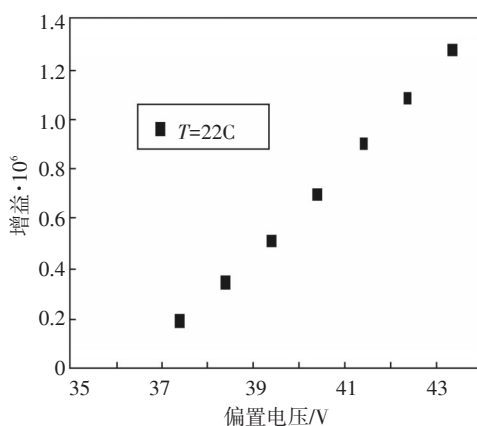


图2 SiPM增益曲线

2 SiPM适配电路设计

2.1 电源电路设计与仿真

电源电路^[6]需要用到+5 V、-5 V以及+30 V的电

源。+30 V为SiPM提供偏置电压,使SiPM工作在盖革模式下的最低电压为28 V,文中采用典型值30 V。设计时采用常用的+5 V电源来分别得到-5 V和+30 V的电压。

2.1.1 -5 V电源设计

在+5 V电源的基础上,采用MAX1721芯片对其进行设计。MAX1721是COMS单片电荷泵反相器,工作频率125 kHz,输入电压范围为+1.5~+5.5 V,输出连续电流为25 mA。其典型应用是将+5 V逻辑电源转换成-5 V模拟电源输出。

在设计过程中,为了达到最佳性能,使用低等效串联电阻(ESR)的电容器。增加飞跨电容 $C1$ 的值可以降低输出电阻,增加输出电容 $C2$ 的值可以降低 $C2$ 的ESR,同时降低输出电阻。旁路输入电阻用来减少电路的交流阻抗和开关噪声对MAX1721的影响,一般输入旁路电容 $C3$ 的值与 $C1$ 的值相等,在设计中 $C1$ 、 $C2$ 、 $C3$ 的值均为 $1 \mu\text{F}$ 。设计电路如图3所示。

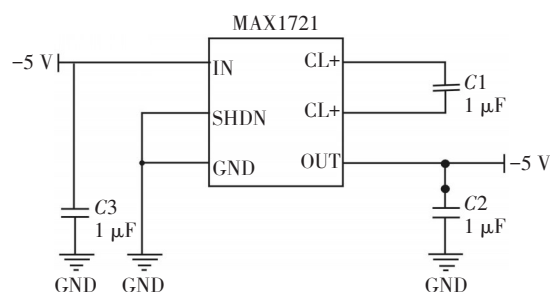


图3 +5 V转换为-5 V电源原理图

2.1.2 +30 V电源设计

SiPM的工作偏置电压为30 V,要求电源纹波峰峰值少于20 mV,电源电流小于30 mA。设计采用恒流源电路,通过在恒流源电流输出端接入电阻,转换成电压,调节电阻达到设计电压要求。

采用以双极型晶体管的基极-发射极电压为参考的恒流源,电阻 $R2$ 上的压降等于晶体管 $Q2$ 的基极-发射极电压,该值恒定,因而 $R2$ 中电流也恒定,形成恒流源。如图4所示。该电流源电路对电源电压波动的灵敏度很低,电源电压的波动对输出电流的影响很小。

实际设计时,对该恒流源电路进行了改进, $Q1$ 采用了绝缘栅型场效应管BSP149,根据数据手册

$U_{DS(ub)}$ 为 $-2 \sim -1$ V; U_{DS} 取典型值 $+25$ V; 因为, 电路输出要求达到 $+30$ V, 故在 $Q1$ 漏极端的电压 V_{CC} 要高于 $+55$ V; 设计中, 在 $Q1$ 漏端加 $+60$ V偏压。

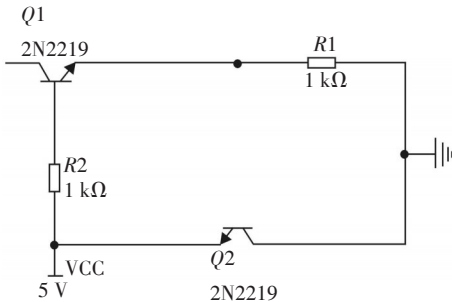


图4 恒流源电路

对电路中电流量化分析计算如下: 其中 $Q1$ 栅极电流为0, $Q2$ 基极电流为从 $R2$ 的反馈电流, 该反馈电流很小, 对 $R3$ 和 $R2$ 的电流进行测量, $I_3 = 614 \mu A$, $I_2 = 611 \mu A$, 只有 $3 \mu A$ 电流流入基极, 可以忽略; 因此, 可近似认为 $I_3 = I_2 = U_{be}/R_2$, 输出电压为 $U_3 = R_3 \times I_3 + U_{be} + UR_4$ 。

通过选择合适大小的电阻和变阻器, 可以进行微调得到所要求的电压 $+30.055$ V, 波动不超过 0.1 V; 恒定电流约 $611 \mu A$ 。

用Multisim仿真结果如图5所示。

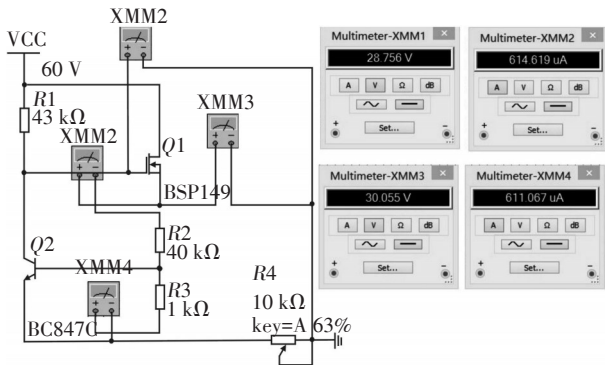


图5 电源电路仿真

上述电路中用到 $+60$ V电压, 设计中采用 $+5$ V电源实现 $+60$ V偏压, 电路设计如图6所示。

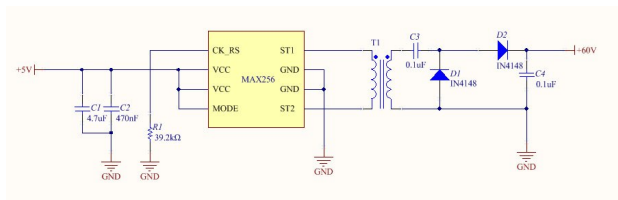


图6 +60 V转换原理图

用 $+5$ V电源驱动芯片MAX256产生频率为 400 kHz, 幅值为 10 V的矩形波, 经小型变压器, 线圈比为 $1:12$, 放大至 120 V, 然后经整流、滤波, 得到纹波较小的 $+60$ V电源电压。

2.2 前置跨阻放大电路设计与仿真

为了把微弱的光电流信号转换成电压信号, 同时获得最佳信噪比, 放大电路选用跨阻接法^[7]。跨阻放大器的前置放大电路如图7所示, 设计中采用TI公司OPA656作为跨阻放大电路的运算放大器, 为了获得最佳性能, 选择反相输入。当采用反向输入时, 由于同相端输入的偏置电流极低, 所以该端没有连接电阻而直接接地。正、负电源端采用双电容滤波, 通常选择一个 $6.8 \mu F$ 的极性电解电容, 用来滤除低频成份; 一个 $0.1 \mu F$ 无极性小电容滤除高频成份。信号输出时采用同轴电缆屏蔽线连接到采集系统, 屏蔽线的特性阻抗为 50Ω ; 考虑到阻抗匹配因素, 输出端也接 50Ω 电阻。

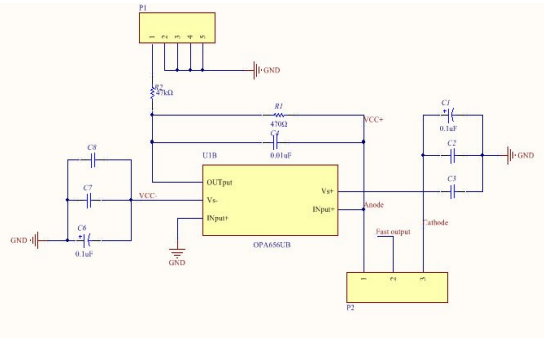


图7 电路连接图

实际测试中, 采用激光器作为传感器的瞬态加热源, 激光器脉冲上升时间为 $76 \mu s$ 。设计电路时, 假设要能无失真放大 $50 \mu s$ 的信号, 则电路通频带至少要达到 20 kHz的两倍; 设计时将电路带宽设定到 100 kHz, 这样能足够响应实际测试的输入信号, 保证无失真放大; 按照数据手册, OPA656UB单位增益带宽积为 230 MHz, 故电路放大倍数可选择在 2300 倍以下。

为保证运放电路的稳定性, 避免自激振荡, 需要在反馈电阻两端并联反馈电容。为了获得最好二阶Butterworth频率响应, 需根据式(1), 在反馈电阻不同时, 选择不同大小的反馈电容

$$1/(2\pi R_F C_F) = \sqrt{(GBP)/(4\pi R_F C_D)} \quad (1)$$

其中, C_F 为反馈电容; C_D 为SiPM等效电容 30 pf; R_F 为

反馈电阻;GBP为增益带宽积。

用Multisim对电路进行仿真分析如图8所示。

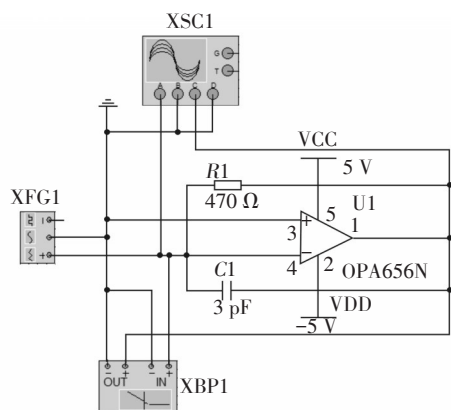


图8 跨阻放大电路仿真电路图

实验中, R_f 为 470Ω , 放大倍数在 1 930 倍左右, 代入式(1), 得到反馈电容 2.96 pF , 选用 3 pF 陶瓷电容。

用信号发生器代替 SiPM 作为输入, 采用矩形波信号作为输入, 幅值 $1 \mu\text{V}$, 频率 50 kHz ; 仿真结果如图9所示。

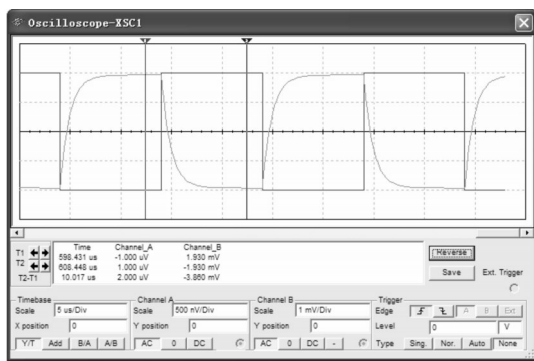


图9 放大电路输出信号

从图9可以看出, 放大信号基本无失真, 放大倍数 1 930 倍。图10所示为放大电路波特图。

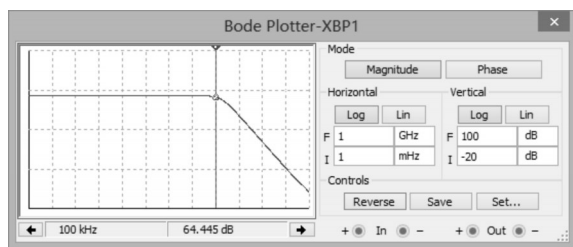


图10 放大电路波特图

从波特图可以看出, 其通频带达到了 100 kHz , 设计满足实际测试要求, 电路设计理论可行。

3 电路制板与测试

能否达到为了检测所设计的电路要求, 绘制 PCB 板并做出实物进行测试。电源电路板如图11所示。放大电路如图12所示。

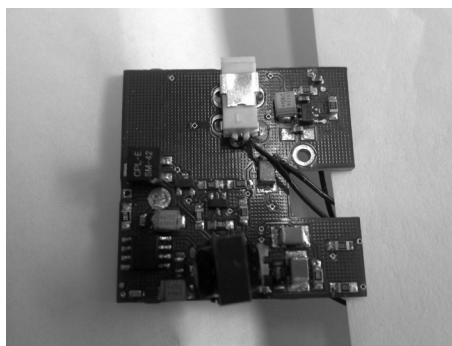


图11 电源电路板

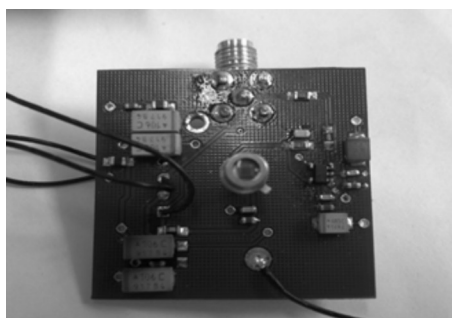


图12 放大电路板

将 SiPM 与放大电路、电源电路连接, 用信号发生器驱动白光 LED, 输入信号频率为 100 kHz 的矩形波, SiPM 的输出如图13所示。连接适配电路后的 SiPM 有较好的输出响应, 输出幅值达到伏级, 满足设计要求。

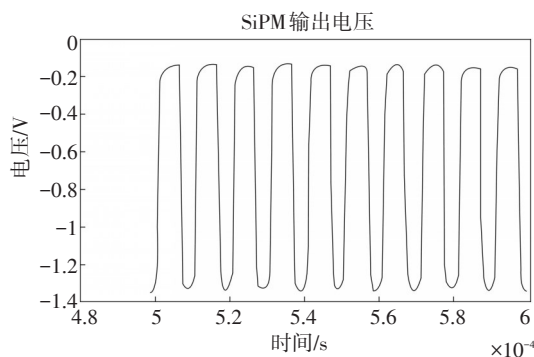


图13 电路测试

4 结论

研究和设计了硅光电倍增管(SiPM)的电源电路和跨阻放大电路,并进行了仿真和测试。+30 V电源电路为SiPM提供有效的偏置电压,使得SiPM工作在盖革模式下,跨阻放大电路将SiPM输出的电流信号转换为电压信号,经过测试,SiPM适配电路有较好的输出响应,满足设计要求。

参考文献

- [1] Renker D. New trends on photodetectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2007, 571:1-6.
 [2] 黄敏敏,朱兴龙.硅光电探测器的发展与应用[J].机械

工程与自动化,2011(6):203-205.

- [3] 赵文锦.光电倍增管的技术发展状态[J].光电子技术,2011,31(3):145-148.
 [4] Jelena Ninkovic. Recent development in silicon photomultipliers[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2007, 580:1020-1022.
 [5] Musienko Yuri. Advances in multipixel Geiger-mode avalanche photodiodes[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2009, 598:213-216.
 [6] 张智河,李延玲.双极输出光电倍增管高压电源设计与实验研究[J].中国医疗设备,2013,28(3):31-33.
 [7] 唐立田,张海英,黄清华,等.一种高增益低噪声低功耗跨阻放大器设计与实现[J].电子器件,2009,32(3):566-569.

(上接第26页)

表2 重建图像平均梯度对比

方法		BTV算法	文中算法
平均	Flower1	7.355 4	8.758 9
梯度	Flower2	5.830 9	6.861 0

4 结束语

利用灰度共生矩阵提取图像局部纹理特征,并建立了图像纹理特征与正则化参数之间的关系,使正则化参数随图像的局部纹理特征自适应地调整,以确保正则化参数取值的合理性。通过实验对比了根据不同特征参数建立的正则化参数模型的重建效果。实验结果显示,文中方法较BTV方法能更有效地重建图像的边缘和纹理区域。

参考文献

- [1] 张良培,沈焕锋,张洪艳,等.图像超分辨重建[M].北京:科学出版社,2012:3-47.

- [2] Park C S, Park K M, Kang G M. Super-resolution image reconstruction: a technical overview[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2003, 20(3): 21-36.
 [3] 江静,张雪松.图像超分辨率重建算法综述[J].红外技术,2012,34(1):24-30.
 [4] Farsiu S, Robinson M D. Fast and robust multi-frame super resolution[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(10): 1327-1344.
 [5] 刘丽,匡纲要.图像纹理特征提取方法综述[J].中国图像图形学报,2009,14(4):622-635.
 [6] Robeert M Haraljk,Shanmugam K, Dinstein Hak. Textural features for image classification[J]. IEEE Transactions on Systems, Man And Cybernetics, 1973, 3(6):610-621.
 [7] 高程程,惠晓威.基于灰度共生矩阵的纹理特征提取[J].计算机系统应用,2010,19(6):195-198.
 [8] 贾永红.计算机图像处理与分析[M].武汉:武汉大学出版社,2001:231-235.
 [9] Lucchese L, Cortelazzo G M. A noise-robust frequency domain technique for estimating planar roto-translations[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2000, 48(6): 1769-1786.

(上接第45页)

- [3] 许兆林,赵育良,张国栋.新型航空相机自动调焦系统的设计[J].电光与控制,2011,18(4).
 [4] 马岩,胡君.CCD成像单元仿真系统的实时显示方法研究[J].液晶与显示,2008,23(3):334-339.
 [5] WEI Bao-hua, LU Hai-xing, SHEN Yu-hao. A real-time on-line data acquisition system based on PC104[J]. Shijia-

zhuang Machine Engineering Institute: 6550-6552.

- [6] 房纪涛,杨慕升,张宇.基于PCI04总线的数据采集仪及数据分析系统[J].测控技术,2006,25(10).
 [7] 胡安平.PC104在工程中的应用[J].电子产品世界,2002(15).
 [8] Mao Y T. Error Gorithm and Accuracy Analysis[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982.