

微电流信号的高带宽调理技术及应用

严 明, 李 刚, 郭明安, 杨少华, 李斌康

(西北核技术研究所强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 陕西西安 710024)

摘 要: 为实现对电流型快响应探测器微弱信号的高速探测和处理, 给出了一种微电流信号的高带宽调理方法. 分析了几种 PIN 光电探测器输出信号的频带和幅度特征; 以脉宽 50ns、电流范围 20nA ~ 0.1mA 的微电流信号为设计目标, 给出了微电流信号的调理方法和设计分析, 设计并实现了针对该目标信号的高带宽调理电路; 进行了性能对比测试实验, 通过与光电倍增管 PMT9215B 进行输出响应对比, 结果表明该调理电路对脉宽 40ns 的脉冲信号响应良好, 响应波形的上升沿和半高宽约 10ns, 调理电路的信号带宽约 35MHz, 信号调理的带宽和幅度达到了量化采样要求, 验证了该方法的正确性和可行性; 应用该调理电路进行了 4×32 PIN 二维阵列光电探测系统的设计实现, 系统动态范围约 56dB, 时间响应特性良好.

关键词: 微电流信号, PIN 光电探测器, 信号调理, 高带宽, 高增益

中图分类号: TN911.71 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)09-2292-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.033

High Bandwidth Signal Modulation Technique for Micro Current Signal

YAN Ming, LI Gang, GUO Ming-an, YANG Shao-hua, LI Bin-kang

(State Key Lab of Intense Pulse Radiation, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China)

Abstract: A high bandwidth signal modulation method is proposed for fast response detector signal acquisition. Several PIN photoelectron detectors are analyzed as an example of fast response detector. According to the analysis results, a signal modulation framework is given, and an experimental circuit is designed and implemented according to the modulation method. A typical signal which has 50ns pulse width and 20nA ~ 0.1mA current is tested using this circuit. PMT9215B is tested under the same condition as a comparison. Experimental result shows that the designed circuit has a very good response to a 40ns width signal, and the impulse response has a lead edge about 10ns. The signal bandwidth of the designed circuit is about 35MHz. A 2-dimensional array detector with 4×32 PIN diodes is designed using the proposed technique. The system has a dynamical range of 56dB, and good response to fast light signal which proves the correctness and practice of the signal modulation method.

Key words: micro current signal; PIN photo-electron detector; signal modulation; high bandwidth; high gain

1 引言

电流型快响应探测器通常用于射线强度测量^[1]、射线粒子探测^[2]或者辐射场高速成像. 用于射线强度测量的探测器通常体积较大, 直径约在数厘米以上, 输出电流信号强^[3,4], 通过高速示波器进行连续采样记录既可测量并换算出辐射场束流强度; 用于粒子探测的探测器通常采用电流计数的方法^[5,6], 即通过对单个探测器输出电流信号进行高频计数测量换算得到射线粒子个数, 此类探测器面积适中, 约在厘米量级, 灵敏度较高, 输出电流信号在 mA 量级, 便于直接采样量化. 用于

辐射场高速成像的光电探测器通常光敏面很小^[7], 直径通常在毫米量级, 此类器件的灵敏度很高, 时间响应特性良好. 其输出的微弱电流信号下限通常在纳安量级, 难以直接进行采样量化; 加之器件的响应速度快, 输出信号的频带较宽, 可达到纳秒量级甚至更高, 因此利用此类探测器进行探测系统设计, 需要对探测器输出的微弱电流信号进行高倍放大、滤波等信号调理. 如何实现输出信号放大倍数和信号有效带宽的最大化, 以达到对微弱信号正常采样量化的设计目标, 成为电流型快响应探测器实际应用中的一个难题.

本文以 PIN 光电探测器为例, 分析了输出电流信号

的幅度、时间响应、噪声等特征,提出了一种高带宽信号调理方法,并进行信号调理参考电路的设计与实现,通过与光电倍增管的性能对比测试实验,验证了该信号调理电路的正确性和可行性.基于所提方法,设计实现了二维阵列探测系统,系统采用 4×32 PIN 光电探测器,通过系统性能标定和时间响应测试,表明该系统动态范围达到 56dB,时间响应良好.

2 信号特征分析

PIN 光电探测器具有光谱响应宽、灵敏度高、动态范围大、响应速度快等特点,因此被广泛应用于辐射探测与诊断^[8].PIN 光电探测器的输出信号特征主要包括光暗电流、结电容、响应时间等方面,信号特征取决于探测器掺杂工艺、探测器面积、偏置电压幅度等因素.表 1 给出了几种光电探测器的特征参数对比.

表 1 几种光电探测器的主要特征参数对比

Type	Area (mm ²)	RisingTime (ns)	Capactivity (pF@10V)	DarkCurrent (nA@20V)
FDS010	0.8	1@20V	2	2.5
FDS100	13	10@20V	40	20
PIN-3CD	3.2	10@30V	26	2.15

由表 1 可见,快响应光电探测器的信号上升时间在纳秒量级,其探测下限的输出电流则在纳安量级.在制造工艺确定的前提下,探测器面积越大,输出信号的上升时间越长,能量响应越大,结电容和暗电流也越大.对于信号调制而言,主要关心的特征参数则是信号的有效频带、探测器的能量响应即输出信号的电流大小、探测器结电容和暗电流等.探测器的能量响应决定了在特定辐照条件下,探测器输出电流信号的大小,因此对信号调理电路提出了信号放大能力的要求;信号的有效频带决定了信号调理电路的带宽需求;结电容很大程度上制约调理电路的放大能力与信号带宽;暗电流则影响信号调理电路的工作下限,即探测器的探测下限.

3 高带宽信号调制方法

由于快响应探测器输出信号具有前述的信号带宽大、下限信号微弱、动态范围大等特性,其信号调理必须具有高信号通带、高的增益倍数、高信噪比等能力.综合前述分析,不妨将影响信号调理的探测应用具体要求及探测器的特征参数概括如下:探测事件的周期 T ,单位为 ns;信号上升(下降)时间 t ,单位为 ns;光电探测器输出电流下限 A_{MIN} ,单位 nA;上限 A_{MAX} ,单位 μA ;结电容 C_{D} ,单位 pF;暗电流为 A_{D} ,单位 nA;信号调理电路的输出电压范围 V_{MIN} 到 V_{MAX} ,单位 mV.下面将给出一种高

带宽信号调理的具体方法及过程分析.

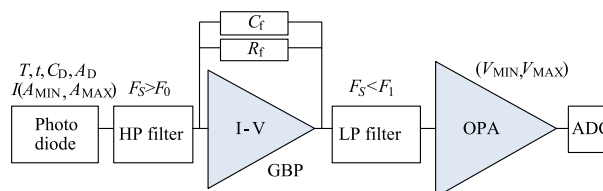


图1 快响应探测器的信号调理过程

如图 1 所示,探测器输出信号的调理大致分为三个部分,即跨导放大电路,实现 I-V 转换;电压放大电路,实现电压放大与输出调理;滤波电路,过滤特定频带的噪声,提高信噪比.

3.1 确定信号调理目标

在确定探测器特征参数之后,进行信号调理电路的设计首先需要根据特征参数,确定调理电路的工作频带和输入信号的探测范围.探测事件周期为 T (ns),则调理电路的信号通带要包含 $1/T$ (GHz).

探测器输出电流信号的上限(A_{MAX} , A_{MIN})可根据器件参数或具体应用条件进行确定,信号调理输出的电压范围(V_{MIN} , V_{MAX})则受限于采样量化电路的工作电压 V_{MAX} 和精度 V_{MIN} .此时若 $V_{\text{MIN}}/A_{\text{MIN}}$ 与 $V_{\text{MAX}}/A_{\text{MAX}}$ 不一致,采用线性调理电路难以实现探测器信号强度的完全覆盖,需要根据具体应用确定探测器信号强度的有效范围,使信号强度上下限和电压范围满足调理一致性要求.

3.2 I-V 转换电路设计

I-V 转换电路的设计是高带宽信号调理的关键,在 I-V 转换过程中,一般选用 FET 输入型运算放大器,实现电流到电压的高增益倍数转换,此类运算放大器具有偏置电流小,输入电容小,失调电压和温漂系数低,高开环增益等特点.同时保持信道的良好频率特性,是后续信号调理的基础.若 I-V 转换的增益倍数太小,后续电压放大电路需要进行高增益放大,难以保持较高的截止频率.

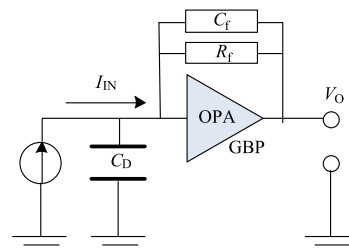


图2 跨导放大电路实现I-V转换

探测器的输出可等效为一个微电流源和一个寄生电容的并联,对该电流信号进行 I-V 转换,可采用跨导放大电路.跨导放大电路实现 I-V 转换的电路结构如图 2 所示.图 2 所示的跨导放大电路在确定探测器和跨导

放大器之后,需要确定反馈电阻和反馈电容的参数.为实现该放大电路的最大平坦响应频率,须满足如下等式:

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

式中 R_F 为跨导放大器的反馈电阻 (Ω), C_F 则为跨导放大器反馈电容 (F), GBP 为跨导放大器的增益带宽积 (Hz), C_D 则为 PIN 光电二极管的寄生电容 (F). 反馈电阻阻值可由输入电流 I_{IN} 的动态范围及输出电压范围 V_O 确定,反馈电容参数则可由上式计算确定. 满足上式的跨导放大电路,其信号截止频率满足如下等式:

$$f_{-3dB} = \sqrt{GBP/2\pi R_F C_D}$$

3.3 输出放大及滤波设计

PIN 探测器输出的微弱电流信号经过跨导放大电路后转换为小电压信号,为便于采样电路进行高精度的采样量化,需要对小电压信号进行适度放大. 由于探测器信号的主要能量分布在较高的频带,因此设计时输出放大电路的放大倍数与其增益带宽积必须满足信号频带的要求. 同时考虑后端量化采样电路测量精度的要求,通常采用共模抑制比较高的差分放大电路,并在信号传输路径上设置适当的滤波电路,提高调理电路的信噪比.

4 调理电路设计实现与分析

为验证本文所提信号调理方法的正确性和可行性,设计实现了信号调理电路,并进行了电路性能测试,测试系统结构如图 3 所示:

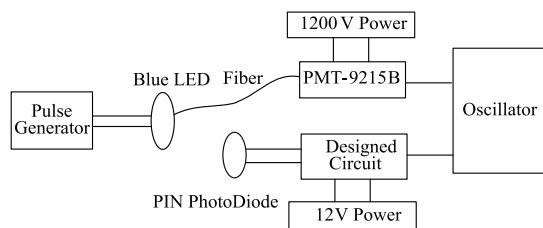


图3 信号调理电路测试系统结构

如图 3 所示,为了测试该信号调理电路的性能,采用脉冲发生器作为信号源输出脉冲信号驱动蓝色 LED 作为激励光源, PIN 探测器对 LED 进行光收集,信号调理电路采用 12V 直流线性电源作为电源输入,调理电路输出接入示波器通道 1 进行信号波形显示. 作为对比,引入 PMT-9215B 光电倍增管作为参考,采用 1200V 高压作为电源输入. 测试过程采用光纤将 LED 发出的光信号输入给光电倍增管,输出的监测信号接入示波器通道 2. 性能测试与对比结果如图 4 所示:

图 4 中给出了脉宽 40ns, 前后沿 20ns 的单脉冲信号激励 LED 时的响应波形. 考虑 LED 发光二极管对输

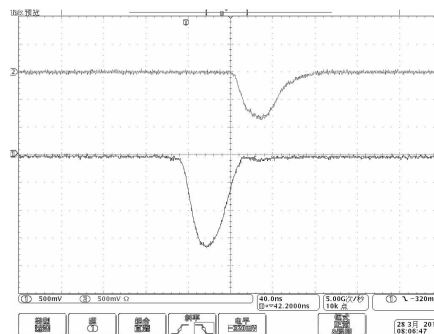
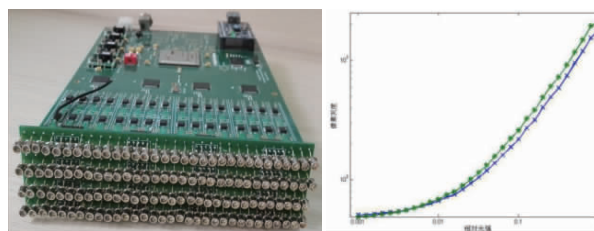


图4 脉冲信号响应波形对比

入电压的响应在 10ns 左右,因此设置脉冲信号的前后沿为 20ns. 可见调理电路的波形保持良好,信号幅度较大,且后沿电容过放现象在频率较低时得到一定的抑制. PMT9215B 的通道 2 信号较调理电路通道 1 信号滞后约 50ns,这主要是由 PMT 内部自身的渡越时间(约 36ns)、光纤传输光信号的延时以及 PMT 输出电信号的传输延时,实验测试时光纤长度约 3m、PMT 的电信号传输线较调理电路信号线长 0.5m.

5 应用系统

基于前述信号调理方法和电路,设计实现了一种二维阵列探测系统,该系统采用 $4 * 32$ PIN 光电二极管作为探测器,4 块信号处理电路板分别对每一列 32 路探测器信号进行高带宽调理及实时处理. 系统实物照片及动态范围标定曲线如图 5 所示:



(a) 二维阵列探测系统

(b) 系统动态范围曲线

图5 二维阵列高速光电探测系统及动态范围曲线

该探测系统主要包括前端 PIN 光电二极管阵列,高带宽信号调理电路,高速并行 ADC 电路,高速信号实时处理缓存电路以及电源和 USB 数据采集端口等. ADC 采样量化频率 50MHz,信号实时处理电路基于高性能 FPGA 实现对 32 路采样信号的实时解串和缓存. 通过采用衰减片进行系统动态范围标定,曲线如图 5 右图所示,其中横坐标表示利用衰减片后光源相对光强,以光电二极管临近饱和时的光强为基准,取对数刻度;纵坐标表示光电二极管像素输出的信号响应数值,取对数刻度,图中给出了随机取的两个光电二极管像素数据. 由图中曲线数据可知,系统的动态范围约 56dB.

6 结论

本文首先分析了 PIN 光电探测器输出信号特性,结合探测需求,提出了一种高带宽信号调理方法.该方法对探测器性能、输出信号特征及探测目标进行参量化建模,并给出了信号调理带宽与电路增益、探测器寄生电容之间的关系.设计了针对 50ns 脉宽信号的调理电路,所实现的信号调理电路基本保持了激励信号的波形,调理后输出信号的时间响应特性基本达到设计目标,信号幅度达到采样量化的要求,验证了所提高带宽信号调理方法的正确性和可行性.基于本文所给出的信号调理方法,设计实现了一个二维阵列光电探测系统.系统采样频率 50MHz,时间响应特性良好,动态范围约 56dB,验证了本文所提信号调理方法的正确性和可实现性.本文方法可广泛适用于对带宽有较高要求的微弱电流信号调理应用.

参考文献

- [1] 欧阳晓平,等.高灵敏大面积硅 PIN 探测器阵列[J].核电子学与探测技术,2000,20(5):329-331.
Ouyang Xiaoping, et al. High-sensitivity large-area Si PIN detectors array[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2000, 20(5): 329-331. (in Chinese)
- [2] 品敏.脉冲射线束探测技术[J].核电子学与探测技术,1984,6(4):321-328.
LÜ Min. Techniques for pulse radiation detection[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1984, 6(4): 321-328. (in Chinese)
- [3] 欧阳晓平,李真富,等.电流型大面积 PIN 探测器[J].物理学报,2002,51(7):1502-1505.
Ouyang Xiao-Ping, Li Zhen-Fu, et al. Development of large area silicon semiconductor detectors for use in the current mode[J]. Acta Physica Sinica, 2002, 51(7): 1502-1505. (in Chinese)
- [4] 胡孟春,叶文英,等.φ80mm×800μm 硅 PIN 新型阵列探测器[J].信息与电子工程,2005,3(2):141-144.
HU Meng-chun, YE Weng-ying, et al. φ80mm×800μm silicon PIN new type array detector[J]. Information and Electronic Engineering, 2005, 3(2): 141-144. (in Chinese)
- [5] 田耕,欧阳小平,刘金良,等.基于 Si-PIN 探测器的电流型计数式 α 粒子测量[J].原子能科学技术,2015,49(9):1678-1684.
TIAN Geng, OUYANG Xiao-ping, LIU Jin-liang, et al. Current-mode-counting measurement of α-particle with Si-PIN detector[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(9): 1678-1684. (in Chinese)
- [6] 宋朝晖,阮锡超,等.电流型探测器单粒子灵敏度标定的原理及应用[J].强激光与粒子束,2005,17(3):453-457.
SONG Zhao-hui, RUAN Xi-chao, et al. Principle and application of sensitivity calibration by single particle for current detector[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(3): 453-457. (in Chinese)
- [7] 黎森,肖沙里,等.CdZnTe 像素阵列探测器成像评价模型及实验[J].强激光与粒子束,2011,23(12):3405-3411.
LI Miao, XIAO Shali, et al. Carrier-trapping-based imaging evaluation model and experiment of pixelated CdZnTe detector[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(12): 3405-3411. (in Chinese)
- [8] 彭宇飞,马冰,等.用于高能 X 光测量的 Si-PIN 阵列探测器[J].强激光与粒子束,2010,22(3):651-654.
Peng Yufei, Ma Bing, et al. Si PIN detectors array for high energy X-ray measurement[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(3): 651-654. (in Chinese)

作者简介



严 明 男,1981 年 9 月出生,湖南华容人.副研究员.2003 年、2006 年和 2011 年于国防科技大学计算机学院分别获得工学学士、硕士和博士学位.主要从事探测器信号处理、高速科学成像、计算成像及高性能图像传感器设计等方面的研究工作.

E-mail: yanming@nint.ac.cn



李 刚 男,1984 年 9 月出生,河南南阳人,工程师.2007 年、2010 年分别于中国科技大学和西北核技术研究所获得理学学士和工学硕士学位.主要从事高速科学成像、辐射图像诊断等方面研究工作.

E-mail: ligang@nint.ac.cn