

AlGa_N 紫外探测器读出电路研究

吉晶晶, 刘万金, 胡小燕
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要:设计了一款 AlGa_N 320 × 256 规模紫外探测器专用读出电路。该款读出电路属于数模混合电路, 其中模拟信号处理电路包含积分放大电路、采样保持电路、缓冲器及输出驱动电路, 数字逻辑控制电路实现了多种用户可配置的功能。给出了理论分析和电路模拟仿真的结果数据及波形。采用标准 0.35 μm 2P3M CMOS 工艺设计了电路版图, 最终版图面积为 11.8 mm × 11.1 mm, 并对流片后的读出电路进行了主要参数的测试和数据分析, 验证了该读出电路的功能。

关键词: AlGa_N; 紫外探测器; 读出电路; ROIC; CTIA

中图分类号: TN **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2013.09.22

Study of AlGa_N ultraviolet detector ROIC

Ji Jing-jing, Liu Wan-jin, Hu Xiao-yan
(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: A novel reading out circuit (ROIC) of AlGa_N ultraviolet detector is proposed. The ROIC consists of analog circuit and digital circuit. The analog circuit includes integrating amplifier, sampling-hold circuit, buffers and output drivers. The digital circuit gives the ROIC extra functions. In this paper, the theoretical analysis and simulation results of the circuit are given. A chip is designed by using the 0.35 μm 2P3M CMOS processes. Dimension of the chip is 11.8 mm × 11.1 mm. The measurement and analysis of the main parameters are implemented successfully and the ROIC's function is verified.

Key words: AlGa_N; ultraviolet detector; reading out circuit; ROIC; CTIA

1 引言

紫外探测技术是正在迅速发展中的一种新型光电探测技术。其中 AlGa_N 是目前研究最广、性能最好的半导体紫外探测器材料, 利用 AlGa_N 研制高性能的紫外探测器, 在军用和民用方面都有很高的应用价值^[1]。AlGa_N 紫外探测器的研制成功离不开读出电路的设计和研制, 利用读出电路可以对探测器产生的光电流进行积分, 然后进行前置放大、采样保持、缓冲, 最后进行多路传输。

所以读出电路的性能直接制约着 AlGa_N 紫外探测器的性能, 是否能研制出高性能的读出电路成为制约 AlGa_N 紫外探测器性能高低的一个因素。本文将介绍在研制 AlGa_N 320 × 256 规模紫外探测

器专用读出电路方面所做的工作。

2 电路设计

在紫外技术应用中, 目标的辐射多数都非常微弱, 探测器的光生电流 (通常为 nA 甚至 pA 量级) 都非常小, 加之各种噪声的干扰, 目标信号很容易掩埋在各种噪声之中, 故必须对输出信号进行某些适宜的处理 (如积分、放大和降噪等) 才能从噪声中提取出目标信号, 然后按照一定的顺序把信号输出到后续的处理电路, 这就是读出电路要完成的主要使命。由于紫外探测器应用的特殊性, 就对读出电路的在

作者简介: 吉晶晶 (1980 -), 女, 硕士, 主要从事读出电路设计工作。E-mail: jinjin1113@126.com

收稿日期: 2013-03-12; 修订日期: 2013-04-03

噪声、动态范围等方面的设计提出了特别要求。

2.1 模拟电路设计

根据读出电路需要完成的工作以及 AlGaN 紫外探测器性能特点的要求,这里设计的信号处理通道以及相关信号时序图如图 1 所示。

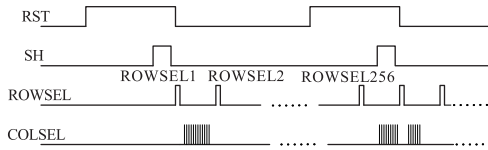


图 1 信号处理时序图

整个电路采用快照 (snapshot) 积分模式,在信号 RST 高电平期间,阵列中所有探测单元对响应的光电流进行积分;在积分过程的后期,像元内的采样保持信号起效,信号 SH 高电平,积分得到的电荷将从积分电容中被转移并保持于采样保持电容中;采样结束后,SH 低电平,RST 低电平,完成对输入级的复位。随后在第 n 行行选信号 ROWSEL n 起效期间,保持在输入级采样保持电容中的电荷将被转移并保持至列采样保持电容中,接着列选通信号 COLSEL m 依次从第一列到最后列置高电平,将保持在列采样保持电容中的信号顺序读出。这样,读出电路对于信号的处理过程完成。为了完成以上的信号处理功能,整个 ROIC 的模拟通道设计了积分放大电路、采样保持电路、缓冲器及输出驱动电路,以下就对各个部分进行介绍。

2.1.1 输入级设计

输入级电路是读出电路与探测器阵列的接口,可以说是整个输出模块设计的关键部分^[2],在设计 ROIC 中它需要完成光电流的积分放大及采样保持功能,根据应用的要求,综合考虑输入级需要达到的技术要求如下:

首先,输入级要为探测器提供稳定的偏压,这样可以有效地减小探测器的反向漏电流和噪声,减小单元间由于偏压不稳定而产生的噪声;其次,输入级的输入阻抗要与与探测器相匹配以提高输入级的注入效率;接着,要在输入级面积允许的条件下,尽量增大其电荷处理能力,这样可增加对光能量的处理范围;最后,由于本项目中紫外探测器所生成的光电流非常小(只有 pA 级),这样就对读出电路的噪声提出了更加严格的要求,希望读出电路本身的噪声尽量的小,这样对于输入级的选择就需要加倍的小心。

读出电路常用的输入级有直接注入结构(DI)、缓冲直接注入结构(BDI)、公共缓冲直接注入结构(SBDI)、电容跨阻抗放大器结构(CTIA)等,这些结

构各有优缺点,具体选用哪种结构需要由应用环境决定。

DI 输入级结构简单,对于输入级面积的要求也比较低,而且在一定的电流注入范围内,输出电压的线性度良好。但是由于不同的像元注入管的阈值电压之间由于工艺等原因存在偏差,所以导致加载在探测元上的偏压也存在偏差,这样就会在焦平面阵列的输出信号中引入空间噪声。另外其注入效率很低,在本设计中,紫外探测器的光电流只有 pA 级,这样就对输入级的噪声和注入效率非常敏感,所以 DI 结构并不是理想选择。

BDI 是 DI 的改进结构,由于在输入端引入了负反馈放大器使得 BDI 结构注入效率大大提高。另外,由于运放的“虚短”特性,使得 BDI 结构提供的偏压比 DI 结构更稳定,而且还能够避免由于注入管阈值电压偏差引入的噪声。但是由于增加了运放,使得 BDI 结构的功耗增加,并且输入级需要的面积也相应增大。

SBDI 通过公用放大器的一部分,对 BDI 进行了改进,使功耗和面积都降低了将近 50%,而且保留 BDI 的其他优点。但因为公用电路需要通过导线与每个单元内部电路相连,因此当面阵规模较大时,会由于导线长度不同以及存在的寄生效应而影响信号的均匀性和一致性。

CTIA 结构直接采用运放作为输入级,因此在稳定性和注入效率方面 CTIA 结构表现出比 BDI 结构更好的性能。同时,CTIA 结构在从低到高的背景范围内都具有非常低的噪声,输出信号的线性度良好。在功耗和面积允许的情况下,CTIA 结构是输入级的良好选择。

综上比较的结果,结合项目的技术指标要求,并借鉴国外文献^[3-5]报道的有关紫外探测器读出电路采用的输入级结构,本项目采用基于 Cascode 的改进型 CTIA 结构,它弥补了传统的 CTIA 结构在面积和功耗方面的欠缺。传统的 CTIA 结构基于两极运算放大器(如图 2(a)所示)来实现,并且通常使用几百 fF 的补偿电容,来满足稳定性的要求。这样要在小面积的输入级内放置复杂的电路结构和几百 fF 的补偿电容并且实现 snapshot 的积分模式,是十分困难的,同时 CTIA 结构越复杂,它所消耗的功耗也就越大。而改进型的 CTIA 结构采用 Cascode 单级运放(如图 2(b)所示)来代替传统结构中的双级运放,大大简化了输入级结构,同时还避免了使用补偿电容。

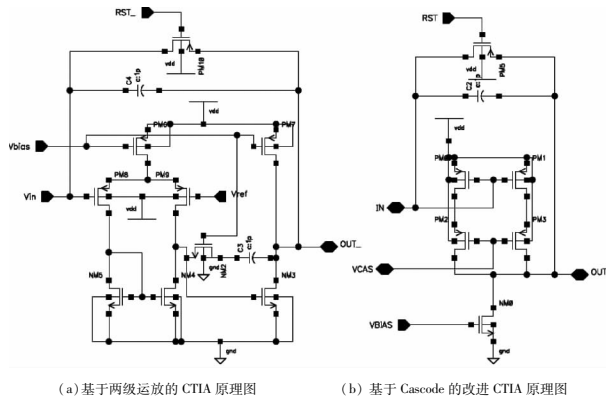


图2 两种 CTIA 结构的对比

图3为采用改进型 CTIA 结构后完整的输入级结构,其中 PM0 ~ PM3 构成共源共栅放大器,NM0 为尾电流源,NM1、NM2 构成源随器。C0 为积分电容,C1 可选积分电容,C3 为输入级采样保持电容。通过 C0 和 C1 电容的不同组合可以实现电路的不同增益,当目标信号较弱时,默认使用小的积分电容 C0,这时电路采用大增益,当目标信号较强时,可以选择使用较大的电容 C0 + C1,这时电路采用的为小增益。IN 为探测器光电流输入端,RST 信号控制输入级电路的积分和复位,SH 为采样控制信号,RSW 为行选通信号,OUT 为输入级信号输出端。

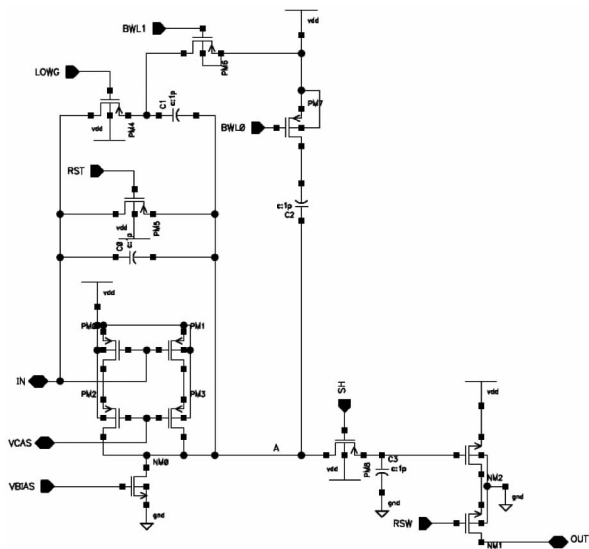


图3 基于 Cascode 的快照式 CTIA 完整电路图

在充分考虑版图尺寸、输入级增益、线性度、电荷处理能力等一系列问题的基础上,本文采用0.35 μm 2P3M CMOS 工艺对图3电路结构进行参数设计和仿真,仿真工具为 Cadence Specters。图4、图5分别为当电路采用不同增益时,输入电流不同时的积分输出波形。电源电压5V,探测器参数设置为:电容100fF,电阻10¹⁵Ω,光电流分别为30、60、90pA,积分电容分别为10fF与190fF,积分时间60μs。

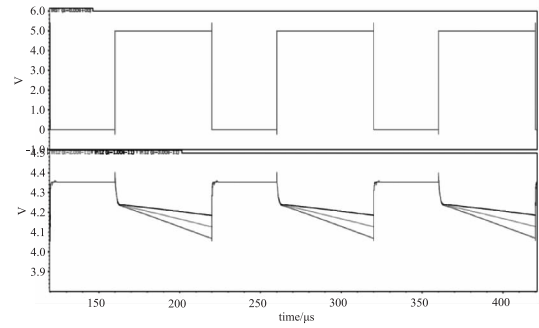


图4 高增益(积分电容为10fF)时输入级积分输出波形

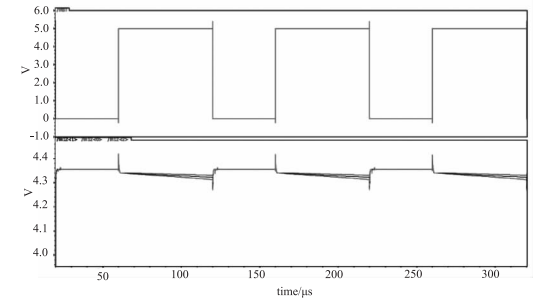


图5 低增益(积分电容为190fF)时输入级积分输出波形

对比图4、图5发现,CTIA 结构的输入端电压恒定为4.3V,与输入电流无关,这样就可以为探测器提供稳定的偏压,减少由此产生的空间噪声。其次无论大增益情况还是小增益,积分输出电压与输入光电流呈良好的线性关系。

2.1.2 列缓冲器与输出驱动器的设计

由于电路采用快照积分模式,所有像元在同一时间积分,并同时把信号保存在输入级的采样保持电容中。之后当某一行的行选信号起效时,存储在输入级采样保持电容中的信号经过输入级输出缓冲器(源随器)和列缓冲器被保存在列采样保持电容上。这里对于列缓冲器的设计采用的是简单的源随器,同时只有当行选通信号有效时,列缓冲器才开启工作,其余时段内没有电流流过,这样就在很大程度上降低了电路的功耗。

经过读出电路处理后输出的信号最后都需要连接到视屏处理芯片上,通常视屏处理芯片是一个较大的容性负载,因此在读出电路上增加输出驱动器是必不可少的。常用的输出驱动结构有一级差分结构、Cascode 结构以及标准的两级运放结构。本文选用的是二级差分结构,此结构简单实用、面积和功耗适中,无需补偿即可满足稳定性的要求,读出电路中通常是将运放连接成单位增益输出缓冲器使用的(如图6所示)。根据电路具体情况对电路参数进行设计和仿真,假设输出缓冲器的等效负载电容为10pF,输出缓冲器的直流特性扫描波形及瞬态仿真波形分别如图7及图8所示。

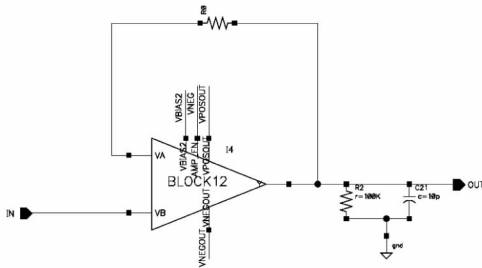


图6 输出驱动器原理图

从直流扫描结果可以看到,在输入从0.4~4.9 V变化过程中具有很好的跟随性。瞬态仿真波形表明在带有10 pF负载电容的情况下,缓冲器工作速度仍然可以达到10 MHz。综上所述,设计的输出缓冲器性能良好,可以达到要求。

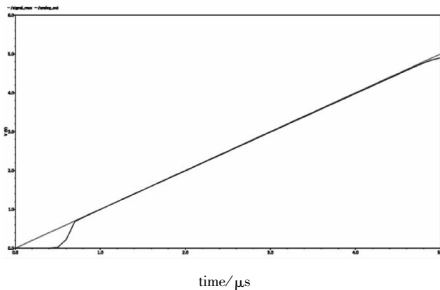


图7 输出缓冲器直流特性扫描曲线

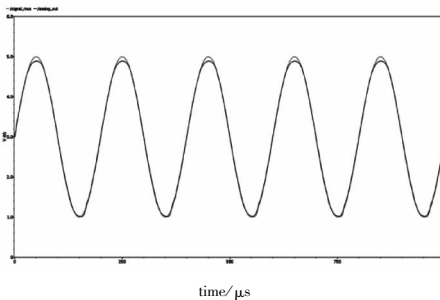


图8 输出缓冲器瞬态仿真波形

2.2 数字电路设计

在数字电路设计上,采用了格雷码编码,它属于可靠性编码,是一种错误最小化的编码方式,大大减少了数字电路在由一个状态到下一个状态时的逻辑混乱。由于格雷码在两个相邻的数之间转换,只有一个数位发生变化,使芯片整体功耗降低。

另外,电路设计采用了双沿触发的触发器,配合不同输出信号的使用,这款电路可以实现信号双沿控制输出,输出频率比主时钟频率高一倍。当主时钟最高频率为5 MHz,输出信号最高频率可达10 MHz。

最后,如果使芯片工作在命令模式下,可以实现一些特殊的数字功能,例如:行倒序、列倒序、面阵倒序,单行双次读出,动态开窗(开窗大小和位置任意可选)等。

2.3 模拟仿真

本文对所设计电路的整个模拟通道(包括输入级、列缓冲器、输出缓冲器)进行了仿真,电路具体参数如下:电源电压 V_{dd} 为5 V;积分时间60 μ s;输入光电流变化为0~100 nA,扫描增量为10 nA;附加容性负载电容为10 pF。其输出波形如图9所示,A1是光强为0时的输出电压4.46 V,A2是当光强饱和时的输出电压值1.13 V,模拟仿真输出电压幅度范围达到3.33 V。另外还对输入光电流从0~20 pA进行了精细扫描,扫描增量为2 pA,输出波形如图10所示,在该范围内输出电平的线性度良好,满足AlGaIn紫外探测器的使用要求。

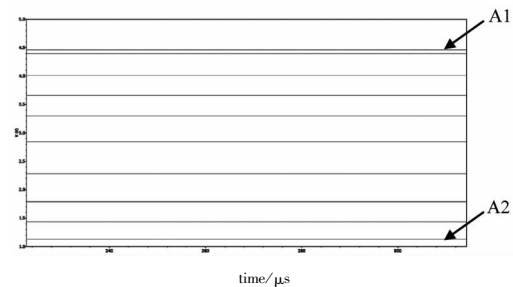


图9 模拟通道仿真结果(电流0~100 nA)

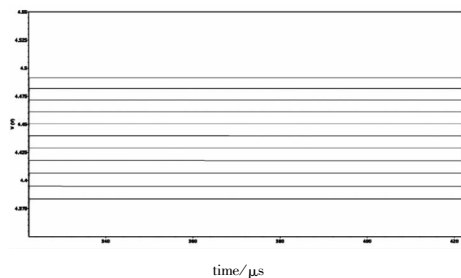


图10 模拟通道仿真结果(电流0~20 pA)

3 版图设计

版图设计采用全定制方式,用0.35 μ m 2P3M CMOS工艺设计了规模为320×256的读出电路,图11为设计完成的整体版图。其像元中心距为30 μ m,芯片总面积达到11.8 mm×11.1 mm。器件输入级部分的版图设计充分考虑了对称性,尽可能减小由于版图布局不对称造成的像元间不均匀,图12所示的是2×2输入级电路版图组成的对称标准单元。

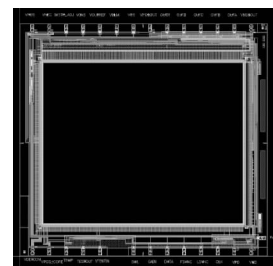


图11 整体版图

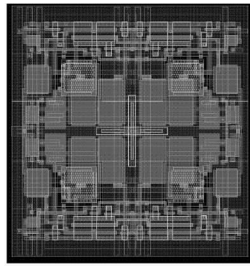


图12 2×2输入级电路标准单元版图

4 测试结果及分析

该读出电路已完成了流片,并对其主要功能及性能参数进行了测试,测试结果表明该读出电路的各项功能正常,可以在主时钟频率 7 MHz 下工作。其性能参数的测试结果如表 1 所示(测试条件: $V_{dd} = 5\text{ V}$,积分时间为 $60\ \mu\text{s}$,主时钟频率 5 MHz)。

表 1 读出电路测试结果

参数	测试结果
电压摆幅	4.3 ~ 1.5 V
动态范围	$\geq 70\text{ dB}$
噪声	$\leq 0.2\text{ mV}$
功耗	$\leq 100\text{ mW}$

可以看出,实际的输出电压摆幅没有达到仿真的效果,这是由于芯片是采用 P 衬底 N 阱 CMOS 加工的,所以导致 MOS 器件的体效应影响提高,从而使其开启电压(V_{th})偏离仿真值,使得电路中各放大器的信号传送大幅度衰减。如果改用双阱工艺进行加工,可以大大减小体效应的影响,使器件的性能得到大幅度的改善。

5 结论

本文基于 $0.35\ \mu\text{m}$ 2P3M CMOS 工艺,设计了一款快照工作模式的 320×256 紫外 AlGaIn 焦平面阵列读出电路。

该款读出电路属于数模混合电路,整体构架包括模拟信号处理电路和数字逻辑控制电路,其中模拟信号处理电路包含积分放大电路、采样保持电路、缓冲器及输出驱动电路。数字逻辑控制电路,实现了多种用户可配置的功能,包括任意开窗读出,读出方向可选,输出通道数可选等。

接着采用 $0.35\ \mu\text{m}$ 2P3M CMOS 工艺以全定制方式完成了全局电路的版图绘制,最终版图面积为 $11.8\text{ mm} \times 11.1\text{ mm}$ 。

最后对流片后的读出电路进行了测试,测试显示电路的各逻辑功能正常,各项性能参数可以满足紫外 AlGaIn 的应用要求,但某些性能将在后续的工作中继续优化。

参考文献:

- [1] Liu Wangjin, Hu Xiaoyan, Yu Songlin. Development overview of GaN-based ultraviolet detector[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(11): 1211 - 1214. (in Chinese)
刘万金, 胡小燕, 喻松林. GaN 基紫外探测器发展概况[J]. 激光与红外, 2012, 42(11): 1211 - 1214.
- [2] Xue Huiqiong, Jiao Bingbing, He Wei. CMOS ROIC design of uncooled IRFPA [J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2008, 160: 913. (in Chinese)
薛惠琼, 焦斌斌, 何伟. 非制冷红外焦平面 CMOS 读出电路设计[J]. 电子工业专用设备, 2008, 160: 913.
- [3] R McClintock, et al. 320×256 solar-blind focal plane arrays based on AlxGa1-xN [J]. Appl. Phys. Lett., 2005, 86: 011117.
- [4] M B Reine, A Hairston, P Lamarre, et al. Solar-blind AlGaIn 256×256 p-i-n detectors and focal plane arrays [J]. Proc. of SPIE, 2006, 6119, 611901: 1 - 15.
- [5] J D Brown, Z Yu, et al. Visible-Blind UV digital camera based on a 32×32 array of GaN/AlGaIn p-i-n photodiodes [J]. Nitride Semicond., 1999, Res. 4.