

基于 SiC APD 的日盲紫外单光子计数 读出电路设计与应用

吴 金¹, 郑丽霞¹, 王 力², 田江江², 张伟东², 何维捷², 孙伟锋²

(1. 东南大学无锡分校, 江苏无锡 214135; 2. 东南大学微电子学院, 江苏南京 210096)

摘 要: 针对宽禁带半导体 SiC APD 紫外单光子探测器, 本文提出了一种 1×8 线阵型单光子计数读出电路. 根据光强条件并通过合适的时序控制, 可选取固定门控或互补门控探测方式, 实现宽动态范围紫外光子信号的探测计数. 读出电路采用 TSMC 0.18 μm CMOS 工艺制备, 测试结果表明, 读出电路具备单光子探测功能, 性能与仿真分析预期结果吻合. 最终, 借助微动系统二维转台完成对日盲紫外单波长光子的探测与成像, 实现对多个独立紫外光源的准确区分与目标定位.

关键词: SiC 雪崩光电二极管; 读出电路; 互补门控; 紫外单光子探测与成像

中图分类号: TN23; TN432 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)07-1448-05

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.07.025

Design and Application of SiC APD Based Single Photon Counting Readout Integrated Circuit for Solar Blind Ultraviolet Detection

WU Jin¹, ZHENG Li-xia¹, WANG Li², TIAN Jiang-jiang², ZHANG Wei-dong², HE Wei-jie², SUN Wei-feng²

(1. Branch School of Southeast University, Wuxi, Jiangsu 214135, China;

2. Institute of Microelectronics, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: Based on the wide bandgap semiconductor SiC APD ultraviolet single photon detector, a 1×8 linear array photon counting readout circuit is proposed in this paper. According to the condition of the light intensity and through suitable timing control, the unitary fixed mode or complementary gating detection mode can be selected to implement the functions of sensing and counting for the wide dynamic range ultraviolet photon signals. The readout integrated circuit is fabricated by TSMC 0.18 μm CMOS process, the test results show that the readout circuit is capable of single photon detection, and the performance is in agreement with the expected prediction by the simulation results. Finally, the two-dimensional turntable of the micro-motion system is utilized to complete the solar blind single-wavelength photon detection and imaging, so as to implement accurate discrimination and target localization on the multiple independent ultraviolet light sources.

Key words: SiC avalanche photodiode (SiC APD); readout integrated circuit (ROIC); complementary gating; ultraviolet single photon detection and imaging

1 引言

作为一种新兴的光电探测技术, 日盲紫外探测可获得被测目标在短波辐射区域内的紫外频谱信息, 由于地球大气层的屏蔽作用, 在波段为 200nm ~ 300nm 的“日盲区”内, 来自太阳紫外线的辐射能量几乎为零, 即该波段的环境噪声极低, 较高的信噪比为微弱信号的灵敏检测提供了有利条件^[1].

固态雪崩光电二极管 APD 凭借其灵敏的光电传感性能, 极大地推动了单光子探测技术的发展. 其中基于宽禁带半导体 SiC APD 的单光子探测器, 具备对微弱紫外光灵敏的光电转换能力, 经与阵列读出电路集成可完成对光信号的感应转换、量化、数据传输等前端处理功能, 再经后端数字信号处理实现被测物体的轮廓成像, 可满足包括高压电气设备非接触式无损故障定位检测等众多不同领域的应用需求^[2]. 由于 SiC APD 衬底

收稿日期: 2018-08-13; 修回日期: 2020-01-11; 责任编辑: 李勇锋

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2016YFB0400904); 国家自然科学基金 (No. 61805036); 江苏省自然科学基金 (No. BK20181139); 模拟集成电路重点实验室稳定支持项目 (No. JCKY2019210C030)

没有电流扩散层,导致背光入射无效,只能采用正面入射.此外,由于 SiC 材料及其加工工艺的限制,在制备 SiC APD 面阵时面临较大困难,采用的环状公用电极会导致探测器良率和性能一致性变差,同时,面阵因布线大量增加,在光子从正面入射的情况下,将严重影响光的入射吸收.因此在现有工艺条件下, SiC APD 适合构造一维线阵结构,并通过微动系统二维转台扫描的方式实现二维面阵的探测成像.线阵扫描虽然控制复杂,但在一定范围内可自定义面阵区域,特别适合窄长条形区域的检测.

为提高 SiC APD 的探测灵敏度,探测器需工作在高反偏电压的盖革模式下,但随着反偏电压的提高,暗计数率和后脉冲率增大,导致弱光条件下的探测精度显著退化^[3].同时,随着 APD 阵列规模的不断扩大,像元串扰、寄生效应和噪声干扰等非理想因素的影响逐渐增大,为此, AQC (Active Quenching Circuit) 接口电路需为 APD 提供最佳的偏置条件,确保成像检测应用的质量^[4].

2 光子计数读出电路

2.1 读出电路探测模式

紫外单光子计数 ROIC 可分为被动采样与主动采样两种模式,并均限定在有效曝光窗口内完成对光子的探测和累加计数.若两次曝光时间均很长,其计数值足以反映光子实际强弱信息,则两次曝光为相对独立的探测,其间 APD 的关断时间对探测精度无影响.但若两次曝光时间很短,光子随机性很大,单次曝光窗口内的探测结果不足以反映被测光源的实际强弱信息,则在相邻曝光窗口之间的关断时间造成的光子漏检对探测精度有很大影响,需要将多个曝光时间内探测到的光子数相加来完成一次探测,对于这种将多个小的曝光时间叠加组成大的等效曝光时间的探测方法,通常需要压缩关断时间以减少光子漏检率,但过小的关断时间会使 APD 长期处于待测状态,带来器件暗计数率的显著上升.

被动采样模式的基本特征是无需采样信号驱动对光子的探测,而是利用电路内部产生的 RST_SELF 复位信号与光子触发的 STOP 信号交替作用,完成对光子的连续探测.在每次曝光时间内, AQC 淬灭光子触发的雪崩电流后,自动设置一小段死区延迟,再产生复位信号 RST_SELF,将 APD 恢复至待测状态,完成曝光窗口内对光子的检测.在从光子触发雪崩电流到 APD 恢复至待测状态之间的死区时间内, APD 无法检测光子.死区时间太短,则上一次雪崩电流能量释放不充分,产生较严重的后脉冲效应;死区时间过大,则会降低光子探测率.在被动采样模式下,光

子的实际分布决定了电路的响应时序,由于可能出现各种时序状态,该模式必须能够通过控制死区时间以抑制后脉冲率和暗计数率.在某些应用场合,需要根据光强强弱对死区时间进行分档配置,兼顾提高探测可靠性与提升性能的要求.主动采样模式则通常需要提供高频时钟信号驱动对光子的探测,采样信号的低电平区间相当于被动采样中的死区时间,无法进行光子检测.

在固定门控信号下完成对随机分布光子的探测,其时序如图 1 所示,由于频率和占空比变化的各种门控信号作用的不同, ROIC 可工作在被动和主动两种采样模式之下.在门控打开时, APD 保持待测状态,在很宽的门控曝光窗口内,若采用 AQC 淬灭驱动多个连续光子的探测,则为上述被动采样模式.当 2 个光子靠的过近甚至接近重合,小于死区时间,则只能检测到 1 个光子,产生图 1 中序号 7 光子的漏检情况.在门控关断时,强行将 APD 关断,此时无法检测光子,当光子在此时间段内到来时也会造成漏检,如图 1 中序号 3 光子.如前所述,这种漏检对多个窄门控周期合成的采样有影响,对单个宽门控采样无影响.

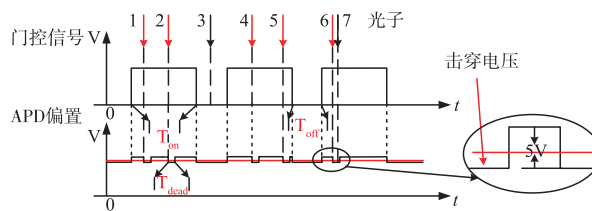


图1 固定门控探测方式工作时序图

被动采样模式下的门控关断区间较小,对于弱光探测,其漏检率极低.且弱光下光子落入到死区时间内的概率很小, AQC 淬灭时刻与光子实际时序分布高度吻合,因此被动采样模式适合弱光条件下的紫外单光子探测.在强光下,当两个光子随机到达的时间间隔小于死区时间,则会造成漏检,探测率显著下降.

不断提高门控信号的采样频率,单个门控曝光窗口宽度逐渐减小,使得在每个曝光窗口内可探测的光子数不断减小.当窄门控窗口内最多只允许探测 1 个光子时,则改变淬灭机制,即无论是否有多个光子在曝光窗口内到达,在探测到 1 个光子之后,直接由门控信号强制关断 APD,而无需 AQC 感应雪崩电流淬灭关断,由此形成主动采样模式. APD 复位则在下一个门控信号上升沿处触发,门控信号的半个周期为固定死区时间.对于弱光探测,主动采样的门控频率远大于实际光子分布密度,因此漏检率较低,但由于主动采样通常需要较高的时钟频率,系统功耗较大,针对弱光探测的能效很低.而在强光条件下,由于光子分布致密且到达时刻随机造成非曝光时间内的固有漏检,其探测率很难进

一步提高.

为提高强光条件下的光子探测率,同时抑制 APD 后脉冲效应引起的误计数和器件噪声导致的暗计数.对固定门控探测方式做出两点改进,得到互补门控探测方式,一是门控信号的频率和占空比变为可控,其次是通过时空耦合形式,将两个 APD 的感光面积紧凑的靠近在一起,等效为同一个感光像素点.如图 2 所示,通过控制两个像素中的 APD 交替工作,将其等效为一个单像素的探测,有效抑制关断时间内的漏检,在后续数据处理时,将等效单像素中两个互补探测子像素的输出数据进行叠加.这种互补门控探测方式,牺牲了对被测物体空间位置的分辨率,导致单次扫描成像后图像的像素数减半,从而对原始图像细节的解析度降低.

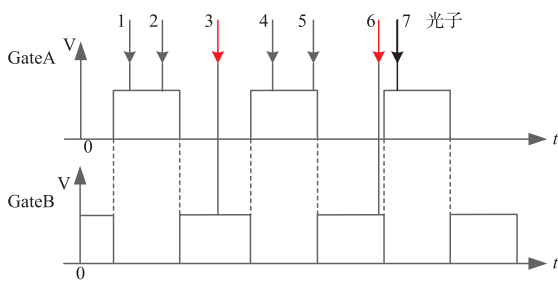


图2 互补门控探测方式工作时序图

通过灵活配置相应的门控信号采样频率和占空比,将 ROIC 设置在被动或主动采样模式下,可满足不同光强条件下的光子探测需求.光强较弱时,固定门控信号选取低频,并提高占空比,ROIC 工作在被动采样模式;当光强较强时,互补门控信号 Gate A/B 选取为高频,占空比设置为对称的 50%,同时屏蔽死区时间控制电路的作用,ROIC 在主动采样模式下完成感应和探测.

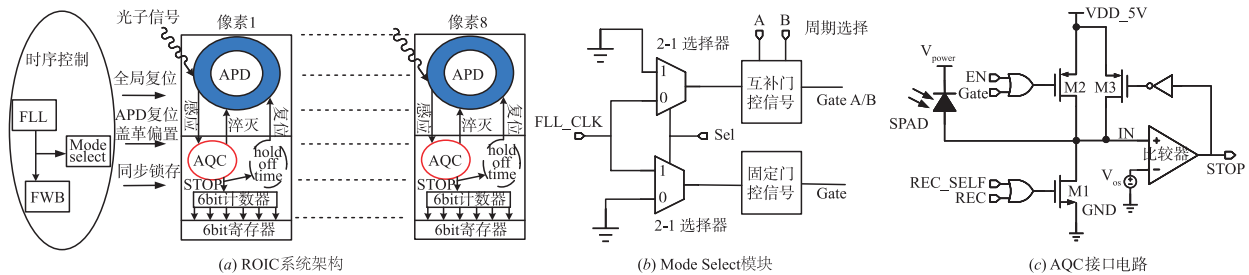


图3 1×8 光子计数ROIC系统

3 测试验证

搭建成像测试平台,并在室温 25°C 下验证线阵 ROIC 对紫外光的探测、成像和目标定位等功能.图 4 为本文 1×8 线阵 ROIC 系统芯片显微照,采用有保护环的四侧引脚扁平封装技术 CQFP (Ceramic Quad Flat Pack),在 ROIC 电路版图的上方添加一层金属层 PAD,

2.2 读出电路系统架构

完整的光子计数 ROIC 系统架构如图 3 (a) 所示,主要包含两大部分:一是由 8 个相同的单像素电路构成的线阵,二是时序控制模块.

单像素电路主要包含了 AQC 接口电路、死区时间控制电路(hold-off-time)、计数器、寄存器和其它辅助电路.各单像素电路同步完成对光子的探测、计数、数据锁存等功能,最终按照逐像素串行输出的方式将各像素探测到的数据读出.时序控制模块则产生门控、帧字位(Frame Word Bit,FWB)和复位等全局控制信号,同时通过外部电平开关 A、B 控制门控信号的周期,将系统设置在固定门控或互补门控探测方式下.内嵌锁频环(Frequency Locked Loop, FLL)用于产生固定频率的时钟信号以供 ROIC 系统内部模块使用.

AQC 电路原理图由图 3 (c) 所示,采用闭环反馈控制结构. EN 为外部输入的系统帧信号, Gate 为门控采样信号,控制 APD 曝光窗口的大小. REC 是与 Gate 同步上升的 APD 窄脉冲复位信号,用于将截止状态的 APD 复位至待测状态,主要用于主动采样模式.而 REC_SELF 则用于将淬灭后的 APD 复位至待测状态,主要用于被动采样模式.被动采样模式下,当 APD 处于待测状态时, IN 点为高阻态,当光子触发雪崩电流后, IN 点电压上升,通过比较器产生 STOP 信号的上升沿,从而导通 M3,加速淬灭过程,在经历一段死区时间后, REC_SELF 信号有效,将 APD 复位至待测状态,完成一次光子探测. hold-off-time 电路采用计数器定时控制的方式配合驱动频率配置完成死区时间的设定与控制,定时计数完毕后产生自复位信号 REC_SELF,拉低 STOP 信号,复位 APD 至待测状态,本文测试时选取的死区时间为 $60\text{ns} \sim 80\text{ns}$.

并通过金线实现 APD 与 ROIC 的集成互连,线阵长度 $d = 3.88\text{mm}$,宽度 $b = 0.3\text{mm}$.

通过数字延时器和函数信号发生器产生帧信号 EN 和模拟光子触发响应信号,在不加 SiC APD 的条件下,测试线阵 ROIC 在不同探测方式下的光子探测率.通过调节帧信号 EN 的周期和模拟光子触发响应信号的频率来控制一帧内的光子数量,得到不同探测方式

在不同光强下的光子探测率. 结果如图 5 所示,可以发现互补门控探测方式在不同光强下均能保持 90% 以上的光子探测率,且强光下探测率明显优于固定门控探测方式.

将 SiC APD 传感器与线阵 ROIC 集成为一体,设置帧信号 EN 的周期为 1ms,高电平占空比为 95%. 如图 6 所示,通过示波器观察无光条件下 STOP 信号的电平变化,统计多帧观测窗口内的暗计数值,再除以多帧观测周期,得到 APD 在 187.1V、187.3V 和 187.9V 反偏电压条件下的平均暗计数率分别为 3kHz、15kHz 和 42kHz. 已知反偏电压越大,检测灵敏度越高,但暗计数率也越大. 为兼顾检测灵敏度和可靠性,选取暗计数率较低的 187.1V 作为 APD 的反向偏压.

打开紫外光源,利用二维转台实现对目标区域的面阵扫描成像,一次行扫描对应 8 个像素,一次列扫描对应 1 个像素,最终得到 6 行 50 列共 300 组像素数据. 由于缺乏高精度的单光子光源,无法有效控制光源发射的光子数,且弱光下两种探测方式在粗略的成像实验中效果相近,因此本文仅给出在固定门控探测方式下的成像效果图.

在目标区域内仅含一个光源的测试条件下,设置 EN 周期为 200 μ s,高电平占空比为 95%. 成像效果如图 7(a) 所示,其中 X 轴和 Y 轴分别代表行列方向扫描的像素点数,最大值分别为 6 \times 8=48 和 50 \times 1=50,Z 轴代表光子数. 扫描的成像结果是一个光斑,光子数为 50.

增加两个紫外光源,设置探测目标区域内三个紫外光源的光线强度各不相同,且在空间位置上存在横向和纵向的差距,测试参数和单光源条件一样. 成像效果如图 7(b) 所示,检测到三个光斑,光子数分别为 3、10 和 30,且三个光斑的分布既有明显的行间距差,也有明显的列间距差.

对于弱光探测,若光源太多,由于光源之间存在相

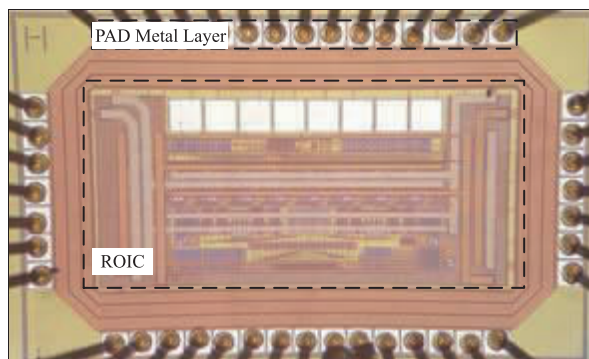


图4 1 \times 8线阵ROIC系统芯片显微照

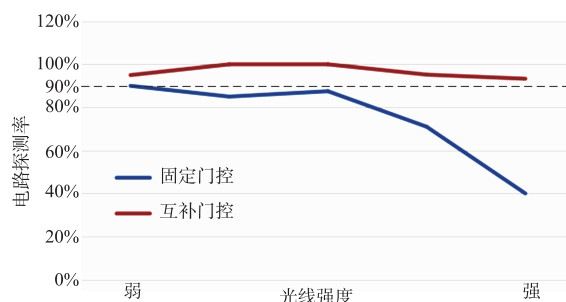


图5 探测率与光线强度的关系曲线图

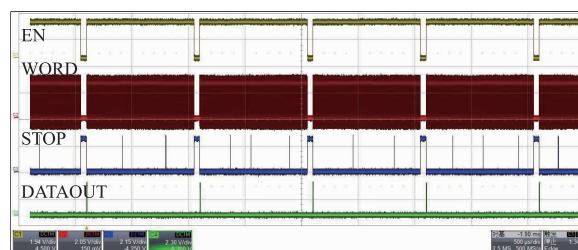
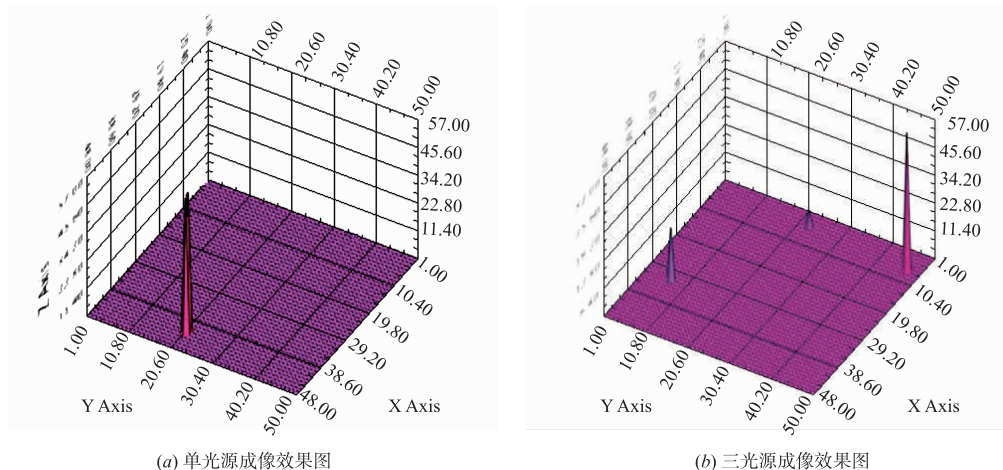


图6 反向偏置电压187.1V的暗计数率测试

互干扰,对于本文的小规模阵列,会对最终的成像精度产生较大影响,因此本文只给出含一个和三个光源的成像测试结果来说明本文芯片探测功能的可行性,后续工作将扩大线阵规模,并寻求相关措施提高探测效果.



(a) 单光源成像效果图

(b) 三光源成像效果图

图7 紫外光源探测成像效果图

如表 1 所示,将本文所提出的 ROIC 芯片与近年来本领域的相关研究成果进行比较,可以发现,本文芯片在探测率方面具有显著优势,且在其他性能参数指标方面实现了较好的均衡.

表 1 文献对比

性能参数	文献[4]	文献[5]	本文芯片
制造工艺	0.18 μm	0.35 μm	0.18 μm
阵列规模	256 \times 256	1 \times 32	1 \times 8
帧频	$\leq 1000\text{kfps}$	$\leq 3000\text{kfps}$	$\leq 1000\text{kfps}$
探测方式	固定门控	固定门控	固定/互补门控
采样模式	被动	主动/被动	主动/被动
计数方式	数字式	数字式	数字式
探测率	10%~20%	$\leq 42\%$	$\geq 90\%$
暗计数率	14kcps	4kcps	3kcps
动态范围	42dB	48dB	42dB
死区时间	NA	40~800ns	60~80ns

4 结论

SiC APD 线阵 ROIC 基于扫描成像可实现面阵检测,主动和被动采样模式在光子探测率方面各有优缺点,提出了固定门控与互补门控相结合的光子采样模式.完成对 1 \times 8 线阵规模的可配置门控采样型数字式光子计数读出电路的设计、测试和应用示范验证.测试结果表明,电路具备对单波长紫外光源的探测计数和定位功能,且在较宽的光强变化范围内均拥有较高的

作者简介



吴金男,1965年3月30日出生于江苏南京,1991年和1997年于东南大学电子科学与工程学院分别获得工学硕士和博士学位,现为东南大学微电子学院教授、博士生导师.近期研究兴趣主要为时钟电路、时间数字转换电路以及红外单光子探测读出电路设计等.主持或参加过国家、省自然科学基金、国家“核高基”重点专项等各类项目研究.发表 SCL/EI 收录论文 30

余篇,授权国家发明专利 8 项.

E-mail:jwu@seu.edu.cn

光子探测率.

参考文献

- [1] 黄翌敏. 紫外探测技术应用[J]. 红外, 2005, (4): 11-17.
Huang Yimin. Application of ultraviolet detection technology[J]. Infrared, 2005, (4): 11-17. (in Chinese)
- [2] 徐煜, 雷泽宇, 栗璐, 等. 紫外探测器及其在电气设备电晕放电检测中的应用[J]. 自动化与仪器仪表, 2017, (5): 142-143.
Xu Yu, Lei Zeyu, Li Lu, et al. Ultraviolet detector and its application in corona discharge detection of electrical equipment[J]. Journal of Automation & Instrumentation, 2017, (5): 142-143. (in Chinese)
- [3] 赵峰, 郑力明, 廖常俊, 等. 红外单光子探测器暗计数的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(8): 29-32.
Zhao Feng, Zheng Liming, Liao Changjun, et al. Dark count probability for single-photon detector at infrared wavelengths[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(8): 29-32. (in Chinese)
- [4] Aull B F, Schuette D R, Young D J, et al. A study of crosstalk in a 256x256 photon counting imager based on silicon Geiger-mode avalanche photodiodes[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15: 2123-2132.
- [5] Tisa S, Guerrieri F, Tosi A, et al. 100 kframe/s 8 bit monolithic single-photon imagers[A]. European Solid-State Device Research Conference 2008 [C]. IEEE, 2008. 274-277.



郑丽霞(通信作者)女,1979年5月出生于江苏常州,东南大学副教授,博士,专业为集成电路设计,主要研究方向为雪崩光电二极管(APD)相关读出电路的设计.

E-mail:zhenglx@seu.edu.cn