

基于4H-SiC APD单光子探测的主动淬灭电路研究

陶晓强, 李天义, 徐尉宗, 周东, 任芳芳, 陆海

Research on active quenching circuit based on single-photon detection of 4H-SiC APD

引用本文:

陶晓强,李天义,徐尉宗,周东,任芳芳,陆海. 基于4H-SiC APD单光子探测的主动淬灭电路研究[J]. [激光技术](#), 2024, 48(6): 809–815.

TAO Xiaoqiang, LI Tianyi, XU Weizong, et al. Research on active quenching circuit based on single-photon detection of 4H-SiC APD[J]. [Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays](#), 2024, 48(6): 809–815.

您可能感兴趣的其他文章

1. [APD阵列及其成像激光雷达系统的研究进展](#)

引用本文: 李兵, 杨赟秀, 李潇, 等. APD阵列及其成像激光雷达系统的研究进展[J]. [激光技术](#), 2023, 47(3): 310–316.

2. [孔径接收下各向异性海洋湍流UWOC系统误码分析](#)

引用本文: 贺锋涛, 王清杰, 张建磊, 等. 孔径接收下各向异性海洋湍流UWOC系统误码分析[J]. [激光技术](#), 2021, 45(6): 762–767.

3. [APD探测系统的噪声特性及其影响因素研究](#)

引用本文: 刘贺雄, 周冰, 高宇辰. APD探测系统的噪声特性及其影响因素研究[J]. [激光技术](#), 2018, 42(6): 862–867.

4. [基于APD面阵探测器的非扫描激光主动成像雷达](#)

引用本文: 陈德章, 张华, 冷杰, 等. 基于APD面阵探测器的非扫描激光主动成像雷达[J]. [激光技术](#), 2017, 41(6): 775–778.

5. [905nm InGaAs脉冲激光二极管驱动电流特性分析与测试](#)

引用本文: 李勇军, 邹建, 甘泉露, 等. 905nm InGaAs脉冲激光二极管驱动电流特性分析与测试[J]. [激光技术](#), 2017, 41(6): 803–806.

文章编号: 1001-3806(2024)06-0809-07

基于4H-SiC APD单光子探测的主动淬灭电路研究

陶晓强, 李天义, 徐尉宗, 周东, 任芳芳, 陆海*

(南京大学 电子科学与工程学院, 南京 210093, 中国)

摘要: 为了对比不同类型淬灭电路对4H-SiC雪崩光电二极管(APD)探测性能的影响, 采用被动淬灭电路(PQC)和主动淬灭电路(AQC), 对两种类型SiC紫外APD进行了单光子探测实验, 发现在PQC较长死区时间内, 会频发后脉冲现象, 导致APD的暗计数率(DCR)较高, 从而降低器件的信噪比; 对APD后脉冲概率的时间分布进行了研究, 并进一步对AQC在更高器件过偏压下单光子探测中出现的问题进行了分析, 提出了电路改进方案。结果表明, 通过将AQC死区时间调整至45 ns, 在相同单光子探测效率下, 可将器件DCR减少至原先水平的1/4; 通过有效抑制后脉冲和加快APD恢复速度, AQC可使器件展现出更加优越的探测性能。此研究为SiC APD在单光子探测中的应用提供了一定的参考。

关键词: 传感器技术; 雪崩光电二极管; 主动淬灭电路; 4H-SiC; 单光子探测

中图分类号: TN23

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.06.005

Research on active quenching circuit based on single-photon detection of 4H-SiC APD

TAO Xiaoqiang, LI Tianyi, XU Weizong, ZHOU Dong, REN Fangfang, LU Hai*

(School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: In order to compare the effects of different types of quenching circuits on the detection performance of 4H-SiC avalanche photodiodes (APD), single-photon detection experiments were conducted on two types of SiC ultraviolet APD by using passive quenching circuits (PQC) and active quenching circuits (AQC). It was found that during a long dead time in PQC, post pulse phenomena occur frequently, resulting in a higher dark counting rate (DCR) of APD, thereby reducing the signal-to-noise ratio of the device. A study was conducted on the time distribution of pulse probability after APD, and further analysis was conducted on the problems encountered by AQC in single-photon detection under higher device bias. A circuit improvement plan was proposed. The research results indicate that by adjusting the dead time of AQC to 45 ns, the device DCR can be reduced to 1/4 of the original level under the same single-photon detection efficiency. By effectively suppressing post pulse and accelerating APD recovery speed, AQC can enable the device to exhibit superior detection performance. This study provides a certain reference for the application of SiC APD in single-photon detection.

Key words: sensor technique; avalanche photodiodes; active quenching circuit; 4H-SiC; single-photon detection

0 引言

雪崩光电二极管(avalanche photodiode, APD)是可通过内部雪崩增益实现单光子探测的一类光电探测器, 凭借其低功耗、高灵敏度等优势, 在国防军工和民用领域中具有广阔的应用前景^[1-3]。特别是基于4H-SiC材料的APD探测器, 由于其本征可见光盲特性, 在紫外微光探测领域极具竞争力^[4-5]。但是, 相比于商用硅基APD器件, SiC APD还处于发展的初期阶段, 探测性能有待提升, 主要表现在较高暗计数率和较低单

光子探测效率^[6-8]。APD性能除了与所用SiC材料质量、器件结构设计和制备工艺直接相关外, 还受到单光子探测测量所使用的淬灭电路影响。近年来, 有关SiC APD单光子探测的研究通常使用传统的被动淬灭电路, 其淬灭时间和恢复时间均较长。这一过程易受后脉冲等效效应影响, 导致输出信号中存在大量“伪计数”, 从而影响器件单光子探测性能^[9-10]。为解决这一问题, 一方面可以在器件层面进行优化, 但难度大且成本高; 另一方面, 从信号处理角度考虑, 可采用功能更加全面的淬灭电路来减少后脉冲等噪声的干扰, 实现探测性能的有效提升。

本文作者重点研究了被动淬灭电路和主动淬灭电路对SiC APD单光子探测性能的影响, 分析对比了两种电路在抑制后脉冲、降低暗计数率等方面的性能差

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61921005; U2141241; U21A20496)

* 通信作者: hailu@nju.edu.cn

收稿日期: 2024-02-01; 修回日期: 2024-02-26

异;基于对 APD 后脉冲概率时间分布的分析,通过将主动淬灭电路的死区时间缩短至 45 ns,实现了 APD 器件雪崩过程的快速淬灭与恢复,显著降低了器件的暗计数率,提升了单光子探测效率。

1 APD 单光子探测性能参数

当 APD 在盖革模式下工作时,其结区电场非常强,雪崩增益可达 $10^5 \sim 10^6$ 以上。此时,单个光子入射产生的电子或空穴在电场作用下迅速发生碰撞离化,导致 APD 发生持续的雪崩倍增过程。为了实现后续光子的探测,淬灭电路被用来抑制 APD 的持续雪崩,并使器件尽快恢复到初始状态以进行下一次探测。通过在单位时间段内采集外电路的电流脉冲信号,可以获得评估 APD 单光子探测性能的关键参数,如暗计数率、单光子探测效率和后脉冲概率等。

1.1 暗计数率

暗计数是指在 APD 处于盖革工作模式且无光子入射时,由器件内部自由载流子碰撞离化产生的脉冲信号。单位时间内产生的暗计数频率被称为暗计数率 (dark count rate, DCR)。在单光子探测试验中,暗计数是需要尽量降低的噪声信号,通过 DCR 可以评估探测系统的噪声水平^[11]。SU 等人^[12]设计的 P-I-N 型 SiC APD 在单光子探测效率为 10% 时 DCR 可达 $10 \text{ Hz}/\mu\text{m}^2$ 。ZHOU 等人^[13]基于吸收层-电荷控制层-倍增层分离结构制备的 SiC APD 在单光子探测效率为 9.01% 时 DCR 可达 $8.83 \text{ Hz}/\mu\text{m}^2$ 。

1.2 单光子探测效率

单光子探测效率 (single-photon detection efficiency, SPDE) 是指单个光子入射至 APD 被探测到的概率。其计算公式如下:

$$E_{\text{SPDE}} = \frac{c_p - c_d}{n_p} \times 100\% \quad (1)$$

式中: c_p 是光子引发的计数总值; c_d 是暗计数值; n_p 是整个探测过程中入射的光子总数。通常情况下过偏压会直接影响 APD 的探测效率,过偏压越高,器件结区电场越强,光子激发的载流子发生雪崩的可能性越大,SPDE 也相应越高。然而,过高的偏置电压也在一定程度上提高了 DCR 水平。

1.3 后脉冲概率

后脉冲指的是在雪崩发生的过程中,电子或空穴被材料中缺陷暂时捕获,并在短时间内再次释放引发的雪崩脉冲^[14]。从计数角度来看,后脉冲效应产生的雪崩信号可以视为暗计数的一种形式。近期研究发现, SiC APD 的后脉冲概率在雪崩后存在一定的时间分布,并且随着器件过偏压的增加,后脉冲概率呈现上

升趋势^[9,15]。这是因为更高的过偏压增加了缺陷捕获载流子的几率,而载流子在释放后在更强的电场下更容易引发新的雪崩,从而产生“伪计数”。因此,为了提升 APD 的探测性能,对后脉冲的抑制是非常必要的。

2 APD 淬灭测试电路

通过淬灭测试电路,不仅可以改变 APD 的工作状态,还可以实现对其发生雪崩倍增后产生的电流脉冲信号的采集。在不同的应用场景下,需要考虑淬灭电路和不同器件的适配度。相比于传统硅基器件, SiC APD 存在暗计数率较高和脉冲信号不均匀等问题,这主要是因为 SiC 器件结构在外延生长过程中易产生点缺陷和位错类缺陷;这些材料缺陷可引起载流子隧穿效应和后脉冲,从而增加器件的 DCR^[16-17]。因此,对基于 SiC APD 的单光子探测,淬灭电路的选择和优化尤为重要。本文中主要介绍被动、主动和门控 3 种常用淬灭电路。

2.1 被动淬灭电路

被动淬灭电路 (passive quenching circuit, PQC) 主要通过电阻分压的方式来控制 APD 的工作状态。图 1a 为 PQC 的电路示意图。可以看到, APD 的两端分别串联了较大阻值的淬灭电阻 R_q 和较小阻值的采样电阻 R_s 。当高压源偏置电压 V_{bias} 大于 APD 雪崩击穿电压时, APD 处于盖革工作模式,此时光子入射会引发器件雪崩。电路中的雪崩电流信号在经过 R_q 时会产生显著电压降,从而减少了 APD 两端的电势差,降低了结区电场强度,抑制了持续的雪崩倍增过程,并使器件逐渐恢复到初始状态。为深入研究 APD 在 PQC 中的工作过程, COVA 等人^[18]提出了一种利用开关 S 模拟光子入射的电路模型。如图 1b 所示, R_d 为 APD

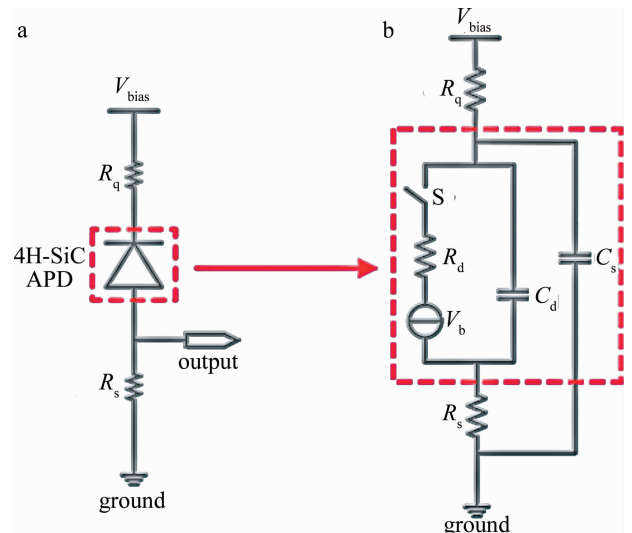


图 1 被动淬灭电路示意图

Fig. 1 Schematic of a passive quenching circuit

内阻; C_d 和 C_s 分别为 APD 的结电容和在电路中的寄生电容; V_b 为 APD 的雪崩电压。

在被动淬灭模式下, APD 进行一次完整的单光子探测过程可以分为以下 3 个阶段。

(a) 待测状态。当无光子入射时, 开关 S 断开, 偏置电压 V_{bias} 对 C_d 和 C_s 充电, 电容器两端积累大量电荷, APD 处于待探测状态。

(b) 雪崩和淬灭状态。当光子入射后, APD 发生雪崩并产生脉冲电流信号, 这一过程相当于开关 S 闭合, 电路中的电流从零开始增加并瞬间达到峰值。随后 C_d 和 C_s 通过电阻开始放电, 电流开始呈指数下降, 直至达到一个稳定数值。这一放电时间称为淬灭时间 T_q :

$$T_q = (C_d + C_s)(R_d // R_q) \quad (2)$$

由于 R_q 阻值远大于 R_d , 因此:

$$T_q \approx (C_d + C_s)R_d \quad (3)$$

(c) 恢复状态。当 APD 被充分淬灭后, 器件结区电场不足以维持雪崩, 雪崩电流消失, 开关 S 再次断开。此时, V_{bias} 重新对 C_d 和 C_s 开始充电, APD 两端电压逐渐从雪崩电压 V_b 上升至 V_{bias} , 器件恢复至初始态以准备下一次的探测。这一充电时间称为恢复时间 T_r :

$$T_r = (C_d + C_s)(R_d + R_q) \approx (C_d + C_s)R_q \quad (4)$$

由于 APD 的雪崩过程非常迅速, 因此将淬灭时间 T_q 和恢复时间 T_r 统称为死区时间。PQC 中 R_q 的阻值通常在千欧量级, 电路的死区时间高达几百纳秒乃至几微秒。当 APD 开始被淬灭的一段时间内, 器件两端电压仍高于 V_b , 此时器件内部自由载流子的运动或被缺陷捕获的载流子再次释放会以较大概率引发雪崩脉冲进而产生“伪计数”; 当 APD 处于恢复状态时, 其两端电压又低于 V_b , 此时光子入射至 APD 无法被正常响应。

PQC 的电路结构简单、灵活性高, 在 APD 探测中应用时相对便捷。但是, 电路较长的死区时间导致 APD 在恢复状态下无法对光子正常响应, 同时死区时间内频发的后脉冲也无法得到有效控制, 这些问题严重影响了 SiC APD 紫外单光子探测。

2.2 主动淬灭电路

为减少电路死区时间过长对 APD 单光子探测的影响, 设计主动淬灭电路 (active quenching circuit, AQC) 来实现 APD 的快速淬灭和恢复。AQC 的电路结构如图 2 所示。与 PQC 类似, APD 一端连接到高压源 V_{bias} , 另一端串联着限流电阻 R_i 和采样电阻 R_s 。当光子入射引发器件雪崩后, 电路中的雪崩脉冲电流通过 R_s 转换为脉冲电压信号, 在后续电路识别后, 通过信号放大和电压比较转换为方波信号输出至信号采集

设备。同时, 输出的方波信号在标准化处理后会反馈至主动淬灭和恢复模块, 对 APD 进行快速的淬灭和恢复。图中, NAND(not and) 表示与非。

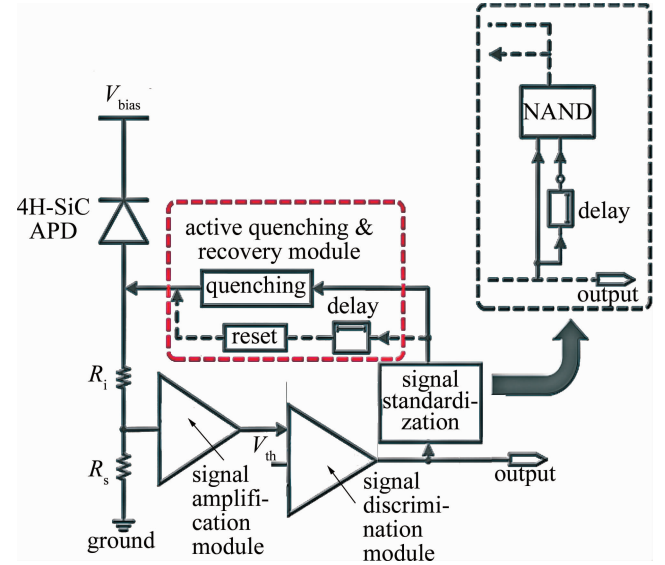


图 2 主动淬灭电路示意图

Fig. 2 Schematic of an active quenching circuit

AQC 的工作过程可以分为以下 4 个阶段。

(a) 信号放大。考虑到雪崩电压信号通常在毫伏量级, 不利于后续的信号比较, 因此需要通过前置放大电路将信号放大至伏量级。在信号放大的过程中, 需要对放大前后的雪崩信号进行监测, 控制放大倍数在合理范围内, 以避免信号失真等问题的发生。

(b) 信号比较。将放大后的雪崩信号输入至高速电压比较器, 并与人为设定的阈值电压进行比较。当雪崩信号幅值大于阈值电压时, 比较器会输出规则的方波信号以进行后续的计数统计。

(c) 信号标准化。由于 SiC APD 器件存在脉冲信号不均匀性的问题, 导致比较器后输出的方波信号在脉宽上有所差异, 这会影响后续的主动淬灭和恢复时间。为了确保每一次雪崩能够得到充分淬灭, 需要对反馈信号进行标准化处理。在对比较器输出的方波信号进行一段时间的延时并取反后, 将其与原信号共同输入至数字逻辑芯片进行逻辑与非处理, 从而可以得到脉冲高度和宽度一致的反馈信号。

(d) 主动淬灭与恢复。标准化后的反馈信号会首先触发主动淬灭模块, 将一稳定直流电压施加到 APD 较低电势的一端, 将器件两端电压拉低至雪崩电压以下从而实现快速淬灭; 当反馈信号在模块的另一路经过一段延时时间后, 会触发恢复模块将 APD 较低电势的一端接地, 使器件迅速恢复至初始状态。

与 PQC 不同, AQC 会在死区时间内通过反馈信号对 APD 进行持续控制, 使器件两端电压始终低于雪崩

电压,从而降低了死区时间内因后脉冲等效效应导致2次雪崩的可能性。同时,通过优化电路设计和使用高速集成芯片,可以大幅缩短电路的死区时间。总体来看,AQC不仅有效减少了后脉冲的发生,还显著缩短了电路的死区时间,AQC的应用对SiC APD紫外单光子探测有很大帮助。

2.3 门控淬灭电路

在激光雷达和量子通信等应用领域中,光子只在特定时间内发射,这对APD和光子的同步性有较高要求。因此,门控淬灭电路被设计用于此类场景的单光子探测。门控淬灭电路结构与PQC类似,电路通过高压源向APD提供一个略低于雪崩电压的直流偏压,同时通过高压电容将一个交流脉冲电压施加到器件上,将其作为控制APD工作状态的门控信号。当门开启时,交流脉冲电压和直流偏压发生叠加,使APD两端电压高于雪崩电压,器件处于盖革工作模式,可以进行正常的光子探测;当门关闭时,APD两端电压下降至雪崩电压以下,器件无法正常工作。和AQC相同,门控淬灭电路也是通过控制APD两端电压来实现对器件的快速淬灭和恢复。并且,由于门控信号在电路死区时间内处于关态,使得APD两端电压始终低于雪崩电压,后脉冲等效效应无法产生计数对探测进行干扰。通过设置门控信号的频率和脉宽大小,可以调整电路的死区时间,有效控制后脉冲效应,从而提升APD的探测性能。

3 单光子探测与主动电路优化

为了探究不同淬灭电路对SiC APD单光子探测的影响,实验中采用PQC与AQC对两种不同器件结构的SiC APD进行测试。由于门控淬灭电路仅在特定时间段内使APD工作于盖革模式,不适合随机光子探测。图3是两种类型SiC APD的截面示意图。APD-a的制备主要采用外延生长工艺,通过在N型SiC衬底上依次淀积P⁺型缓冲层、N⁻型倍增层、N型过渡层和N⁺接触层来实现N-I-P型结构;通过刻蚀工艺制备了倾斜台面作为终端结构来抑制器件台面边缘的电场尖峰。APD-b的制备则采用离子注入工艺,通过多次N离子注入来实现器件顶端的N型接触层,并设计了凹槽窗口作为器件终端来抑制器件边缘的电场尖峰^[19]。图中,PECVD(plasma enhanced chemical vapor deposition)表示等离子体增强型化学气相沉积。

两种类型APD室温下的光暗电流特性曲线和增益-电压特性曲线如图4所示。可以看出,两种器件的暗电流在雪崩击穿前均处于0.1 pA量级,随着反向偏压逐渐增大至雪崩电压附近时,暗电流会出现缓慢上

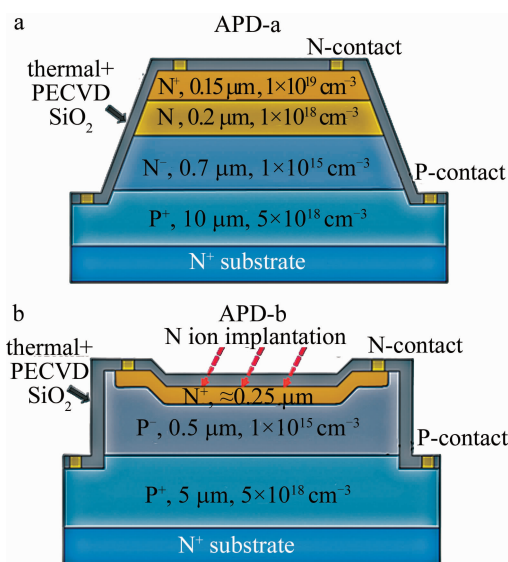


图3 两种SiC APD横截面示意图

Fig. 3 Cross-sectional schematics of two types of SiC APD

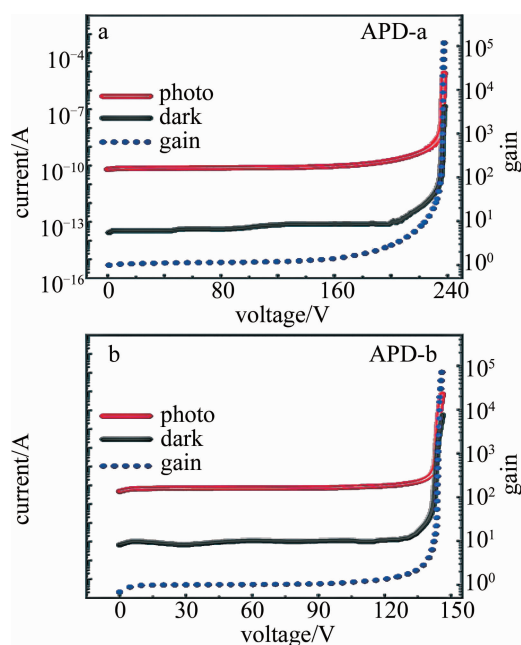


图4 两种SiC APD光电流、暗电流以及增益-电压曲线

Fig. 4 Photon current, dark current and gain-voltage characteristic of two types of SiC APD

升的趋势。通常将APD增益达到 10^3 时的反向偏置电压定义为雪崩击穿电压。APD-a的雪崩击穿电压约为236 V,APD-b的雪崩击穿电压约为144 V。当反向偏压达到雪崩击穿电压时,器件的暗电流开始急剧上升;而随着反向偏压的进一步增大,器件由线性模式进入盖革模式,器件增益可达 $10^5 \sim 10^6$,此时可以进行单光子探测。

3.1 单光子探测

由于SiC APD的响应峰值处于紫外日盲波段,因此,实验中选择280 nm紫外线发光二极管作为光源,

使用 PQC 和 AQC 对上述两种类型 SiC APD 进行单光子探测实验。图 5 为两种 SiC APD 基于 PQC 表征的 DCR 和 SPDE 过偏压特性曲线。可以看出,在相同过偏压条件下,两种器件的 SPDE 数值相差不大,但是 APD-b 的 DCR 却要高出 APD-a 一个数量级,这表明 APD-b 在相同探测效率下噪声水平相对较高。这一差异可能是由于 APD-b 采用的离子注入工艺会在材料中引入更多的缺陷,而高温退火工艺无法将这些缺陷完全修复^[20-21]。此外,PQC 中淬灭电阻 R_q 的阻值约为 $100\text{ k}\Omega$,通过理论计算可知,电路的死区时间高达几百纳秒。在较长的死区时间内,由离子注入工艺引入的缺陷导致后脉冲效应发生的可能性大大增加,从而产生大量“伪计数”,降低了 APD 的信噪比。因此,为了提高 APD 探测性能,对整个探测过程中后脉冲的控制是必不可少的。

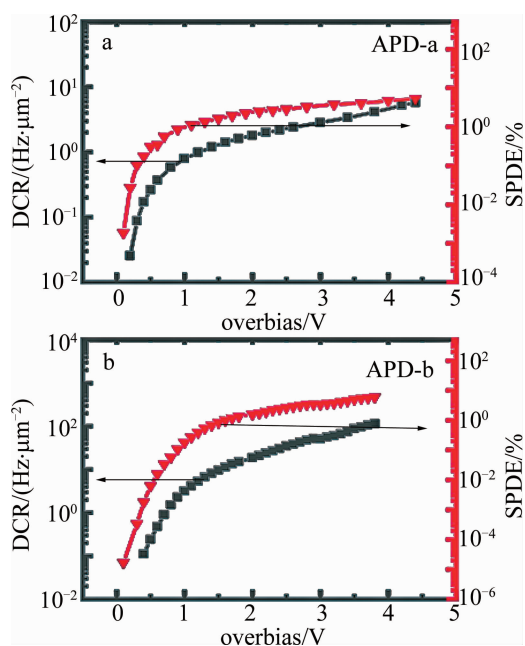


图 5 两种 SiC APD 被动淬灭模式下 DCR 和 SPDE 过偏压特性曲线
Fig.5 DCR and SPDE overbias characteristics of two types of SiC APD measured with PQC

为尽可能减少后脉冲的发生,需要对 APD 的后脉冲特性进行表征。采用“双门控”测试方法,可以获得器件的后脉冲概率在雪崩发生后的时间分布^[9]。如图 6 所示,两种 SiC APD 在室温下的后脉冲概率均随时间增加呈下降趋势。其中概率高于 5% 的曲线部分主要集中在雪崩发生后的 $0\text{ ns} \sim 150\text{ ns}$ 内;而在 150 ns 之后,后脉冲概率持续低于 5%,并逐渐趋向于零。此外,相比于 APD-a,APD-b 的后脉冲概率整体更高,并且下降更为缓慢。这进一步证实了离子注入工艺会导致更显著的后脉冲效应。随着器件过偏压的增加,两种 SiC APD 的后脉冲概率分布曲线均有所提高。这一

现象主要是由于过偏压的增加导致器件内部结区电场增强,载流子的雪崩倍增过程加剧,会有更多载流子在雪崩过程中被缺陷捕获,并且这些被捕获的载流子经过一段时间释放后也更容易在结区的强电场中引发新的雪崩。根据后脉冲概率时间分布曲线,对器件发生雪崩后 $0\text{ ns} \sim 150\text{ ns}$ 时间内后脉冲进行控制,理论上可以减少大量的“伪计数”,降低器件的 DCR。

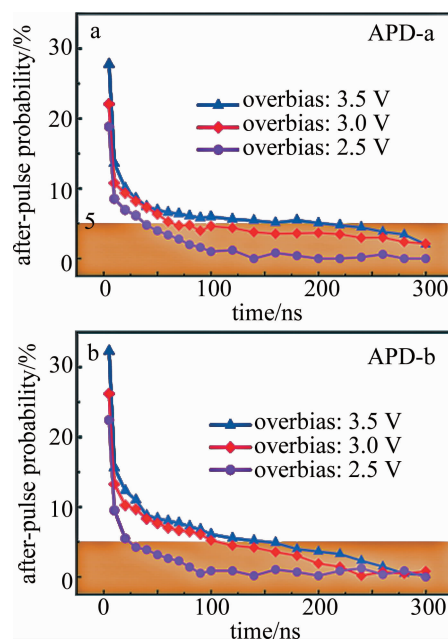


图 6 两种 SiC APD 的后脉冲概率随时间分布曲线

Fig.6 After-pulse probability vs. timecurves of two types of SiC APD

在表征两种 SiC APD 的后脉冲特性后,使用 AQC 对器件再次进行单光子探测试验。图 7 为两种器件基于 PQC 和 AQC 的 DCR-SPDE 特性曲线。可以看出,对于两种类型 SiC APD,基于 PQC 表征的 DCR-SPDE 特性曲线始终高于基于 AQC 表征的特性曲线。对于 APD-a,当过偏压达到 3.0 V 时,PQC 中器件的 SPDE 达到 2.1% ,DCR 为 $2.8\text{ Hz}/\mu\text{m}^2$,而相同 SPDE 条件下基于 AQC 测得的 DCR 为 $0.6\text{ Hz}/\mu\text{m}^2$,相比被动减少了约 78.5% ;对于 APD-b,过偏压 3.0 V 时 PQC 中器件的 SPDE 达到 3.6% ,DCR 为 $51.5\text{ Hz}/\mu\text{m}^2$,而相同 SPDE 条件下基于 AQC 测得的 DCR 为 $14.2\text{ Hz}/\mu\text{m}^2$,相比被动减少了约 72.4% 。随着器件偏置电压的增加,在 PQC 中 APD 的后脉冲效应逐渐加剧,器件暗计数的增长比例开始超过光计数,DCR 会在 SPDE 极小变化范围内显著增加,从而导致 DCR-SPDE 曲线直线上升。相比之下,AQC 能够继续抑制后脉冲,在维持 APD 在较低 DCR 的同时,使器件达到更大的探测效率。

近年来,基于 AQC 进行的 SiC APD 单光子探测鲜有报道;相比之下,AQC 在基于 Si、AlGaIn、InGaAs 等

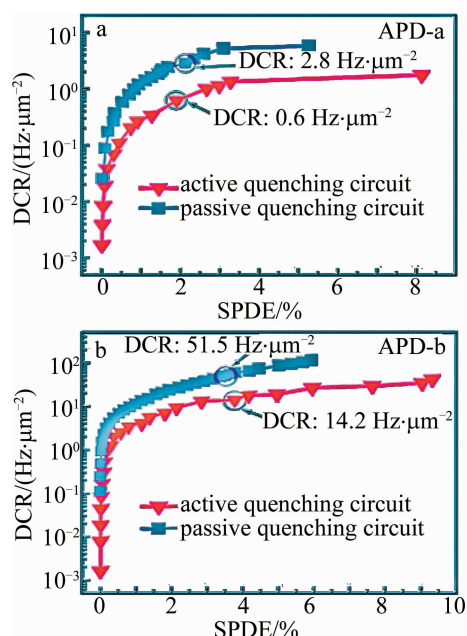


图7 基于PQC和AQC的SiC APD DCR-SPDE特性对比

Fig. 7 Comparison of DCR-SPDE characteristics of SiC APD based on PQC and AQC

材料的APD探测器上的应用则更为普遍,其死区时间一般控制在几十纳秒到几百纳秒之间^[22-25]。图8a为

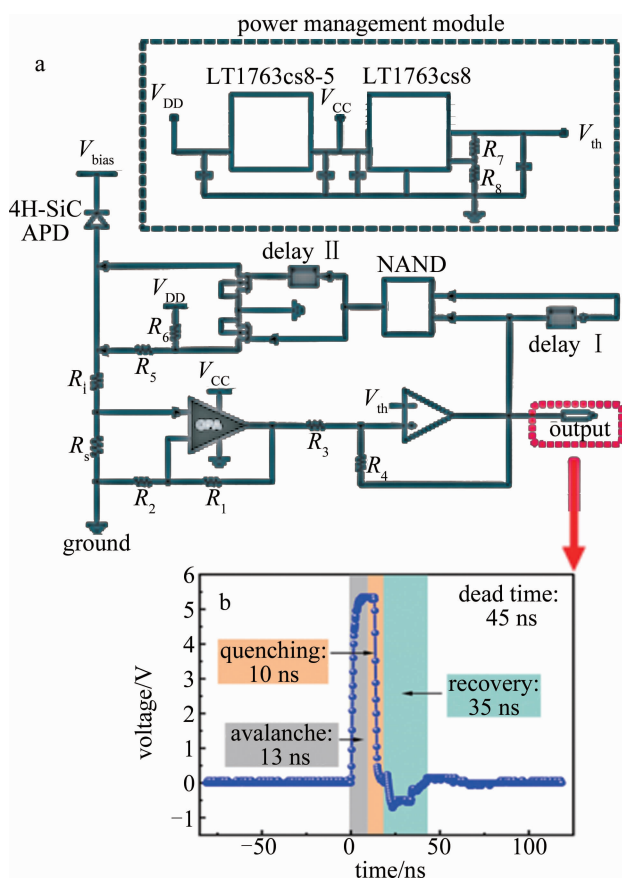


图8 SiC APD单光子探测中AQC电路图和输出波形图

Fig. 8 AQC diagram and output waveform of single-photon detection based on SiC APD

本实验中采用的AQC电路结构图。电路采用了高速运算放大器OPA355和高速电压比较器TLV3501进行信号放大和信号比较,并设计了电源管理模块输出不同的直流偏置电压。图8b为AQC输出波形图。可以看出, SiC APD在AQC中的雪崩时间约为13 ns, 主动淬灭时间约为10 ns, 而主动恢复时间约为35 ns。整个电路的死区时间控制在45 ns左右, 这与目前已报道的能够应用于APD单光子探测的AQC水平一致。

3.2 主动淬灭电路优化

通过AQC在高偏置电压条件下进行SiC APD单光子探测试验, 可以对器件的最佳探测性能进行研究。当器件过偏压增加到10 V及以上时, 输出信号中暗计数成分明显增多, 器件DCR开始显著增加, 并且AQC的稳定性出现退化。通过对AQC各个模块的输出波形进行观察和分析后, 对AQC在更高器件偏压下SiC APD单光子探测的应用提出了相应的改进方案。

(a) 主动淬灭模块增大直流偏置电压 V_{DD} 。当APD过偏压达到10 V及以上时, 器件结区电场强度极大, 光子入射会引发剧烈的载流子雪崩倍增过程, 因此, 需要在器件每次雪崩后对其进行快速且充分的淬灭。通过增加主动淬灭模块的直流偏置电压 V_{DD} , 使APD两端电压在器件每一次淬灭时能迅速降至雪崩电压之下; 同时, 根据实际雪崩程度调整信号标准化模块中的延时时间, 以保证足够的淬灭时间。

(b) 信号比较模块采用滞回比较器。受到阻抗匹配等因素的影响, SiC APD更容易出现雪崩信号反复振荡的问题, 从而导致AQC输出信号中存在较多的“伪计数”。因此, 需要在信号比较模块中采用滞回比较器代替传统的过零比较器, 通过选用高速电压比较器芯片TLV3501并调整其外围电路参数, 将信号比较的高低阈值电压控制在合适范围内, 从而减少因雪崩信号反复振荡产生的重复计数。

(c) 后端采用数字信号处理。随着器件过偏压的增加, APD的光计数和暗计数都会显著增加。此时, 若仍对模拟输出信号进行采样, 可能会因设备采样率不足出现信号遗漏与丢失的问题。因此, 在保证高采样率的前提下, 通过ADC模块将模拟输出信号转换为数字输出信号, 并将数据传输至现场可编程门阵列进行信号处理, 从而可以提高信号采集与分析的准确度。

4 结 论

在APD单光子探测中, 为了发挥器件最佳探测性能, 降低DCR显得尤为关键。在传统的PQC中, 由于电路对APD的淬灭和恢复过程较长, 并且这一过程易受后脉冲的干扰, 从而导致器件的探测性能受限。

AQC 通过反馈信号主动控制 APD 两端电压,在较短时间内实现了对器件的快速淬灭和恢复,不仅抑制了后脉冲,还大幅缩短了电路的死区时间,从而提升了 APD 的探测性能。本文中基于 PQC 和 AQC 对两种类型 SiC APD 进行了单光子探测研究,结果表明,在 PQC 中,两种器件的 DCR 相对较大。在对二者后脉冲特性进行表征后,通过将 AQC 的死区时间控制在 45 ns 左右,在相同 SPDE 条件下可将两种器件的 DCR 减少至原先水平的 1/4。最后针对 AQC 在 10 V 以上高偏压时 SiC APD 单光子探测的应用提出了相应的电路改进方案。

参 考 文 献

- [1] CAMPBELL J C. Evolution of low-noise avalanche photodetectors [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2021, 28(2): 1-11.
- [2] HAYDEN O, AGARWAL R, LIEBER C M. Nanoscale avalanche photodiodes for highly sensitive and spatially resolved photon detection [J]. Nature Materials, 2006, 5(5): 352-356.
- [3] ITZLER M A, JIANG X, ENTWISTLE M, *et al.* Advances in In-GaAsP-based avalanche diode single photon detectors[J]. Journal of Modern Optics, 2011, 58(3/4): 174-200.
- [4] ZHU H, CHEN X, CAI J, *et al.* 4H-SiC ultraviolet avalanche photodetectors with low breakdown voltage and high gain[J]. Solid-State Electronics, 2009, 53(1): 7-10.
- [5] BAI X, GUO X, MCINTOSH D C, *et al.* High detection sensitivity of ultraviolet 4H-SiC avalanche photodiodes[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2007, 43(12): 1159-1162.
- [6] BAE I H, PARK S, HONG K S, *et al.* Characteristics measurement in a deep UV single photon detector based on a TE-cooled 4H-SiC APD[J]. IEEE Photonics Journal, 2023, 15(1): 1-6.
- [7] CHENG B T, DAI Q, XIE X M, *et al.* Research progress of single-photon detectors[J]. Laser Technology, 2022, 46(5): 601-609 (in Chinese).
程碑彤, 代千, 谢修敏, 等. 单光子探测器的研究进展[J]. 激光技术, 2022, 46(5): 601-609.
- [8] SU L L, ZHOU D, LIU Q, *et al.* Effect of a single threading dislocation on electrical and single photon detection characteristics of 4H-SiC ultraviolet avalanche photodiodes[J]. Chinese Physics Letters, 2020, 37(6): 068502.
- [9] DONG H, ZHANG H, SU L, *et al.* After-pulse characterizations of Geiger-mode 4H-SiC avalanche photodiodes [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(12): 706-709.
- [10] LIU M, BAI X, HU C, *et al.* Low dark count rate and high single-photon detection efficiency avalanche photodiode in Geiger-mode operation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(6): 378-380.
- [11] YANG S, ZHOU D, CAI X, *et al.* Analysis of dark count mechanisms of 4H-SiC ultraviolet avalanche photodiodes working in Geiger mode[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, 64(11): 4532-4539.
- [12] SU L, CAI X, LU H, *et al.* Spatial non-uniform hot carrier luminescence from 4H-SiC PIN avalanche photodiodes[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(6): 447-450.
- [13] ZHOU X, TAN X, LV Y, *et al.* Impact of resistance on the performance of ultraviolet 4H-SiC avalanche photodiodes [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(8): 3250-3255.
- [14] DU Y, RETIERE F. After-pulsing and cross-talk in multi-pixel photon counters[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2008, A596(3): 396-401.
- [15] WANG Y, LV Y, WANG Y, *et al.* Noise characterization of Geiger-mode 4H-SiC avalanche photodiodes for ultraviolet single-photon detection[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 24(2): 1-5.
- [16] CAI X, WU C, LU H, *et al.* Single photon counting spatial uniformity of 4H-SiC APD characterized by SNOM-based mapping system[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(19): 1603-1606.
- [17] LIU F, WANG J, WANG D, *et al.* Photo-electric response of 4H-SiC APDs at high-level incident flux[J]. Results in Physics, 2023, 50: 106608.
- [18] COVA S, GHIONI M, LACAITA A, *et al.* Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection[J]. Applied optics, 1996, 35(12): 1956-1976.
- [19] LI T, TAO X, XU W, *et al.* Geiger-mode operation 4H-SiC recessed-window avalanche photodiodes fabricated by N ion implantation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2023, 35(14): 761-764.
- [20] NIPOTI R, AYEDH H M, SVENSSON B G. Defects related to electrical doping of 4H-SiC by ion implantation[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2018, 78: 13-21.
- [21] SON W Y, SHIN M C, SCHWEITZ M, *et al.* Al implantation and post annealing effects in N-type 4H-SiC [J]. Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 2020, 15(7): 777-782.
- [22] LIU L, LV W, LIU J, *et al.* Performance of active-quenching SPAD array based on the tri-state gates of FPGA and packaged with bare chip stacking[J]. Sensors, 2023, 23(9): 4314.
- [23] XING W, HU A, ZHOU X, *et al.* Active quenching and reset circuit for Geiger mode avalanche photodiodes[C]//2023 5th International Conference on Electronic Engineering and Informatics (EEI). New York, USA: IEEE Press, 2023: 15-18.
- [24] DENG S, GORDON D, MORRISON A P. A Geiger-mode APD photon counting system with adjustable dead-time and interchangeable detector[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 28(1): 99-102.
- [25] YUAN F, LU X L, JING L, *et al.* A novel high-speed photon counting system with programmed dead time[C]//2019 IEEE 4th Optoelectronics Global Conference (OGC). New York, USA: IEEE Press, 2019: 85-88.