

## 硅基高灵敏度近红外单光子 dTOF 探测器

王帅康<sup>1</sup>, 刘丹璐<sup>1</sup>, 陈前宇<sup>1</sup>, 韩冬<sup>1</sup>, 王嘉源<sup>1</sup>, 徐跃<sup>1,2\*</sup>, 曹平<sup>3</sup><sup>1</sup>南京邮电大学集成电路科学与工程学院, 江苏 南京 210023;<sup>2</sup>射频集成与微组装技术国家地方联合工程实验室, 江苏 南京 210023;<sup>3</sup>核探测与核电子学国家重点实验室, 安徽 合肥 244199

**摘要** 基于 0.18  $\mu\text{m}$  BCD 工艺实现了一种高灵敏度、低暗计数噪声的近红外单光子直接飞行时间(dTOF)探测器。集成的单光子雪崩二极管(SPAD)探测器采用新型的高压 p 阱/n<sup>+</sup>埋层作为深结雪崩倍增区的结构,显著提高了对近红外光子的探测概率;采用低掺杂的外延层作为虚拟保护环,有效减小了器件暗计数噪声。dTOF 探测器读出电路采用三步式混合结构的时间数字转换器(TDC),获得了高时间分辨率和大动态范围。测试结果表明,SPAD 器件在 5 V 过偏压下的光子探测概率(PDP)峰值达到 45%,在 905 nm 近红外波长处的 PDP 大于 7.6%,暗计数率(DCR)小于 200 Hz。读出电路实现了 130 ps 的高时间分辨率和 258 ns 的动态范围,差分非线性度(DNL)和积分非线性度(INL)均小于  $\pm 1$  LSB (1 LSB=130 ps)。该 dTOF 探测器具有人眼安全阈值高、灵敏度高、噪声低和线性度好的优点,可应用于低成本、高精度的激光雷达测距系统。

**关键词** 探测器; 直接飞行时间; 单光子雪崩二极管; 光子探测概率; 暗计数率; 时间数字转换器

中图分类号 TN491

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230936

## 1 引言

基于单光子雪崩二极管(SPAD)的光子直接飞行时间(dTOF)探测器通过测量发射光与反射光之间的时间间隔来计算所探测的距离,具有体积小、功耗低和分辨率高等优点,已被广泛应用于自动驾驶、人脸识别、AR/VR 以及 3D 成像等新兴领域<sup>[1-6]</sup>。dTOF 探测器通常采用片内的时间数字转换器(TDC)来精确测量光子飞行时间<sup>[7]</sup>,相比于间接飞行时间(iTOF)测量技术,具有更强的抗干扰能力和更宽的动态范围<sup>[5]</sup>。目前 dTOF 探测器正朝着与硅基工艺兼容的低成本和高集成度方向快速发展,但是还存在人眼安全阈值低<sup>[8]</sup>、时间分辨率和动态范围相互制约等问题。

传统硅基 SPAD 器件采用 p<sup>+</sup>/n 阱的浅结结构,只对蓝绿光有较高的响应度,在近红外波段的光子探测概率(PDP)很低,并且器件受表面缺陷影响会产生较高的暗计数噪声,难以通过增加过偏电压提高 PDP。近年来,研究人员主要针对器件的雪崩区进行研究,提出了 p<sup>+</sup>/深 n 阱和 p 阱/深 n 阱等结构<sup>[9-12]</sup>,利用低掺杂的深 n 阱形成雪崩倍增区,不仅可以降低带-带隧穿机制对暗计数的影响,还能形成宽耗尽区来拓宽光谱响应范围。Veerappan 等<sup>[9]</sup>和 Shin 等<sup>[10]</sup>所提出的结构在

400~780 nm 的宽光谱范围内都能实现大于 10% 的 PDP,但对 800 nm 以上的近红外光子的探测概率依然较低,仍难满足近红外波段的探测需求。为此, Lindner 等<sup>[11-12]</sup>将这两种结构器件与背照式深亚微米工艺相结合,研制出高近红外灵敏度和低暗计数噪声的 SPAD,但定制工艺导致成本较高。在读出电路方面,国内外研究人员提出了时间幅度转换器(TAC)和游标延迟线型、计数器型等多种架构的 TDC<sup>[13]</sup>,特别是模拟型 TAC 和游标延迟线型 TDC 能够实现几十皮秒甚至几皮秒的时间分辨率。例如:Luca 等<sup>[14]</sup>设计了一种基于 0.13  $\mu\text{m}$  CMOS 图像传感器工艺制造的采样保持型 TAC 结构,获得了 6.66 ps 的高分辨率,然而受电路噪声及失配的影响,TAC 模拟输出方法的稳定性和线性度较差,测量距离通常较短<sup>[15]</sup>;Cheng 等<sup>[16]</sup>设计的游标环形振荡器结构 TDC 虽然实现了高达 7.3 ps 的分辨率,但满量程范围仅有 9 ns。总的来说,硅基 SPAD 器件存在近红外 PDP 低、暗计数率高等缺点<sup>[17]</sup>,而且单一结构的 TDC 读出电路难以同时实现高分辨率和宽动态范围,因此对于近红外、大动态范围、高分辨率的硅基 dTOF 探测器的设计仍是一大难题。

本文基于 0.18  $\mu\text{m}$  BCD 工艺研究并实现了一种近红外高灵敏度 dTOF 探测器。该探测器主要由 16

收稿日期: 2023-05-06; 修回日期: 2023-05-11; 录用日期: 2023-05-31; 网络首发日期: 2023-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(62171233)、江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(21)3062)、核探测与核电子学国家重点实验室资助项目(SKLPDE-KF-202307)、江苏省研究生创新计划(SJCX22\_0261)

通信作者: \*yue@njupt.edu.cn

个 SPAD 器件、16 个前端淬灭电路和 1 个带锁相环的 TDC 读出电路组成。其中, SPAD 器件采用高压 p 阱 /  $n^+$  埋层作为深结雪崩区, 采用 p 型外延层作为虚拟保护环, 实现了高的近红外 PDP 和低的暗计数率。TDC 电路采用三步式混合架构, 利用插值电路对高频分相时钟进行相位分辨, 同时利用 2 bit 精计数衔接 6 bit 粗计数, 突破了分辨率和量程之间的相互制约。测试结果验证了该近红外单光子 dTOF 探测器在 PDP、暗计数率、时间分辨率和线性度方面都具有良好的性能。

## 2 近红外 SPAD 器件

### 2.1 器件结构

所提出的近红外 SPAD 器件的截面如图 1 所示。该器件利用 BCD 工艺提供的高压 p 阱 (HVPW) 和高压  $n^+$  埋层 (HVBN) 之间形成的深结耗尽层作为雪崩倍增区, 有效提高了对近红外光子的探测概率。同时, 在 HVPW 中进行浅结的重掺杂  $p^+$  注入, 并在  $p^+$  表面外侧形成环形的阳极, 且在  $p^+$  区表面中间不积淀金属硅化物, 形成透光的窗口。高压 n 阱 (HVNW) 作为  $n^+$  埋层的引出区域, 在其表面进行浅结的重掺杂  $n^+$  注入, 并在  $n^+$  区表面形成环形的阴极。在器件阴极  $n^+$  接触孔和阳极  $p^+$  接触孔之间还有浅沟槽隔离 (STI), 防止器件电极之间发生击穿。特别是在雪崩倍增区外侧有低掺杂的 p 型外延层 (p-epi) 作为器件的虚拟保护环, 不但能避免器件表面被过早击穿, 而且能有效降低保护环区域的电场, 减小 STI 周围缺陷引起的暗计数噪声影响。

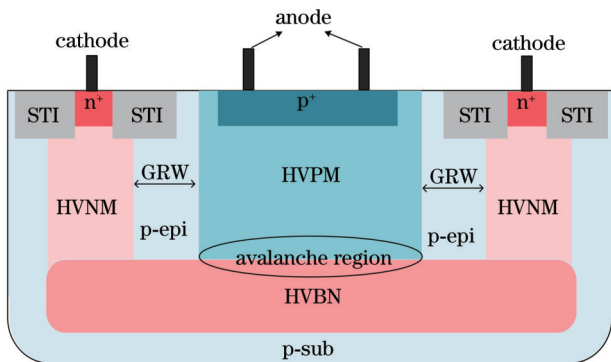


图 1 SPAD 截面图

Fig. 1 Cross-section diagram of the SPAD

SPAD 器件对光子的吸收主要发生在雪崩倍增区和高压 p 阱区, 由于雪崩倍增区被完全耗尽且深埋于衬底, 因此能获得比高压 p 阱区更高的近红外光生载流子量子效率。高压 p 阱区和雪崩倍增区吸收光子后产生的电子-空穴对在反向电场作用下分别向  $n^+$  埋层和  $p^+$  阳极方向漂移。近红外短波光光子由于能量较低而容易穿过高压 p 阱中性吸收区进入雪崩倍增区被吸收。靠近高压 p 阱一侧的雪崩倍增区由于掺杂浓度远

低于  $n^+$  埋层一侧的雪崩倍增区, 其耗尽区更宽, 是产生光生载流子的主要区域。由于雪崩倍增区存在强电场, 雪崩倍增区内产生的光生电子和高压 p 阱区扩散过来的光生电子会在强电场作用下发生雪崩倍增效应, 使阳极电流在短时间内迅速增加, 实现单光子探测。靠近高压 p 阱一侧的雪崩倍增区的光生电子在反向电场作用下最终进入倍增区中心, 使得发生雪崩倍增的路径更长、雪崩电场更强, 可获得更高的雪崩倍增因子, 相比于主要依靠空穴碰撞电离的器件有更高的雪崩触发概率, 能显著增强器件对近红外光子的探测灵敏度。

### 2.2 TCAD 仿真分析

基于  $0.18 \mu\text{m}$  BCD 工艺对所提出的 SPAD 器件使用 SILVACO Atlas 工具进行盖革模式下的二维器件仿真。仿真过程中采用 Shock-Read-Hall 载流子产生-复合、Conmob 和 Fldmob 迁移率、Selberherr 碰撞电离和 Geiger 等物理模型<sup>[18]</sup>来获得接近实际器件的电学特性。为了使所设计的 SPAD 器件既满足小尺寸要求又保证不发生边缘击穿, 需要优化最佳保护环间距。图 2(a) 显示了仿真得到的 4 种不同保护环间距的器件  $I$ - $V$  特性曲线。可以看出, 保护环间距  $d_{\text{GRW}}$  为  $0.5 \mu\text{m}$  和  $1.5 \mu\text{m}$  的器件的雪崩击穿电压分别为  $19 \text{ V}$  和  $31.7 \text{ V}$ , 而保护环间距  $d_{\text{GRW}}$  为  $2.5 \mu\text{m}$  与  $3.5 \mu\text{m}$  的器件的雪崩击穿电压均为  $42 \text{ V}$ , 这说明当间距过小时, 会在保护环边缘区域提前发生雪崩击穿, 从而使 SPAD 器件不能正常工作。综合考虑器件尺寸及性能, 本文选用  $2.5 \mu\text{m}$  的保护环间距。图 2(b) 所示为  $d_{\text{GRW}} = 2.5 \mu\text{m}$  器件在过偏压为  $3 \text{ V}$  下的二维电场分布情况。可以看到, 器件雪崩区中心距表面的深度约为  $4 \mu\text{m}$ , 雪崩区宽度约为  $1 \mu\text{m}$ , 电场分布均匀、集中, 电场强度峰值达到  $3.75 \times 10^5 \text{ V/cm}$ , 从而保证了对近红外光子有更高的探测概率。由于虚拟保护环区域的掺杂浓度低, 其电场强度明显小于雪崩区中心电场强度, 因此能够有效防止器件边缘过早击穿, 同时避免 STI 界面缺陷产生的载流子被强电场驱入雪崩倍增区而引发严重的暗计数噪声。

## 3 单光子 dTOF 探测器读出电路

### 3.1 探测器结构

单光子 dTOF 探测器读出电路结构如图 3 所示, 主要由模拟前端 (AFE)、或逻辑树 (OR tree)、TDC 电路以及并串转换电路 (PISO) 组成。为了提高单光子探测效率, 利用 16 个 SPAD 器件构成一个探测器阵列来增加有效感光面积, 每个 SPAD 都接 1 个由淬灭和脉冲整形电路构成的模拟前端进行雪崩淬灭和脉宽压缩。dTOF 探测器的工作原理如下: SPAD 器件工作在盖革模式下, 激光发射后经目标物反射回的光子被 SPAD 探测到立即产生雪崩电流, 雪崩淬灭通过晶体管 M1 实现, 工作在线性模式的 M1 管等效为一个阻值

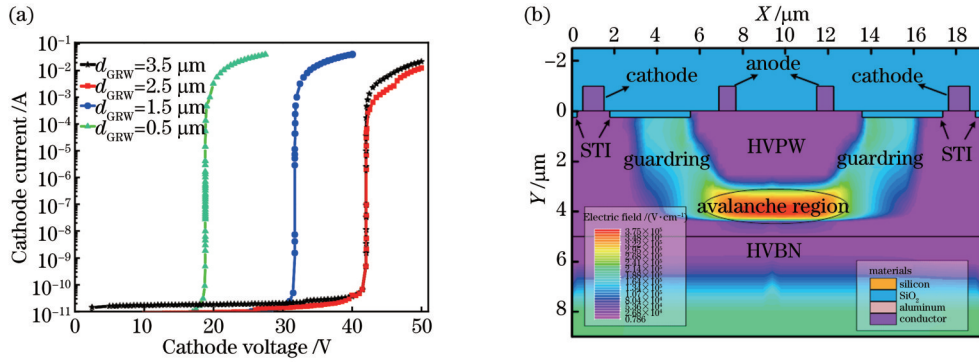


图 2 TCAD 仿真结果. (a)  $I$ - $V$  特性曲线; (b) 二维电场分布

Fig. 2 TCAD simulation results. (a)  $I$ - $V$  characteristic curves; (b) 2D electric field profile

可以由栅压  $V_Q$  控制的淬灭电阻  $R_{M1}$ , 淬灭时间  $T_q$  可以通过以下公式进行估算:

$$T_q \approx (C_{as} + C_{cs}) \times R_{M1}, \quad (1)$$

$$R_{M1} \approx 1 / \left[ \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_Q - V_{TH}) \right], \quad (2)$$

式中:  $C_{as}$  和  $C_{cs}$  分别为器件的阳极和阴极到衬底的杂散电容;  $W/L$ 、 $\mu_n$ 、 $C_{ox}$  和  $V_{TH}$  分别为 M1 管的宽长比、电子迁移率, 栅氧化层的单位面积电容和阈值电压。SPAD 器件的  $C_{as}$  和  $C_{cs}$  均取 1 pF。在 3.3 V 的栅压  $V_Q$  控制下仿真得到的淬灭电阻  $R_{M1}$  约为 100 k $\Omega$ , 淬灭时

间  $T_q$  约为 200 ns。钳位管 M2 可防止过高的雪崩电压 ( $V_{Anode}$ ) 损坏脉冲整形电路。雪崩电压再经过脉冲整形电路后输出窄脉冲信号, 最后由或逻辑树将 16 路窄脉冲信号复接成一路光子回波信号 stop 读入 TDC 电路。TDC 内置锁相环 (PLL) 产生的高频多相时钟量化光子发射信号 start 和光子回波信号 stop 上升沿之间的时间间隔即为光子飞行时间 (TOF)。测量结束后 TOF 值在读出时钟 read 控制下通过并串转换电路 (PISO) 串行输出至 FPGA 进行直方图数据收集和峰值提取。

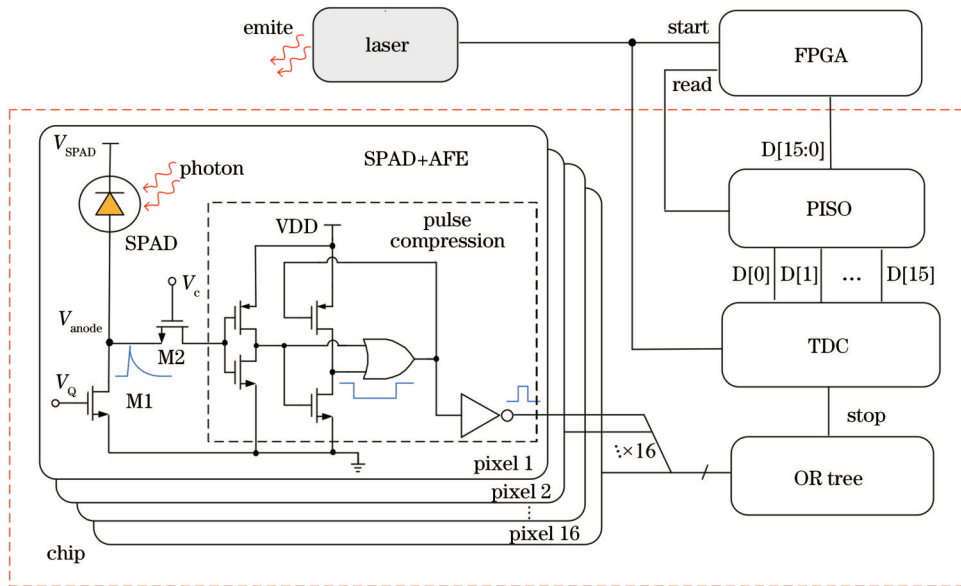


图 3 单光子 dTOF 探测器的电路结构图

Fig. 3 Block diagram of single photon dTOF detector

### 3.2 TDC 电路

为了实现高分辨率和宽动态范围的 TOF 测量, 提出一种由粗计数器 (coarse counter)、精计数器 (fine counter)、插值器 (interpolator) 以及 PLL 构成的具有内置时钟的三步式混合结构 TDC, 如图 4 所示。考虑到参考时钟频率会影响系统的分辨率和动态范围, 当分辨率达到 ps 量级时, 时钟的抖动会直接影响测量的精

度和线性度, 为此本实验采用基于压控振荡器 (VCO) 的三阶 II 型锁相环为系统提供稳定的时钟。其中, VCO 采用伪差分延迟单元 (delay) 结构来抑制电源及衬底共模噪声的影响, 并在传统伪差分延迟单元的基础上增加 MP5 和 MP6 管, 其栅压由外部偏置电压  $V_b$  进行控制, 不仅能够拓宽 VCO 的频率调谐范围, 还有利于减弱由控制电压  $V_c$  波动造成的时钟抖动。此外,

在每级延迟单元的输出端接入缓冲 BUF 电路来提高时钟驱动能力,可以得到具有低抖动、低相位噪声和占空比接近 50% 的四通道高频分相时钟 (P1、P2、P3、P4)。

TDC 的分辨率由分相时钟的频率和插值器决定,插值器包含对 start 和 stop 信号上升沿分别采样的两个模块,每个模块都由 4 个基本的插值单元 (unit) 组成,插值单元内部采用由传输门 (TG)、D 触发器 (DF) 和延迟线 (delay line) 构成的相位插值结构,通过 start/stop 信号控制传输门的栅极实现对相位状态的锁存,并且 start/stop 信号经过短暂延迟后控制 DF 对传输门的数据进行再次锁存,避免了噪声引起的 DF 状态翻转。在 30 MHz 输入时钟驱动下, VCO 可输出 960 MHz 的四通道高频分相时钟。分相时钟 P1~P4 将时钟周期分成 8 个时间间隔实现 130 ps 的时间分辨率,其中每个时间间隔对应一个相位状态,当 start 或

stop 信号到来时,插值器可以直接锁存其上升沿所处的相位状态。TDC 的动态范围取决于粗计数器量程,粗计数器采用反馈移存型同步计数器,在参考时钟周期不变的情况下可以通过增加计数器位数来提高量程范围。但同步计数器位数的增加会导致时钟驱动能力不足,因此增加了由异步计数器构成的精计数器。精计数器在对分相时钟进行计数的同时完成对高频时钟的分频,利用带负载能力更强的低频时钟可以驱动更多位数的粗计数,并且采用同步加异步的计数方式,相较于单一结构的异步计数器,能获得更快的响应速度。如图 4 所示,设计的 2 bit 精计数器可对 960 MHz 时钟信号 (P1) 进行四分频处理,产生驱动能力更强的 240 MHz 的低频时钟 CP 用于驱动 6 bit 粗计数器。TDC 共输出 16 bit 数据,包含 6 bit 粗计数 D[15:10]、2 bit 精计数 D[9:8]、4 bit stop 相位状态 D[7:4] 以及 4 bit start 相位状态 D[3:0]。

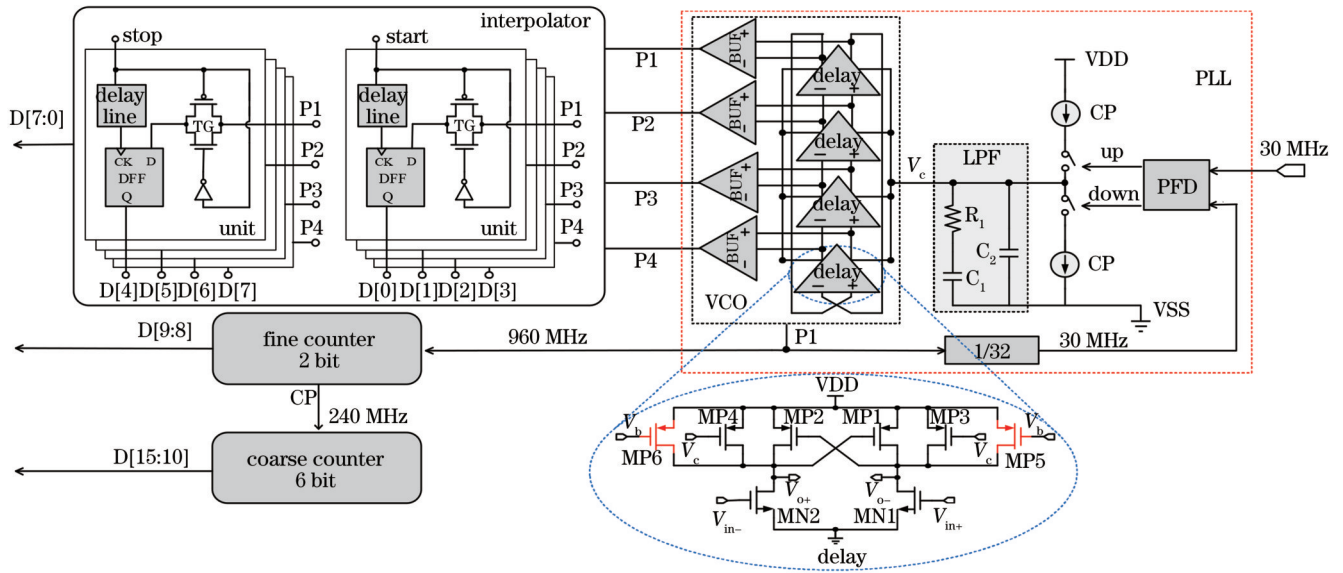


图 4 TDC 读出电路结构

Fig. 4 TDC readout circuit structure

TDC 电路的量化过程如图 5 所示。首先,插值器对 start 上升沿进行采样,得到 4 bit 相位状态 D[3:0] (对应 8 个相位中的第  $m$  个),若高频分相时钟的时钟周期为  $P_{\text{clk}}$ ,则其量化结果为

$$T_{\text{start}} = [(8 - m) / 8] \times P_{\text{clk}} \quad (3)$$

2 bit 精计数器在 start 信号到来之后开始对时钟 P1 进行计数。同时,时钟 P1 经过精计数器四分频得到的时钟 CP 驱动 6 bit 粗计数器进行计数。当 stop 信号到来时,精计数器和粗计数器停止计数,若粗计数器计数值为  $N_c$ ,则粗计数量化结果为

$$T_c = (N_c - 1) \times P_{\text{clk}} \times 4 \quad (4)$$

若精计数器计数值为  $N_f$ ,则精计数量化结果为

$$T_f = (N_f - 1) \times P_{\text{clk}} \quad (5)$$

精计数器和粗计数器停止计数的同时插值器会锁

定 stop 上升沿所对应的 4 bit 相位状态 D[7:4] (对应 8 个相位中的第  $n$  个),其量化结果分别为

$$T_{\text{stop}} = (n / 8) \times P_{\text{clk}} \quad (6)$$

最终得到的 TOF 值可以表示为

$$T_{\text{TOF}} = T_{\text{start}} + T_c + T_f + T_{\text{stop}} \quad (7)$$

若在一个测量周期内没有 stop 信号产生, TDC 电路会持续工作,输出 TOF 值为量程时间,在下一个周期开始时复位信号会将 TDC 电路复位并进行下一次探测。

## 4 测试结果分析与讨论

所提近红外 dTOF 探测器基于 0.18  $\mu\text{m}$  BCD 工艺实现流片,芯片的显微照片如图 6(a) 所示。为保证芯片正常稳定工作,在核心电路及器件周围加入大量

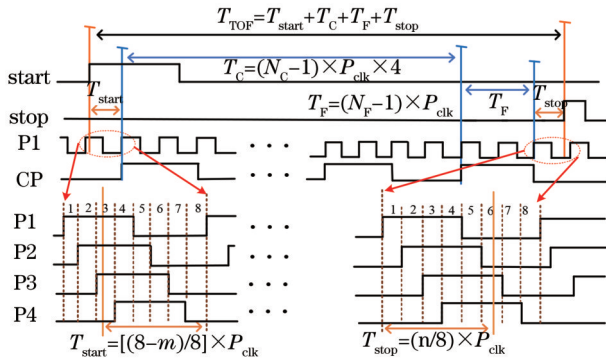


图 5 TDC 电路量化原理

Fig. 5 Measurement principle of the TDC

滤波电容 CAP 来稳压、降噪,并添加 ESD 来保护电路,防止静电效应的影响。芯片包含 16 个 SPAD 和模

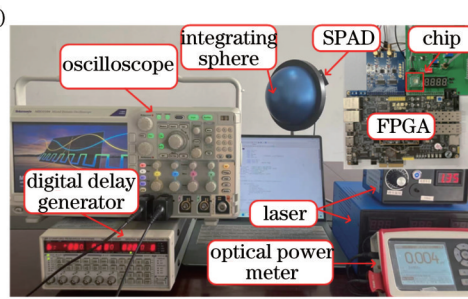
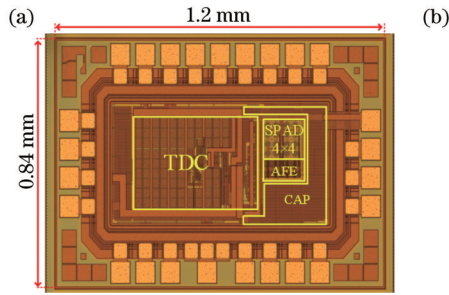


图 6 芯片及测试环境。(a)芯片显微照片;(b)测试平台

Fig. 6 Chip and test setup. (a) Micrograph of the chip ; (b) test platform

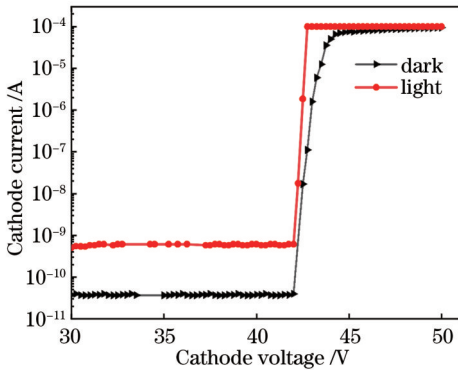


图 7 I-V 直流特性曲线

Fig. 7 I-V DC characteristic curves

SPAD 器件的 DCR 和 AP 的测试均在无光环境下通过 FPGA 统计 SPAD 输出的雪崩脉冲数量得到。其中,DCR 由多次 1 s 内计数得到的雪崩脉冲的平均数确定,而大多数后脉冲事件出现在雪崩发生后的最初几  $\mu\text{s}$  内,其概率可以通过记录数百万次雪崩脉冲时间间隔形成的直方图统计获得<sup>[19]</sup>。器件的暗计数噪声主要由非平衡载流子热产生-复合、缺陷辅助隧穿和带-带隧穿 3 种机制产生,带-带隧穿仅在 5 V 以上的高过偏压下才会发生,而热产生-复合和缺陷辅助隧穿机制分别与温度和过偏压呈正相关。图 8(a)显示了器件在不同温度及过偏压下的 DCR 变化曲线,可以看

出,随着过偏压的升高,器件的 DCR 没有发生明显的退化,表明隧穿效应对暗计数的贡献较小。在给定的过偏压下,当温度由 24  $^{\circ}\text{C}$  升至 70  $^{\circ}\text{C}$  时,DCR 显著增大,说明该器件的主要暗计数噪声来源是与温度相关的热产生-复合机制。从整体上看,该器件在温度低于 70  $^{\circ}\text{C}$  时,DCR 整体低于 1.3 kHz,并且在 5 V 高的过偏压下,24  $^{\circ}\text{C}$  室温时 DCR 小于 200 Hz,表现出较低的暗计数水平。后脉冲事件与器件自身固有的深能级缺陷有关,由于所提结构采用较深的雪崩区,雪崩区附近的缺陷密度低,同时其受到表面高浓度界面态的影响非常小,后脉冲事件发生的概率相对较小。图 8(b)显示了室温下 SPAD 后脉冲概率随过偏压的变化关系,在 5 V 过偏压下仅为 0.92%。从 DCR 和 AP 的测试结果可以看出,该器件具有优异的噪声性能。

#### 4.1 SPAD 器件测试

使用 Keithley 4200A-SCS 半导体参数分析仪测量得到的 SPAD 反向 I-V 特性如图 7 所示。在无光条件下,SPAD 反向饱和电流即暗电流仅为  $3.7 \times 10^{-11}$  A;在有光条件下,由于电路中产生了光生载流子,器件反向饱和电流比无光时高一个数量级。在有光和无光条件下,SPAD 器件的雪崩击穿电压都在 42.5 V 左右,而有光时器件雪崩电流随偏压的上升趋势更加陡峭,测试结果与仿真结果具有很好的一致性。

为了测量 SPAD 器件的 PDP,将波长范围为 405~940 nm 的激光通过光纤传送到积分球(integrating sphere),积分球会将光均匀散射到器件表面和光功率计的探头。光功率计可以校准总入射光功率到 nW 级,从而保证 SPAD 器件工作在单光子状态,避免因入射光子数量过多而发生堆叠效应。器件 PDP( $R_{\text{PDP}}$ )可表示为

$$R_{\text{PDP}} = \frac{N_{\text{light}} - N_{\text{DCR}}}{N}, \quad (8)$$

式中: $N_{\text{light}}$ 和 $N_{\text{DCR}}$ 分别表示 SPAD 器件在光照和暗条

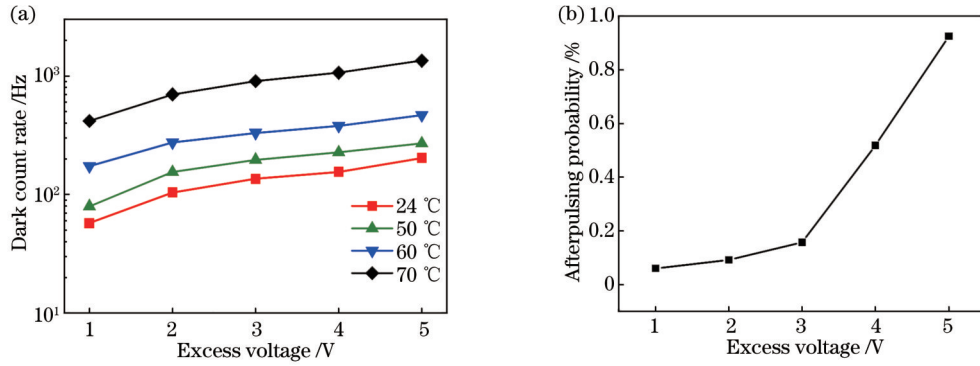


图 8 DCR 及后脉冲概率的测试结果。(a)不同温度下 DCR 随电压的变化;(b)室温下后脉冲概率随电压的变化

Fig. 8 Test results of DCR and afterpulsing probability. (a) DCR versus excess voltage at different temperatures; (b) afterpulsing probability versus excess voltage at room temperature

件下 1 s 内的雪崩脉冲计数;  $N$  为总入射光子数。  $N$  计算方法为

$$N = \frac{P \times t}{E_{\text{photon}}} \times \frac{P_{\text{SPAD}}}{S_A}, \quad (9)$$

式中:  $P$  为光功率计测得的光功率;  $t$  为测量时间(本实验的测量时间为 1 s);  $E_{\text{photon}}$  为单个光子能量;  $S_{\text{SPAD}}$  为 SPAD 器件有源区面积;  $S_A$  为光功率计探头面积。

PDP 测量结果如图 9 所示。当过偏压大于 2 V 时, PDP 在 450~780 nm 波长范围内均大于 15%; 当过偏压为 5 V 时, 器件在 600 nm 处的 PDP 峰值达到 43.3%。此外, 由于器件具有深结的雪崩倍增区, 对 780~940 nm 的近红外光子的响应灵敏度也得到显著增强, PDP 在 905 nm 处依然能够大于 7.6%。测试结果证明了该 SPAD 具有宽光谱响应范围, 可以工作在人眼阈值较高的近红外短波波段。

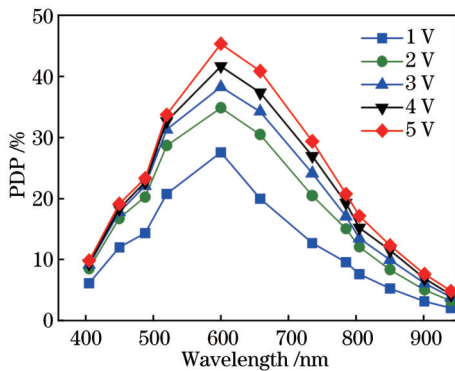


图 9 PDP 对光子波长的响应曲线

Fig. 9 PDP as a function of photon wavelength

将所设计 SPAD 器件的近红外 PDP 和 DCR 的性能与已有报道的先进成果<sup>[10-12,19-21]</sup>进行了对比, 结果如图 10 所示。可以看到: 除了文献[9]的背照式器件外, 传统光子正面入射的器件在 905 nm 处的 PDP 通常小于 6%; 所设计的器件在 905 nm 处的 PDP 能够达到 7.6%, 优于其他成果, 并且表现出低的暗计数噪声。

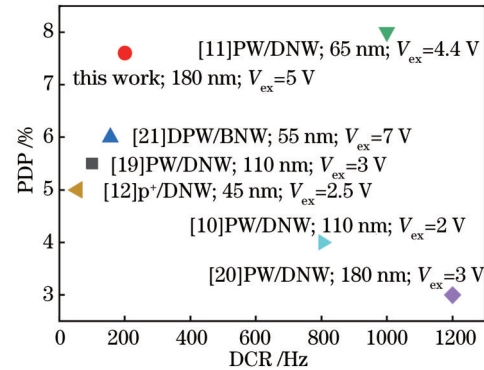


图 10 不同 SPAD 器件在 905 nm 处的 PDP 和 DCR 性能比较  
Fig. 10 Comparison of PDP and DCR properties for different SPADs at 905 nm

#### 4.2 dTOF 读出电路测试

dTOF 读出电路静态特性的测试参数包括动态范围、时间分辨率和非线性误差。其中动态范围和时间分辨率可以通过构建传递特性曲线表示, 根据传递特性曲线可以求得非线性误差。传递特性曲线的具体测试方法为: 首先, 利用数字延时器将 start 和 stop 信号的时间间隔以 4.16 ns 为步进时长, 检测读出电路的动态范围; 然后, 选取几个关键时间为起点, 按照同样的方法以 5 ps 为步进时长, 记录输出结果跳变时所对应的输入时间间隔, 两个跳变点的时间间隔为实际时间分辨率。测得的传递曲线如图 11 所示, 由于存在电源波动、时钟抖动、器件失配等非理想因素, 实际传递曲线与理想结果存在一定误差。在评估系统的非线性误差时, 以 107~111.5 ns 分辨率测试获取的所有数据为基础, 得到图 12 所示的差分非线性度 (DNL) 和积分非线性度 (INL) 曲线。结果显示, DNL 和 INL 分别在  $-0.88 \sim 0.81$  LSB 和  $-0.92 \sim 0.58$  LSB (1 LSB = 130 ps) 范围内变化, 表明读出电路的传递特性保持单调特性, 误差波动范围较小。

为了研究非理想条件下 dTOF 探测器量化结果的稳定性, 通过外部输入固定时间间隔的 start 和 stop 信

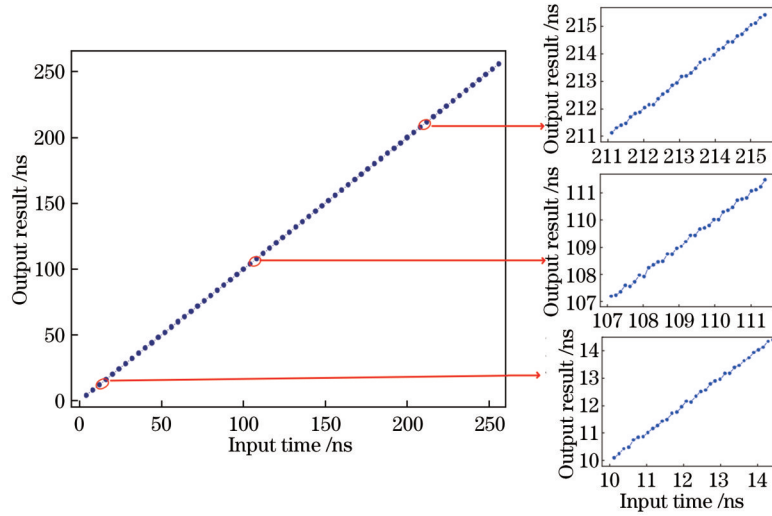


图 11 TDC 传递特性曲线

Fig. 11 Transfer curve of the TDC

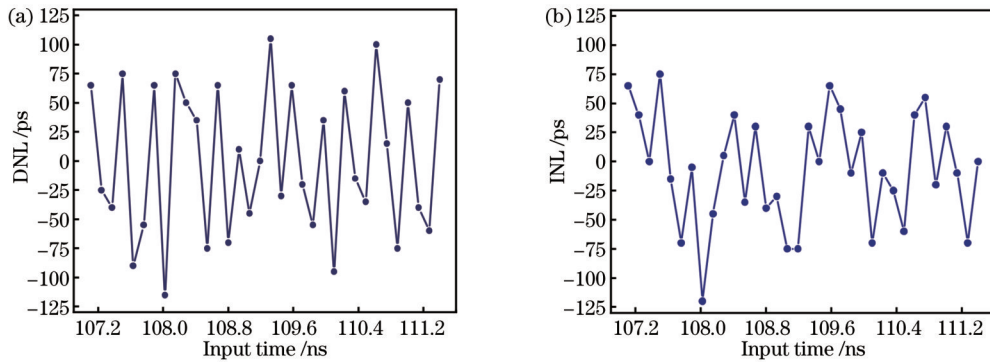


图 12 TDC 非线性误差。(a)DNL 曲线；(b)INL 曲线

Fig. 12 Nonlinear errors of the TDC. (a) DNL curve; (b) INL curve

号进行读出电路动态特性测试。图 13(a)显示了 80 ns TOF 值的仿真结果与实测结果的对比。由于传输路径不同, start 和 stop 信号的传输时延存在差异, 测试结果与实际 TOF 值存在一定的偏差, 因此在后续数据处理中可将其作为固定时延偏差进行补偿。此外, 受电源噪声以及信道之间串扰的影响, 探测器每次量化的结果会存在差异, 这种差异可以通过重复

测量恒定的 TOF 值并计算测量结果的均方根 (RMS) 误差即单射精度 (precision) 进行表征。图 13 (b) 显示了对 80 ns TOF 值进行约 1000 次测量时得到的单射精度统计直方图。可以看到: 测试结果呈高斯分布, 对峰值数据 (79.682 ns) 进行固定误差补偿之后, 其结果接近实际 TOF 值; 多次测量得到的 RMS 误差仅为 188 ps。

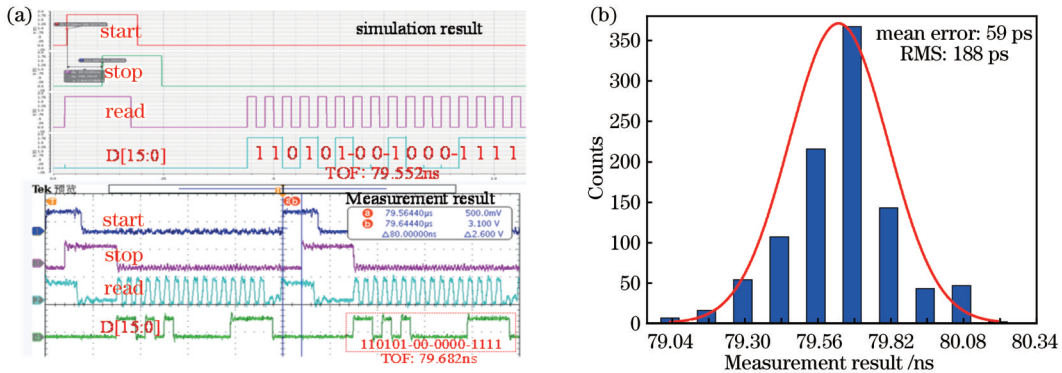


图 13 动态特性测试。(a)瞬态输出波形；(b)单射精度

Fig. 13 Dynamic characteristics test. (a) Transient output waveform; (b) sing-shot precision

表 1 对比了近期报道的几种 dTOF 探测器的关键性能。可以看出,所提出的 SPAD 器件具有优越的性能,实现了高于其他研究成果的 PDP 峰值和较低的暗计数。所设计的 TDC 读出电路在保持相对较小的时

间分辨率的情况下达到了较大的动态范围,并且动态范围可以根据时钟的实际驱动能力增加粗计数位数来进一步扩展。同时,TDC 的其他性能参数如线性度和单射精度等都控制在合理的范围内。

表 1 dTOF 探测器关键性能对比  
Table 1 Key performance comparisons of dTOF detectors

| Ref.                    | [1]     | [20]       | [22]     | [23]     | This work  |
|-------------------------|---------|------------|----------|----------|------------|
| Technology node /nm     | 150     | 180        | 40       | 65       | 180        |
| Wavelength /nm          | 470     | 905        | 685      | 940      | 905        |
| PDP peak@wavelength /nm | 31%@450 | 30%@500    | 34%@560  | —        | 45%@600    |
| DCR /Hz@ $V_{ex}$ /V    | 360@2.5 | 1200@3     | 0.25@1.5 | 92@3     | 200@5      |
| TDC depth /bit          | 8       | 13         | 12       | 10       | 16         |
| Resolution /ps          | 210.2   | 200        | 120      | 97.65    | 130        |
| DNL /LSB                | 1.28    | -0.29-0.24 | -0.5-0.5 | -0.4-0.6 | -0.88-0.81 |
| INL /LSB                | 1.92    | -2.53-1.02 | -2-4     | -0.4-0.7 | -0.92-0.58 |
| Dynamic range /ns       | 53      | 133        | 491      | 100      | 258        |
| Precision /ps           | 240     | —          | 208      | —        | 188        |

## 5 结 论

采用 0.18  $\mu\text{m}$  BCD 工艺设计了一款基于 SPAD 的近红外高分辨率 dTOF 探测器。SPAD 器件利用高压 p 阱/n<sup>+</sup>埋层形成深结结构,并采用外延层作为虚拟保护环,不但提高了对近红外光子的探测概率,而且降低了暗计数率。所设计的三步式混合结构 TDC 利用具有低抖动且分相均匀的内置 PLL 实现了 130 ps 的分辨率和 258 ns 的动态范围。测试结果表明,在 5 V 过偏压下 SPAD 器件峰值 PDP 高达 45%,并且 905 nm 处的 PDP 大于 7.6%。与已有先进器件相比,该器件在对近红外光子实现高探测概率的同时保持相对较低的暗计数噪声水平。此外,TDC 读出电路也获得了较高的线性度,测得的 DNL 为 -0.88~0.81 LSB,INL 为 -0.92~0.58 LSB。探测器在 TOF 为 80 ns 的单射精度测试中得到的抖动半峰全宽仅有 293 ps。综上,所提出的器件和读出电路具有良好的性能,可为后续设计具有高效率、高分辨率和宽动态范围的大阵列探测器提供参考。

## 参 考 文 献

- Zarghami M, Gasparini L, Parmesan L, et al. A 32×32-pixel CMOS imager for quantum optics with per-SPAD TDC, 19.48% fill-factor in a 44.64- $\mu\text{m}$  pitch reaching 1-MHz observation rate[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2020, 55(10): 2819-2830.
- 张汉熠, 赵新宇, 张益成, 等. 单光子激光雷达研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(19): 1910003.  
Zhang H Y, Zhao X Y, Zhang Y C, et al. Research progress of single photon lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(19): 1910003.
- 刘俊良, 许伊宁, 董亚魁, 等. 集成型快速主动淬灭 InGaAsP 近红外单光子探测器[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1212002.  
Liu J L, Xu Y N, Dong Y K, et al. Integrated InGaAsP near-
- infrared single-photon detector with fast active quenching[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1212002.
- Sun W B, Wang Y X, Liu M L, et al. A back-illuminated 4  $\mu\text{m}$  P<sup>+</sup>N-well single photon avalanche diode pixel array with 0.36 Hz/ $\mu\text{m}^2$  dark count rate at 2.5 V excess bias voltage[J]. IEEE Electron Device Letters, 2022, 43(9): 1519-1522.
- Piron F, Morrison D, Yuce M R, et al. A review of single-photon avalanche diode time-of-flight imaging sensor arrays[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(11): 12654-12666.
- Gyongy I, Dutton N A W, Henderson R K. Direct time-of-flight single-photon imaging[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2022, 69(6): 2794-2805.
- Vornicu I, Carmona-Galán R, Rodríguez-Vázquez Á. Arrayable voltage-controlled ring-oscillator for direct time-of-flight image sensors[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2017, 64(11): 2821-2834.
- 吴仲, 孙飞阳, 袁丰, 等. 近红外单光子激光雷达人眼安全分析[J]. 激光与红外, 2019, 49(1): 20-25.  
Wu Z, Sun F Y, Yuan F, et al. Human eye safety analysis of near-infrared single photon laser radar[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(1): 20-25.
- Veerappan C, Charbon E. A substrate isolated CMOS SPAD enabling wide spectral response and low electrical crosstalk[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(6): 299-305.
- Shin D, Park B, Chae Y, et al. The effect of a deep virtual guard ring on the device characteristics of silicon single photon avalanche diodes[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(7): 2986-2991.
- Lindner S, Pellegrini S, Henrion Y, et al. A high-PDE, backside-illuminated SPAD in 65/40-nm 3D IC CMOS pixel with cascaded passive quenching and active recharge[J]. IEEE Electron Device Letters, 2017, 38(11): 1547-1550.
- Lee M J, Ximenes A R, Padmanabhan P, et al. High-performance back-illuminated three-dimensional stacked single-photon avalanche diode implemented in 45-nm CMOS technology[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(6): 3801809.
- Hamza A, Ibrahim S, El-Nozahi M, et al. A low-power, 9-bit, 1.2 ps resolution two-step time-to-digital converter in 65 nm CMOS[C]//2015 IEEE 13th International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS), June 7-10, 2015, Grenoble,



- France. New York: IEEE Press, 2015.
- [14] Luca P, Dutton N, Krstajic N, et al. A  $256 \times 256$  SPAD array with in-pixel time to amplitude conversion for fluorescence lifetime imaging microscopy[EB/OL]. [2023-02-04]. [https://www.imagesensors.org/Past%20Workshops/2015%20Workshop/2015%20Papers/Sessions/Session\\_9/9-04\\_Parmesan.pdf](https://www.imagesensors.org/Past%20Workshops/2015%20Workshop/2015%20Papers/Sessions/Session_9/9-04_Parmesan.pdf).
- [15] Crotti M, Rech I, Ghioni M. Four channel, 40 ps resolution, fully integrated time-to-amplitude converter for time-resolved photon counting[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2012, 47(3): 699-708.
- [16] Cheng Z, Deen M J, Peng H. A low-power gateable vernier ring oscillator time-to-digital converter for biomedical imaging applications[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2016, 10(2): 445-454.
- [17] 张维宇, 汪洋, 金湘亮. 双波峰响应 CMOS 单光子探测器的设计与优化[J]. 光学学报, 2021, 41(17): 1704001.  
Zhang W Y, Wang Y, Jin X L. Design and optimization of double-wave-peak response CMOS single-photon detector[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(17): 1704001.
- [18] 韩冬, 孙飞阳, 鲁继远, 等. 采用多晶硅场板降低单光子雪崩二极管探测器暗计数[J]. 物理学报, 2020, 69(14): 148501.  
Han D, Sun F Y, Lu J Y, et al. Reducing dark count of single-photon avalanche diode detector with polysilicon field plate[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(14): 148501.
- [19] Vornicu I, López-Martínez J M, Bandi F N, et al. Design of high-efficiency SPADs for LiDAR applications in 110 nm CIS technology[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(4): 4776-4785.
- [20] Hu J, Liu B Z, Ma R, et al. A  $32 \times 32$ -pixel flash LiDAR sensor with noise filtering for high-background noise applications [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I, 2022, 69(2): 645-656.
- [21] Gramuglia F, Keshavarzian P, Kizilkan E, et al. Engineering breakdown probability profile for PDP and DCR optimization in a SPAD fabricated in a standard 55 nm BCD process[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2021, 28(2): 3802410.
- [22] Henderson R K, Johnston N, Mattioli Della Rocca F, et al. A  $192 \times 128$  time correlated SPAD image sensor in 40-nm CMOS technology[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2019, 54(7): 1907-1916.
- [23] Zhang C, Zhang N, Ma Z J, et al. A  $240 \times 160$  3D-stacked SPAD dToF image sensor with rolling shutter and in-pixel histogram for mobile devices[J]. IEEE Open Journal of the Solid-State Circuits Society, 2021, 2: 3-11.

## Silicon-Based High-Sensitivity Near-Infrared Single-Photon dTOF Detector

Wang Shuaikang<sup>1</sup>, Liu Danlu<sup>1</sup>, Chen Qianyu<sup>1</sup>, Han Dong<sup>1</sup>, Wang Jiayuan<sup>1</sup>, Xu Yue<sup>1,2\*</sup>,  
Cao Ping<sup>3</sup>

<sup>1</sup>College of Integrated Circuit Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,  
Nanjing 210023, Jiangsu, China;

<sup>2</sup>National and Local Joint Engineering Laboratory of RF Integration & Micro-Assembly Technology, Nanjing  
210023, Jiangsu, China;

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics Technology, Hefei 244199, Anhui, China

### Abstract

**Objective** Owing to outstanding advantages such as small size, low power consumption, and high time resolution, direct time of flight (dTOF) detectors have attracted great interest in numerous fields, including automotive driving, facial recognition, augmented and virtual reality (AR/VR), and 3D imaging. Such systems exploit a fast on-chip time-to-digital converter (TDC) in conjunction with single-photon avalanche diode (SPAD) to measure the TOF value, which can achieve high interference immunity and wide dynamic range. Currently, they are rapidly developing towards the direction of low-cost and high integration density compatible with the silicon-based process. However, some problems still exist in practical applications, such as the low safety threshold of human eyes and mutual restriction between resolution and dynamic range. To this end, we implement a near-infrared single-photon dTOF detector with high sensitivity, high time resolution, and wide dynamic range based on 0.18  $\mu\text{m}$  Bipolar-CMOS-DMOS (BCD) technology.

**Methods** The detector is mainly composed of a TDC circuit, 16 SPADs, and an analog front-end (AFE) circuit that is coupled with each SPAD (Fig. 3). The integrated SPAD device (Fig. 1) adopts a new structure with a deep high-voltage p well (HVPW)/buried  $n^+$  junction as avalanche multiplication region to significantly improve the near-infrared photon detection probability (PDP). A certain distance is set aside between the high-voltage n well (HVNW) and HVPW, and is the guard ring width ( $d_{\text{GRW}}$ ). The virtual guard ring formed by the low doping p-type epitaxial layer helps lower the dark count noise. The proposed SPAD devices with  $d_{\text{GRW}}$  is 0.5, 1.5, 2.5, and 3.5  $\mu\text{m}$  respectively are simulated by technology computer-aided design (TCAD) based on 0.18  $\mu\text{m}$  BCD technology to study the influence of  $d_{\text{GRW}}$  on device performance (Fig. 2). The simulation results show that the device can work normally at  $d_{\text{GRW}} = 2.5 \mu\text{m}$ , and the high avalanche field can be obtained to ensure a higher detection probability for near-infrared photons. Meanwhile, the low field in the guard ring region can avoid the dark count noise caused by the carriers generated at the shallow trench isolation (STI)

interface. In the readout circuit, the AFE circuits are directly connected with the SPADs to cut off avalanche current and generate narrow pulses. These narrow avalanche pulses are combined by OR tree into one signal which is fed into TDC as a stop signal. Furthermore, a three-step hybrid TDC consisting of the coarse counter, fine counter, interpolator, and phase-locked loop (PLL) is designed to obtain high time resolution and wide dynamic range (Fig. 4). The PLL is a third-order type-II loop and the voltage-controlled oscillator (VCO) is composed of a four-stage ring oscillator to offer four-channel multi-phase clocks (P1, P2, P3, and P4) with low jitter, low phase noise, and uniform phase distribution. The fine counter adopting an asynchronous counter can not only count the clock number of P1 but also generate a lower frequency clock to drive the coarse counter. The coarse counter driven by a lower frequency clock adopts a synchronous counter with a linear feedback shift register structure, which can easily expand the dynamic range by increasing the number of counter bits. The start/stop interpolator employs D flip-flop and transmission gate (TG) to latch the state of four-channel multi-phase clocks when the rising edge of the start and stop signal arrives, achieving a high resolution which is  $1/8$  period of the clock P1.

**Results and Discussions** The proposed dTOF detector is fabricated in the  $0.18\ \mu\text{m}$  BCD technology and its electrical and optical properties are verified. The  $I$ - $V$  characteristic of the SPAD is firstly measured with avalanche breakdown voltage of around  $42.5\ \text{V}$ , which matches well the TCAD simulation results (Fig. 7). DCR measurement results (Fig. 8) show that the DCR variation with temperature is not obvious and the overall level is lower than  $1\ \text{kHz}$  when the temperature is below  $60\ ^\circ\text{C}$ . More importantly, the data demonstrates excellent performance of  $200\ \text{Hz}$  at  $24\ ^\circ\text{C}$  and  $5\ \text{V}$  excess bias voltage ( $V_{\text{ex}}$ ). The PDP measurements (Fig. 9) reveal that the PDP reaches a peak of  $43.3\%$  ( $600\ \text{nm}$ ) at  $V_{\text{ex}}=5\ \text{V}$ . Additionally, due to the deep avalanche region, there is a higher response sensitivity for near-infrared photons ( $780$ – $940\ \text{nm}$ ), and a PDP of  $7.6\%$  is obtained at  $905\ \text{nm}$ . The measurement is performed by the external triggering to evaluate the dTOF readout circuit performance. Driven by a  $30\ \text{MHz}$  clock, the dTOF readout circuit can achieve a high resolution of  $130\ \text{ps}$  and a dynamic range of  $258\ \text{ns}$  (Fig. 11), with a differential nonlinearity (DNL) and integral nonlinearity (INL) less than  $\pm 1\ \text{LSB}$  ( $1\ \text{LSB}=130\ \text{ps}$ ) respectively (Fig. 12). In addition, the precision of the proposed detector has also been evaluated by carrying out almost  $1000$  consecutive single-shot measurement for different fixed TOF values. The measured results show that the statistic histogram of the fixed TOF ( $80\ \text{ns}$ ) presents Gaussian distribution and the peak histogram data matches well with the actual TOF (Fig. 13).

**Conclusions** A near-infrared single-photon dTOF detector with high sensitivity, high time resolution, and wide dynamic range is implemented by the  $0.18\ \mu\text{m}$  BCD technology. The test results show that at  $V_{\text{ex}}=5\ \text{V}$ , the PDP peak of the SPAD reaches  $45\%$ , the near-infrared PDP at the  $905\ \text{nm}$  wavelength is larger than  $7.6\%$ , and the dark count rate (DCR) is as low as  $200\ \text{Hz}$ . Furthermore, the TDC circuit driven by multi-phase clocks with low jitter, low phase noise, and uniform phase distribution achieves a high resolution of  $130\ \text{ps}$  and a dynamic range of  $258\ \text{ns}$  with excellent linearity. The proposed dTOF detector features a high safety threshold for human eyes, high sensitivity, low noise, and high linearity, which is suitable for the application of low-cost and high-precision lidar systems.

**Key words** detector; direct time of flight (dTOF); single-photon avalanche diode (SPAD); photon detection probability (PDP); dark count rate (DCR); time-to-digital converter (TDC)