

doi: 10.3788/gzxb20174608.0823001

# 高光电探测效率 CMOS 单光子雪崩二极管器件

王巍<sup>1</sup>, 陈婷<sup>1,2</sup>, 李俊峰<sup>2</sup>, 何雍春<sup>1</sup>, 王冠宇<sup>1</sup>, 唐政维<sup>1</sup>, 袁军<sup>1</sup>, 王广<sup>1</sup>

(1 重庆邮电大学 光电工程学院/国际半导体学院, 重庆 410065)

(2 中科院微电子所十室, 北京 100029)

**摘 要:** 基于 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS 工艺技术, 制作了单光子雪崩二极管, 可对 650~950 nm 波段的微弱光进行有效探测. 该器件采用 P<sup>+</sup>/N 阱结构, P<sup>+</sup> 层深度较深, 以提高对长光波的光子探测效率与响应度; 采用低掺杂深 N 阱增大耗尽层厚度, 可以提高探测灵敏度; 深 N 阱与衬底形成的 PN 结可有效隔离衬底, 降低衬底噪声; 采用 P 阱保护环结构以预防过早边缘击穿现象. 通过理论分析确定器件的基本结构参数及工艺参数, 并对器件性能进行优化设计. 实验结果表明, 单光子雪崩二极管的窗口直径为 10  $\mu\text{m}$ , 器件的反向击穿电压为 18.4 V 左右. 用光强为 0.001 W/cm<sup>2</sup> 的光照射, 650 nm 处达到 0.495 A/W 的响应度峰值; 在 2V 的过偏压下, 650~950 nm 波段范围内光子探测效率均高于 30%, 随着反向偏压的适当增大, 探测效率有所提升.

**关键词:** 单光子雪崩二极管; 标准 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS 工艺; 深 N 阱; 保护环; 击穿特性; 响应度; 光子探测效率

中图分类号: TN364

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)08-0823001-7

## The Research of High Photon Detection Efficiency CMOS Single Photon Avalanche Diode

WANG Wei<sup>1</sup>, CHEN Ting<sup>1,2</sup>, LI Jun-feng<sup>2</sup>, HE Yong-chun<sup>1</sup>, WANG Guan-yu<sup>1</sup>,  
TANG Zheng-wei<sup>1</sup>, YUAN Jun<sup>1</sup>, WANG Guang<sup>1</sup>

(1 International Institute of Semiconductors/College of Electronics Engineering, Chongqing University of Posts and  
Telecommunications, Chongqing 400065, China)

(2 Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** A single photon avalanche diode designed with 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS technology is proposed, with which the weak light in 650~950 nm wavelength can effectively detected. The single photon avalanche diode employs a P<sup>+</sup>/N-well structure, the deeper P<sup>+</sup> layer is designed to improve the photon detection efficiency and responsivity in longer light wave; moreover, the increase of the thickness of depletion layer can be got with the use of the low doped deep N well, which can improve the detection sensitivity, and the PN junction formed by deep N well and substrate can effectively isolate substrate in order to reduce substrate noise. The use of P-well as the protection ring can prevent premature edge breakdown phenomenon. The basic structural parameters and process parameters of single photon avalanche diode devices are determined by theoretical analysis, and the device performance is optimized with Silvaco TCAD software. The simulation results show that when the optical window diameter of the device is 10  $\mu\text{m}$ , the avalanche breakdown voltage is 18.4 V, with the illumination of 0.001 W/cm<sup>2</sup>, the peak of response is of 0.495 A/W at 650 nm will be got. when the reverse bias is exceeded the breakdown voltage for 2 V, in the range of 650~950 nm wavelength, the photon detection efficiency is higher than 30%.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61404019)资助

第一作者: 王巍(1967-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为半导体光电、集成电路设计. Email: wangwei@cqupt.edu.cn

收稿日期: 2017-02-10; 录用日期: 2017-06-10

<http://www.photon.ac.cn>

With the increase of reverse bias, the detection efficiency is improved.

**Key words:** Single Photon Avalanche Diode (SPAD); Standard 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS process; Deep n-well; Guard ring; Breakdown characteristics; Responsivity; Photon detection efficiency

**OCIS Codes:** 230.5170; 040.0040; 040.5160; 040.6040; 250.1345

## 0 引言

随着非破坏性和非侵入性光学测量技术的发展,单光子探测技术在光通信、天文学、国防军事与医学成像等方面的应用越发广泛<sup>[1]</sup>.通过监测人脑功能的临床影像学被视为诊断和研究中风、癫痫等各类神经系统疾病的最有效技术之一<sup>[2]</sup>,常用的无创性影像学技术有脑电图(electro-encephalography)、磁脑电图(magneto-encephalography)、正电子发射计算机断层扫描(Positron Emission Tomography, PET)、功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging)和近红外光谱(Near-Infrared Spectroscopy, NIRS)等.对脑部功能的研究主要是对神经元信号与血流动力学信号的追踪,而在现有的神经成像系统中,近红外光谱是唯一能将这两种信号都捕获的脑部成像技术<sup>[3]</sup>.

功能近红外光谱(Functional Near Infra-Red Spectroscopy, FNIRS)利用血液的主要成分对650~950 nm波段光良好的散射性,可获得大脑活动时氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白的变化情况,能提供一种无创、低成本且便携式的光学成像技术对脑部功能及生物组织进行检测,是一种安全的微创技术.但入射的光被脑组织大量衰减(约7~9个数量级)<sup>[4]</sup>,极微弱的光此时会离散成单光子,因此近红外光谱前端接收器研究中最重要的一部分是要设计具有高灵敏度的光电探测器,能对反射后的微弱光实现最大化的探测,将微弱的光信号转化为可探测的电信号.

雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)的内部增益与偏压有关,能通过雪崩倍增大光生信号<sup>[5]</sup>,实现对微弱光的探测,满足脑部成像对探测器的基本要求.工作在盖革模式下的APD反向偏压高于击穿电压,叫做单光子雪崩二极管(Single Photon Avalanche Diode, SPAD),具有较高的光子探测效率和时间分辨率.2008年,N. Faramarzpour等人<sup>[6]</sup>研究了基于0.18  $\mu\text{m}$  CMOS SPAD,重点分析了器件的击穿特性等性能,通过结构优化,获得10.2 V的较低击穿电压.2009年,D. Stoppa等人<sup>[7]</sup>设计了可应用于时间分辨荧光测量的SPAD器件,在4 V过偏压下,其探测效率可达32%.2013年,V. Savuskan等人<sup>[8]</sup>对0.18  $\mu\text{m}$  CMOS工艺技术下具有高灵敏度及光电转换能力的SPAD进行研究,在760 nm波段处获得20%的光子探测效率.2014年,K Jradi等人<sup>[9]</sup>报道基于0.35  $\mu\text{m}$  CMOS工艺技术下的SPAD探测器,据研究可知加上保护环后击穿电压提高到35 V,在0.4 V的过偏压下410~640 nm范围内的量子效率均高于50%.2016年,I. Malass等人<sup>[10]</sup>针对不同窗口尺寸对SPAD器件性能的影响情况进行分析,研究表明窗口尺寸大小会影响探测效率与器件响应速度,窗口直径为10  $\mu\text{m}$ 时的峰值探测效率约为14%,随尺寸的增大探测效率会有所提高,但增大到一定程度后其影响程度逐渐减弱.

早前研究的CMOS SPAD的光谱响应峰值主要集中在蓝绿光区<sup>[11-14]</sup>,而脑部成像要求SPAD能对650~950 nm波段范围内的微弱光信号进行探测.因而本文提出一种基于P<sup>+</sup>/N阱结构的SPAD,并对器件结构进行优化,以提高器件在长波段的光谱响应度及光子探测效率.

## 1 SPAD 器件结构设计

在0.18  $\mu\text{m}$  CMOS工艺技术下所设计的SPAD器件结构如图1.采用P<sup>+</sup>/深N阱双二极管结构,以在不损害量子效率的前提下大大减小光电探测器的响应时间,其中区域1的P<sup>+</sup>/深N阱作为工作二极管,形成高场倍增区,区域2的深N阱/P衬底作为屏蔽二极管,阻止衬底的光生载流子扩散至PN结,减少了衬底慢光生载流子扩散对光电探测器响应速度的影响<sup>[15-16]</sup>.

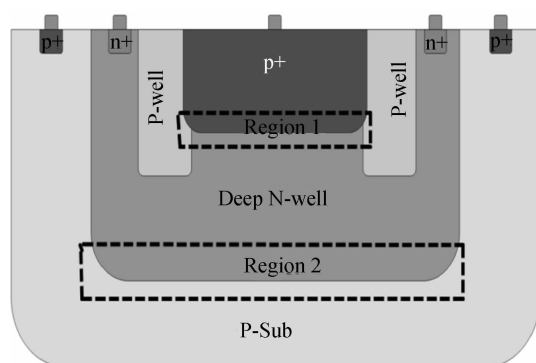


图1 SPAD 截面

Fig. 1 Cross section of the SPAD structure

提高探测器在红光与近红外波段的灵敏度,有利于改善生物荧光寿命成像和光学断层扫描的质量,长波长的光能够减少细胞损伤并且能更加深入组织<sup>[17]</sup>.研究表明,SPAD的耗尽区宽度比较小时,其检测效率较低<sup>[18]</sup>.为使所设计的SPAD可在650~950 nm波段内工作,从器件结构的优化设计入手,适当加深P<sup>+</sup>层厚度,以提高器件对较长光波的灵敏度,同时适当降低深N阱掺杂浓度,增大耗尽层厚度,提高器件在长波段的吸收效率<sup>[19]</sup>.

边缘过早击穿会造成器件损坏,为了预防过早的边缘击穿现象,一般采用保护环结构<sup>[20]</sup>,在PN结边缘区进行低掺杂处理,以改变倍增层区域的电场分布,从而阻止过早边缘击穿现象的发生.本文采用P阱保护环结构,E. Kamrani等人<sup>[5]</sup>的研究表明,带有P阱保护环的APDs有更好的吸收效率.

根据理论分析及0.18 μm CMOS的工艺参数,本文所设计的SPAD结构光窗口直径为10 μm,其他主要工艺参数见表1.

表1 主要工艺参数  
Table 1 Key technological parameters

| Layer                | Doping/cm <sup>-3</sup> | Depth/μm |
|----------------------|-------------------------|----------|
| P-sub                | 1.21×10 <sup>15</sup>   | -        |
| Deep N-well          | 6×10 <sup>16</sup>      | 3.0      |
| P-well               | 1×10 <sup>17</sup>      | 2.5      |
| P <sup>+</sup> anode | 5×10 <sup>19</sup>      | 2.0      |

## 2 仿真结果与分析

### 2.1 器件电场分布

由图2可知,在24 V的反向偏压下,pn结边缘的电场强度低于中心区域,说明保护环能够有效地预防过早的边缘击穿现象,使APD可在盖革模式下正常运行,并且PN结处的电场强度约为5.55×10<sup>5</sup> V/cm,小于1×10<sup>6</sup> V/cm,因此也不会发生齐纳击穿现象.

### 2.2 I-V 特性分析

过高的深N阱浓度会使击穿电压过高,影响器件寿命,过低的深N阱掺杂浓度会降低击穿电压,最终导致耗尽区电场很低,不足以维持碰撞电离过程,雪崩击穿现象无法发生,因此需要合理选择深N阱掺杂浓度.根据文献调研<sup>[21-22]</sup>,深N阱浓度多在1×10<sup>16</sup> cm<sup>-3</sup>~1×10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup>选取,考虑到本文器件在650~950 nm波段范围内的灵敏度要求,以及较低的击穿电压特性,结合图3的仿真分析,在暗电流相差不大情况下,选取6×10<sup>16</sup> cm<sup>-3</sup>作为深N阱区的掺杂浓度,这样既不会影响器件的寿命,也不会使探测效率过低.

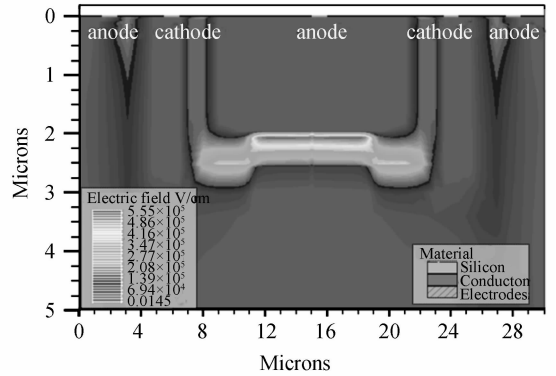


图2 SPAD的电场分布图(反向偏压为24 V)  
Fig. 2 Electric field distribution of SPAD (with 24 V reverse bias)

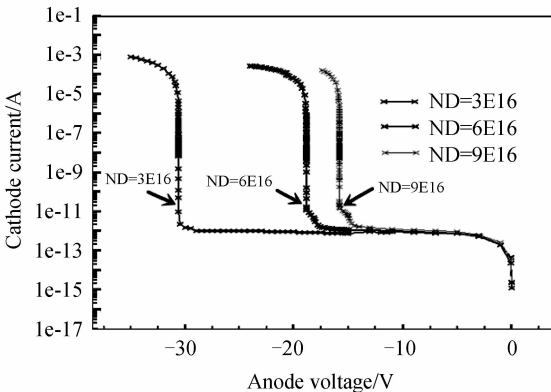


图3 不同深N阱浓度下的I-V特性

Fig. 3 I-V characteristic for different N region doping level

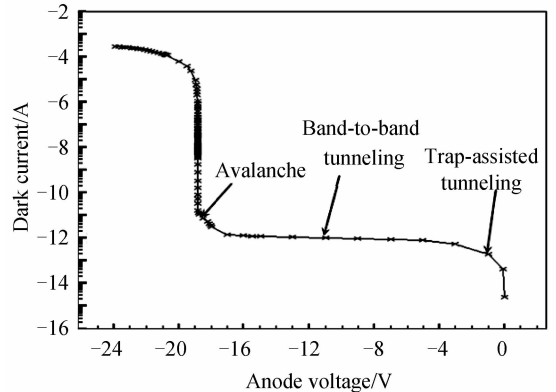


图4 未加光照下的I-V特性曲线

Fig. 4 Current-voltage characteristics under dark condition

APD 电流源于陷阱辅助隧穿、带间隧穿和雪崩碰撞电离过程,随着反向偏压的增大,M. A. Kaarami 指出<sup>[23]</sup>,APD 工作在盖革模式下,要求带间隧穿与雪崩之间的过渡必须足够尖锐,否则该二极管结构将不适合作为单光子探测器.图 4 是未加光照时的  $I-V$  特性曲线,可看出带间隧穿区与雪崩区之间的过渡比较尖锐,表明该器件能够在盖革模式下运行,满足单光子探测要求.

对于  $P^+N$  结,雪崩一般发生在掺杂浓度较低、外加电压又较高的 PN 结中,击穿电压可由式(1)计算获得,即

$$V_R = \frac{1}{2} E_{\max} W_d = \frac{\epsilon_s E_{\max}^2}{2qN_d} \quad (1)$$

式中, $E_{\max}$  为最大电场强度(文中为  $5.55 \times 10^5$  V/cm), $N_d$  为 PN 结轻掺杂一侧浓度值(文中为  $N_d = 6 \times 10^{16}$   $\text{cm}^{-3}$ ), $\epsilon_s$  为硅的介电常数(约为  $1.045 \times 10^{-12}$  F/cm),由理论计算可知,该器件的击穿电压约为 16.77 V,比加保护环后仿真得到的击穿电压 18.4 V 略小,这是由于保护环能在一定程度上提升器件的耐压性.

用光强为  $0.01$   $\text{W}/\text{cm}^2$  的  $800$  nm 入射光照射 SPAD 表面,同样将反向偏压加到  $24$  V 进行仿真,得到光电流与暗电流的  $I-V$  特性曲线,见图 5.可以看出,该器件的击穿电压约为  $18.4$  V.当反向偏压在  $18.4$  V 以下时,不论是光电流还是暗电流都保持平稳,此时 SPAD 没有发生雪崩,相当于普通的光电二极管,存在  $\text{pA}$  级的很小的暗电流;当反向偏压为  $18.4$  V 时,由于在较大的方向偏压下,雪崩区的载流子被加速产生碰撞电离,导致雪崩倍增效应,使得电流急剧增大.由仿真分析可知:减小或增大入射光强,仅对雪崩前的光电流影响显著,而对雪崩后的雪崩电流影响甚微;当反向偏压在  $18.4$  V 以上时,雪崩电流随着偏压的增大变化逐渐平稳,趋于饱和.

### 2.3 响应度分析

响应度是决定器件灵敏度好坏的重要指标之一.光电探测器在波长为  $\lambda$  的单位入射辐射功率的作用下,输出的光电流叫做探测器的电流光谱响应度,其表达式为

$$R = \frac{I_{\text{ph}}}{P_{\text{opt}}} = \frac{\eta \cdot q}{h \cdot \nu} = \frac{\eta \cdot \lambda (\mu\text{m})}{1.24} \quad (2)$$

式中, $I_{\text{ph}}$  为光电流, $P_{\text{opt}}$  为入射光功率, $\eta$  为外部量子效率, $h$  为普朗克常量( $6.63 \times 10^{-34}$  J·s), $\nu$  为光子频率.在一定的光功率下,只要测得光电流就可计算出响应度.

通过光强为  $0.001$   $\text{W}/\text{cm}^2$  的入射光照射,所设计的 SPAD 器件响应度仿真结果见图 6.从图 6 可以看出,该器件在  $650$  nm 处达到约为  $0.495$   $\text{A}/\text{W}$  的峰值响应度.由理论计算可知外部量子效率约为  $94\%$ .在  $650 \sim 950$  nm 波段范围内,其响应度均能保持在  $0.34$   $\text{A}/\text{W}$  以上, $950$  nm 波长处的响应度大小约为  $0.35$   $\text{A}/\text{W}$ .

### 2.4 光子探测效率分析

光子探测效率(Photon Detection Efficiency, PDE)是 SPAD 的参数之一,代表光子进入 SPAD 后能够引发雪崩并被探测到的平均概率,作为评价 SPAD 探测单光子信号能力的重要标准.有源区的 PDE 等于外部量子效率与雪崩发生概率的乘积,其近似表达式为

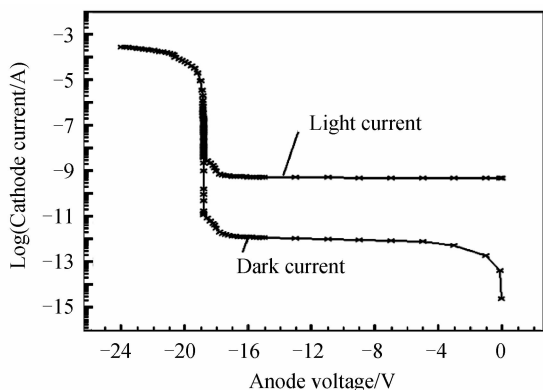


图 5 暗电流与光电流随偏压的变化曲线  
Fig. 5 Curves of dark current (no illumination) and light current (illumination) versus bias voltage

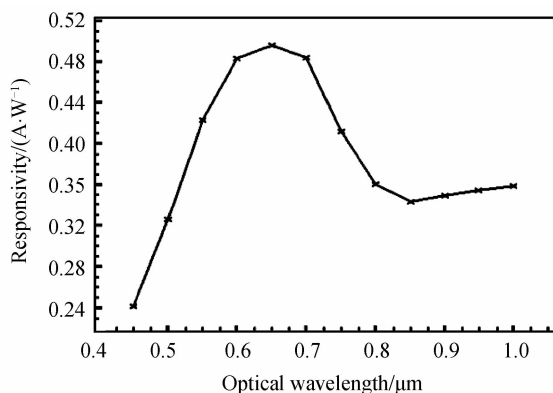


图 6 不同波长的响应度曲线  
Fig. 6 Response curves of different wavelengths

$$PDE = \eta \cdot p_{\text{trigger}} = \eta \cdot (1 - \exp(-V/V_B)) \quad (3)$$

$P_{\text{trigger}}$  表示一个光子发生雪崩击穿的概率,主要受过偏压的影响,在一定范围内 PDE 会随过偏压的增大而增大,但也会造成暗计数的增大,影响探测器的噪声特性,暗计数的减小主要通过降低温度实现,工作温度越低,暗计数越小,但由于现实条件的限制,也无法使器件在过低温度下运行;外部量子效率  $\eta$ , 主要与结面积和少数载流子的扩散长度有关。

为使 SAPD 能探测到强度微弱的光,只有提高器件在长波段光的吸收效率,才能有效改善器件对长波段的探测效率, SiAPD 的吸收效率表达式为

$$\eta(\lambda) = 1 - e^{-\alpha(\lambda)W} \quad (4)$$

式中  $W$  为 SAPD 耗尽层厚度,  $\alpha(\lambda)$  为 Si 的吸收系数,是光波波长的函数,随着入射光波长朝长波长方向移动,其吸收系数逐渐减小. 由式(4)可知,通过增大耗尽层厚度,可有效地提高 SAPD 的吸收效率. 通过选择合适的深 N 阱掺杂浓度,能有效增大耗尽层厚度,从而提高器件在较长波段的探测效率。

由式(3)可知,过偏压为 2 V 时,其雪崩发生的概率为 67%;过偏压为 5 V 时,其雪崩发生的概率为 72%,在适当的过偏压下,雪崩发生的概率随过偏压的增大而增大. 通过式(3),可知在不同过偏压下的光子探测效率. 图 7 为 ATLAS 仿真所得光子探测效率与光波长的关系曲线,在 600 nm 左右达到光子探测效率峰值,2 V 过偏压下的光子探测效率峰值为 66%. 随着反偏电压增大,过偏压 5V 时,光子探测效率峰值增大到 72%左右,在较长波段内可具有较高的探测效率,650~950 nm 波段内的探测效率均高于 30%,950 nm 处的单光子探测效率约为 34%。

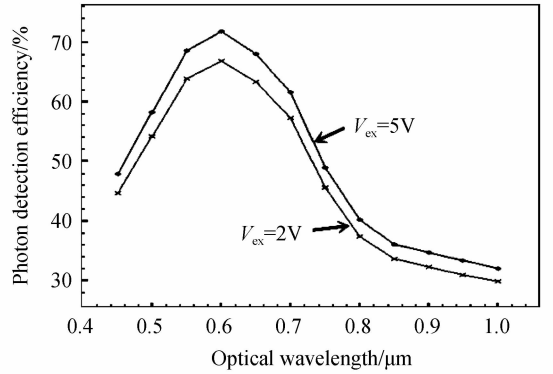


图 7 不同过偏压下的光子探测效率  
Fig. 7 PDE at different excess biases

本文设计的 SPAD 器件采用了 PN 型双二极管结构,研究表明这种结构的器件具有较好的增益特性与频率响应<sup>[24]</sup>,不同结构与工艺下的 SPAD 器件性能比较见表 2。

表 2 不同结构与工艺下的 SPAD 性能比较

Table 2 Comparison of SPAD performance under different structures and processes

| Ref.      | Tech/μm | Diameter/μm | V <sub>br</sub> /V | PDE peak/% | PDE(@800 nm)/% |
|-----------|---------|-------------|--------------------|------------|----------------|
| This work | 0.18    | 10          | 18.4               | 72(620 nm) | 40             |
| [25]      | 0.18    | 8           | 26.8               | 20(500 nm) | 5              |
| [26]      | 0.35    | 10          | 13.2               | 55(500 nm) | 5              |
| [27]      | 0.35    | 100         | 17.4               | 42(575 nm) | 19             |

从表 2 中可看出,本文所设计的 SPAD 的峰值 PDE 性能与 800 nm 处的 PDE 性能均较好. Yang H 等人<sup>[25]</sup>对 SPAD 阵列进行研究,虽然整体填充因子较高,但光子探测效率性能一般,5 V 过偏压下,500 nm 处达到的 PDE 峰值为 20%,而本文所设计的 SPAD 在光子探测效率方面具有明显的优势,在 620 nm 处的 PDE 峰值达到 72%;与鲍孝圆等人<sup>[26]</sup>的研究结果相比,本文所设计的器件击穿电压略高,但探测效率峰值由 500 nm 移到 620 nm 处,且器件灵敏度也有明显的改善;与 Lesage F 等人的研究结果<sup>[27]</sup>相比,同是 P 阱保护环的 SPAD,本文所设计的 SPAD 器件不仅能够很好地运行在盖革模式下,而且窗口尺寸较小,能够有效提高器件的响应速度。

### 3 结论

本文对基于 0.18 μm CMOS 工艺技术的 SPAD 器件结构进行了深入研究. 在器件设计方面进行了以下的优化设计:一是设计 P 阱保护环结构,以预防器件过早的边缘击穿现象,保证 SPAD 能够在盖革模式下正常运行;二是采用较厚的 P<sup>+</sup> 层厚度,同时降低深 N 阱掺杂浓度,使得耗尽层的厚度增加,从而提高器件在 650~950 nm 的响应度与探测效率,可以对该波段内的微弱光信号进行有效探测. 所设计的 SPAD 器件的反

向击穿电压约为 18.4 V,最大电场约为  $5.55 \times 10^5$  V/cm,在 650~950 nm 波段范围内的光子探测效率均高于 30%,在波长为 650 nm 时,响应度峰值为 0.495 A/W.

## 参考文献

- [1] YANG Hong-jiao, JIN Xiang-liang, TANG Li-zhen, *et al.* Simulation and analysis of P+/N SPAD for 3D imaging[C]. 2015 IEEE 11th International Conference on ASIC, Chengdu, 2015: 1-4.
- [2] KORHONEN V O, MYLLYLA T S, KIRILLIN M Y, *et al.* Light propagation in NIR spectroscopy of the human brain [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, **20**(2): 289-298.
- [3] HAENSSE D, SZABO P, BROWN D, *et al.* A new multichannel near infrared spectrophotometry system for functional studies of the brain in adults and neonates[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(12): 4525-4538.
- [4] SULTANA A, KAMRANI E, SAWAN M. CMOS silicon avalanche photodiodes for NIR light detection: a survey[J]. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2012, **70**(1): 1-13.
- [5] KAMRANI E, LESAGE F, SAWAN M. Towards on-chip integration of brain imaging photodetectors using standard CMOS process [C]. International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society, 2013: 2668-2671.
- [6] FARAMARZPOUR N, DEEN M J, SHIRANI S, *et al.* Fully integrated single photon avalanche diode detector in standard CMOS 0.18- $\mu$ m technology[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2008, **55**(3): 760-767.
- [7] STOPPA D, MOSCONI D, PANCHERI L, *et al.* Single-photon avalanche diode CMOS sensor for time-resolved fluorescence measurements[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, **9**(9): 1084-1090.
- [8] MERHAV T, SAVUSKAN V, NEMIROVSKY Y. Gun muzzle flash detection using CMOS sensors [C]. IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems, 2013: 1-4.
- [9] JRADI K, PELLION D, GINHAC D. Design, Characterization and analysis of a 0.35- $\mu$ m CMOS SPAD [D]. *Dissertations & Theses - Gradworks*, 2014, **131**(39): 14030-14042.
- [10] MALASS I, UHRING W, NORMAND J P L, *et al.* Evaluation of size influence on performance figures of a single photon avalanche diode fabricated in a 180-nm standard CMOS technology[J]. *Analog Integrated Circuits & Signal Processing*, 2016, **89**(1): 1-8.
- [11] NICLASS C, GRANT L. A 130-nm CMOS single-photon avalanche diode[J]. *Proceedings of The International Society for Optical Engineering*, 2007, **67**(66): 50-51.
- [12] RICHARDSON J A, GRANT L A, HENDERSON R K. Low dark count single photon avalanche diode structure compatible with standard nanometer scale CMOS technology [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(14): 1020-1022.
- [13] FIELD R M, LARY J, COHN J, *et al.* A low-noise, single-photon avalanche diode in standard 0.13- $\mu$ m complementary metal oxide semiconductor process[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**(21): 211111-211113.
- [14] ROCHAS A, GANI M, FURRER B, *et al.* Single photon detector fabricated in a complementary metal-oxide-semiconductor high-voltage technology[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, **74**(7): 3263-3270.
- [15] LEE M J. First CMOS silicon avalanche photodetectors with over 10-GHz bandwidth[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, **28**(3): 276-279.
- [16] WANG Wei, WANG Chuan, YAN Lin-shu, *et al.* NP type CMOS APD with high frequency bandwidth[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(2): 699-704.  
王巍,王川,颜琳淑,等.一种高带宽 NP 型 CMOS APD 的研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, **44**(2): 699-704.
- [17] WEBSTER E A G, RICHARDSON J A, GRANT L A, *et al.* A single-photon avalanche diode in 90-nm CMOS imaging technology with 44% photon detection efficiency at 690 nm[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2012, **33**(5): 694-696.
- [18] BULTER A. Single-photon counting detectors for the visible range between 300 and 1,000 nm[M]. *Advanced Photon Counting*. Springer International Publishing, 2014: 23-42.
- [19] MANDAI S, FISHBURN M W, MARUYAMA Y, *et al.* A wide spectral range single-photon avalanche diode fabricated in an advanced 180 nm CMOS technology[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(6): 5849-5857.
- [20] KAMRANI E, LESAGE F, SAWAN M. Efficient premature edge breakdown prevention in SiAPD fabrication using the standard CMOS process[J]. *Semiconductor Science & Technology*, 2013, **28**(4): 1-6.
- [21] KAMRANI E. On-chip integrated functional near infra-red spectroscopy (fNIRS) photoreceiver for portable brain imaging[D]. The University of Montreal, 2014.
- [22] LEE M J, SUN P, CHARBON E. A first single-photon avalanche diode fabricated in standard SOI CMOS technology with a full characterization of the device[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(10): 1-10.
- [23] KARAMI M A. Deep-submicron CMOS single photon detectors and quantum effects [M]. *Tudelft Netherlands*, 2011.
- [24] LEE M J, CHOI W Y. Performance comparison of two types of silicon avalanche photodetectors based on, N-well/P-substrate and P+/N-well junctions, fabricated with standard CMOS technology[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2011, **15**(1): 1-3.

- [25] YANG Huang, YUE Xu, PING Xiang. A high-fill-factor SPAD array cell with a shared deep N-well[C]. IEEE China Semiconductor Technology International Conference. 2016:1-3.
- [26] WANG Wei, BAO Xiao-yuan, CHEN Li, *et al.* A CMOS single photon avalanche diode device with high photon detection efficiency[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(8): 0823001.  
王巍, 鲍孝圆, 陈丽, 等. 高探测效率 CMOS 单光子雪崩二极管器件[J]. 光子学报, 2016, **45**(8):0823001.
- [27] KAMRANI E, LESAGE F, SAWAN M. Premature edge breakdown prevention techniques in CMOS APD fabrication [C]. New Circuits and Systems Conference. 2012:345-348.