

# 双波峰响应 CMOS 单光子探测器的设计与优化

张维宇, 汪洋, 金湘亮\*

湖南师范大学物理与电子科学学院, 湖南 长沙 410081

**摘要** 随着科学技术的不断发展,单光子雪崩光电二极管(SPAD)在极弱光探测领域起着不可或缺的作用。但是,在需要同时进行可见光和红外光的应用场景下,单一波峰响应的 SPAD 往往独木难支,而采用多个单波峰器件又降低了整个系统的集成度。为解决这一问题,设计了一种分别在可见光区和红外光区响应的双波峰 SPAD。为确保该器件能实现预期的功能,首先利用半导体工艺器件仿真软件(TCAD)来验证该器件的合理性,再通过搭建外部淬灭电路来测试 SPAD 的各项性能参数。测试结果显示,该器件的雪崩击穿电压为 12.75 V。在 22 °C 的室温条件下(过偏压为 0.5 V),SPAD 的光子探测概率在 520 nm 处达到 32%,在 840 nm 处达到 12%。此外,当过偏压为 1 V 时,其暗计数率(DCR)为 1 kHz。因此,该 SPAD 能够实现对可见光及近红外光的双波峰探测,并且将 DCR 控制在一个较低的范围。

**关键词** 单光子雪崩光电二极管;极弱光探测;雪崩击穿电压;光子探测概率;暗计数率

中图分类号 TN364

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1704001

## Design and Optimization of Double-Wave-Peak Response CMOS Single-Photon Detector

Zhang Weiyu, Wang Yang, Jin Xiangliang\*

School of Physics and Electronics, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410081, China

**Abstract** Single photon avalanche diode (SPAD) now plays an indispensable role in extremely low light detection. However, SPADs are often required possessing two response peaks under different lighting conditions, which cannot be realized in a single-wave-peak SPAD (SWP-SPAD). Moreover, the multiple SWP-SPADs responding to different wavelengths will reduce the integration of the detection system. In this work, we propose a double-wave-peak SPAD (DWP-SPAD) to detect both the visible light and the near infrared light. We conduct the device-level simulation by means of the technology of the computer-aided design, and build an external quenching circuit to measure key parameters. The test results show that the breakdown voltage of the SPAD is 12.75 V. Under experimental conditions of 22 °C and the excess bias voltage of 0.5 V, there are two peaks of the SPAD's photon detection probability, 32% at 520 nm and 12% at 840 nm, respectively. When the over-bias voltage is 1 V, the dark count rate (DCR) is 1 kHz. Therefore, the proposed SPAD can achieve double-wave-peak detection at a low DCR.

**Key words** single photon avalanche diode; extremely low light detection; avalanche breakdown voltage; photon detection probability; dark count rate

**OCIS codes** 040.1345; 040.3780; 040.6070

收稿日期: 2021-02-02; 修回日期: 2021-03-03; 录用日期: 2021-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(61827812)、湖湘高层次人才聚集工程(2019RS1037)、湖南省科技厅项目(2020GK2018, 2019GK4016, 2020RC1003)

通信作者: \*jinxl@hunnu.edu.cn

## 1 引言

根据构成材料的不同,可将光电探测器分为无机光电探测器和有机-无机光电探测器等。无机光电探测器主要有进行紫外光探测的 ZnO 光电探测器<sup>[1]</sup>、进行可见光和近红外光探测的硅基单光子雪崩光电二极管 (SPAD) 以及进行近红外光探测的 InGaAs/InP SPAD<sup>[2-3]</sup>。这些探测器一般都是三维结构,并且器件尺寸一般在  $\mu\text{m}$  级别。而无机-有机光电探测器则主要为掺有量子点的聚苯胺纳米线光电探测器。其中聚苯胺具有光学透明性,器件主要的光电性能由量子点种类和尺寸决定<sup>[4-5]</sup>。此外,该探测器一般是一维结构,并且器件尺寸一般在 nm 级别。SPAD 被广泛应用于量子密钥分发<sup>[6]</sup>、单分子检测<sup>[7]</sup>和超分辨率显微镜<sup>[8]</sup>等领域。在以上应用领域中,探测器件需要具备高探测概率、低暗计数率等特性才能实现设计者的预期目标。但遗憾的是,以上提到的这些特性往往不能兼得。因此,怎么设计出一个折衷的方案成为 SPAD 设计者面临的一个难题。

Webster 等<sup>[9]</sup>通过 130 nm CMOS 成像工艺设计了一种单波峰 SPAD。经仿真验证,该器件对 560 nm 波长的光具有 72% 的探测概率。Veerappan 等<sup>[10]</sup>利用光生载流子扩散这一过程设计了一个探测概率高于 40% 的宽光谱响应 SPAD。Niclass 等<sup>[11]</sup>基于 130 nm CMOS 工艺设计了一种八边形的 SPAD,该 SPAD 在可见光区的光子探测概率(PDP)峰值为 41%。虽然上述文献中提出了几种较高探测概率的单波峰 SPAD 器件,但是其波峰响应范围都局限在可见光区内。Gulinatti 等<sup>[12]</sup>设计了一种增强型红外 SPAD,该器件对波长为 800 nm 的光有 40% 的探测概率。也就是说,该器件能检测到近红外光。然而,该器件也只能检测到一种特定波长的光。Henderson 等<sup>[13]</sup>设计了一种堆叠结 SPAD,凭借堆叠结结构,该双结 SPAD 对 450 nm 波长的光有 32% 的探测概率,对 670 nm 波长的光有 29% 的探测概率,实现了在器件性能上的均衡。但是,该器件的波峰响应范围也都位于可见光区内。这一缺点限制了它的应用范围。

本文基于 180 nm 标准单片集成 Bipolar-CMOS-DMOS 器件(BCD)的超级集成硅栅极工艺制作了一种双波峰 SPAD,它是一种无机光电探测器中的硅基 SPAD。与单波峰 SPAD 不同,该器件能在较低的暗计数率下检测到可见光和近红外光。因此,该双波峰 SPAD 的设计为上述器件的不足提

供了一种折衷的解决方案。

## 2 基本原理与实验仿真

### 2.1 器件结构及原理分析

通过 180 nm 标准 BCD 工艺制造的双波峰 SPAD 结构如图 1 和图 2 所示。器件结构中有一个  $\text{N}^+$ -P-well 平面结和一个 N-well-P-well 侧边结。由于  $\text{N}^+$  区域的掺杂浓度远高于 P-well 的掺杂浓度,所以平面结比侧边结更容易发生雪崩倍增过程。于是,施加的外部反向偏压的压降大部分落到了平面结上,使平面结工作在 Geiger 模式下。当光子在平面结中被吸收后,光生载流子将在外部电场的作用下发生碰撞电离和雪崩倍增,从而在器件中形成了可以被外部电路检测到的大电流。而对于 P-well-N-well 侧边结来说,其掺杂浓度差更小,因此它较平面结来说更难发生雪崩。与工作在 Geiger 模式下的平面结不同,侧边结工作在线性模式。由于线性模式下的增益会小于 Geiger 模式下的增益,所以相应的侧边结的 PDP 会小于平面结。

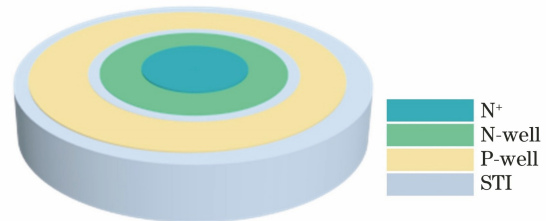


图 1 双波峰 SPAD 的三维示意图

Fig. 1 Three-dimensional structure of double-wave-peak SPAD

基于上述分析,可以知道该器件的感光区域中存在一个平面结和一个侧边结,且侧边结的结深大于平面结的结深。这使得该器件能检测到两种特定波长的光,从而实现双波峰探测。因此位于器件中心的  $\text{N}^+$ -P-well-N-well 区域是该结构的核心。

同时,为避免耗尽区的中心电场强度低于耗尽层两侧的电场强度,需要设计一个保护环结构。保护环的设计思路一般有两条:一是增加耗尽层中心电场强度,使其高于耗尽层边缘的电场强度;二是减小耗尽层边缘的电场强度<sup>[14-15]</sup>。这里采用的是第二种方法。通过在  $\text{N}^+$ -P-well 区域两侧各添加一个 N-well,避免耗尽层过早地发生边缘击穿。该器件的阴极经  $\text{N}^+$  引出,阳极则经 P-sub-P-well- $\text{P}^+$  通路引出。通过给阳极添加一个负偏压,给阴极添加一个正偏压,使平面结和侧边结工作在反向偏置状态。此外,为避免  $\text{P}^+$  区域发生边缘击穿,需要在其两侧添加浅槽隔离(STI)。

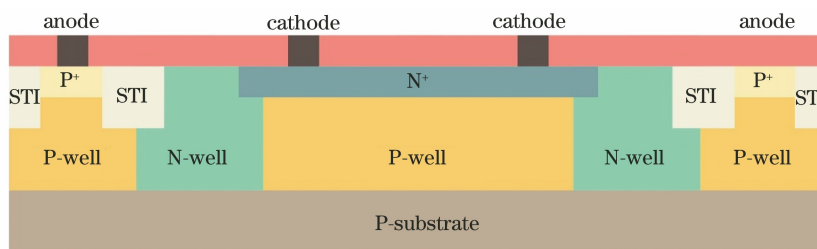


图 2 双波峰 SPAD 的横截面图

Fig. 2 Cross section of double-wave-peak SPAD

## 2.2 二维器件级仿真

为验证 SPAD 的器件结构符合基本设计原理, 采用半导体工艺器件仿真软件(TCAD)来进行器件级仿真。给该双波峰器件添加 15 V 的反向偏压, 并在器件的感光区域上施加光照强度为  $20 \text{ W/cm}^2$ 、波长为 600 nm 的光, 得到该器件的电场强度、碰撞电离、光子吸收率以及电流密度分布情况。

该双波峰器件的电场分布如图 3 所示。从图中可以看到该器件的电场主要分布在  $\text{N}^+$ -P-well 结和 N-well-P-well 结中。N-well 保护环有效降低了耗尽区边缘的电场强度, 从而使得平面结中心的电场强度高于侧边电场强度, 有效防止了器件的边缘击穿。图 4 表示的是器件的碰撞电离分布情况。该器件的碰撞电离主要发生在  $\text{N}^+$  和 P-well 形成的耗尽区内, 其峰值位于该平面结的中心, 这同样也验证了 N-well 保护环的有效性。该双波峰 SPAD 的光子吸收效率如图 5 所示。在 TCAD 仿真中, 通过将一定强度的光束施加在器件的感光表面上来模拟器件受光照时的情况。从图 5 可以看到器件表面的光吸收率最高, 随深度增加, 器件的光吸收率逐渐减小。图 6 表示器件中电流密度的分布情况。器件的电流路径主要由阴极  $\text{N}^+$ 、P-well、P-substrate 和阳极  $\text{P}^+$  组成, 并且各电极下的电流密度最高。

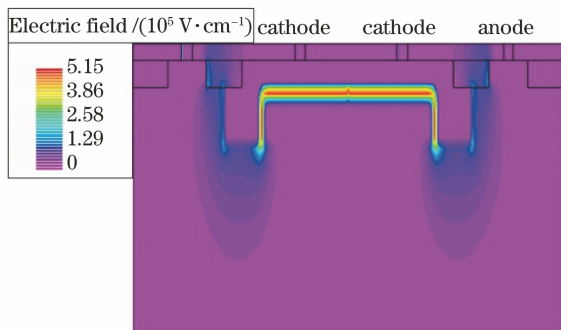


图 3 双波峰 SPAD 的电场分布

Fig. 3 Electric field distribution of double-wave-peak SPAD

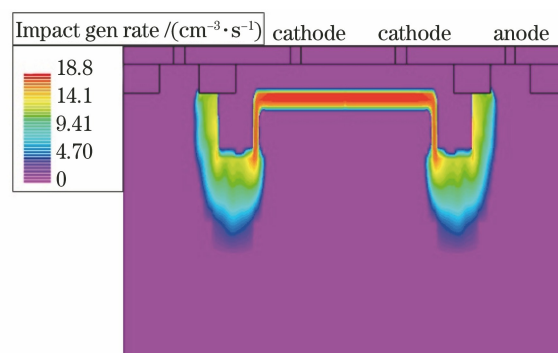


图 4 双波峰 SPAD 的碰撞电离分布

Fig. 4 Impact ionization distribution of double-wave-peak SPAD

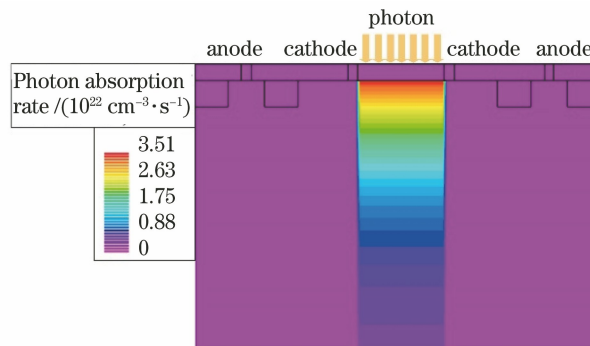


图 5 双波峰 SPAD 的光子吸收率

Fig. 5 Photon absorption rate of double-wave-peak SPAD

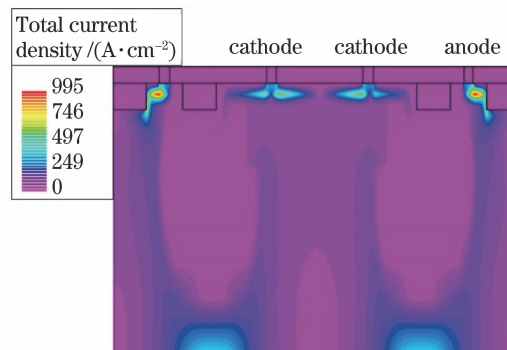


图 6 双波峰 SPAD 的电流密度

Fig. 6 Current density distribution of double-wave-peak SPAD

### 3 器件测试结果及分析

为确定器件的各项性能参数能满足预定的目标,构建了一个被动淬灭电路来测量该双波峰 SPAD 的关键性能参数。图 7 为 SPAD 的测试平台。其中包括双波峰 SPAD 和被动淬灭电路、示波器以及电源。图 8 是双波峰 SPAD 的概貌图和版图。图 9 是被动淬灭电路原理图;其中,  $V_b$  是该 SPAD 的雪崩击穿电压,  $V_{ex}$  是施加到 SPAD 上的过偏压,两者之和表示该双波峰 SPAD 上的总电压。此外,  $C$  表示电容,  $R$  表示淬灭电阻。

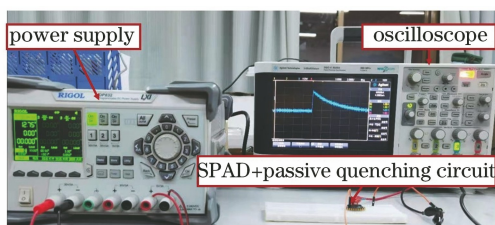


图 7 双波峰 SPAD 的测试平台

Fig. 7 Test platform of double-wave-peak SPAD

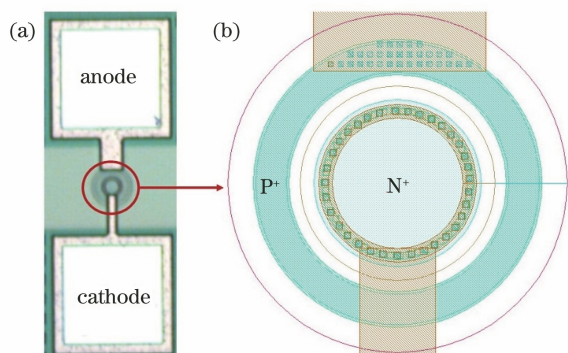


图 8 双波峰 SPAD 的概貌图和版图。(a) 概貌图; (b) 版图

Fig. 8 Schematic and layout patterns of double-wave-peak SPAD. (a) Schematic pattern; (b) layout pattern

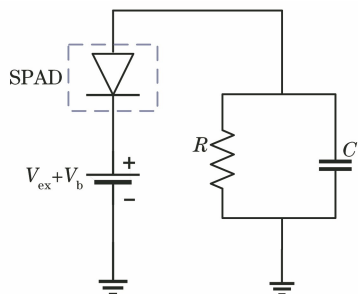


图 9 双波峰 SPAD 的被动淬灭电路

Fig. 9 Passive quenching circuit of double-wave-peak SPAD

该双波峰 SPAD 在不同测试条件下的  $I-V$  特性曲线如图 10 所示。从图中可以看到,器件受到光照时的雪崩击穿电压为 12.75 V。但此值与器件无

光照时的雪崩触发电压差别不大。此外,在线性工作模式下,受光照器件的电流比无光照器件的暗电流大了将近两个数量级。这是因为 SPAD 受到光照后,会在耗尽区中激发出光生载流子,从而导致器件中可移动的自由电子的数量增加。这些电子会在外加电场的作用下定向移动,形成一个能够被外部电路检测到的电流。

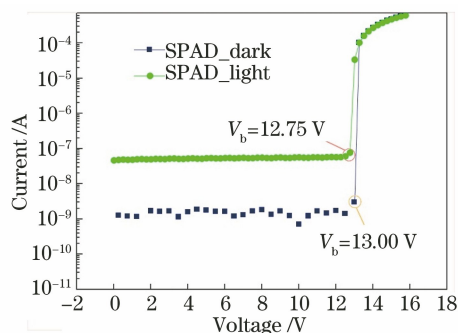


图 10 双波峰 SPAD 的  $I-V$  特性曲线图

Fig. 10  $I-V$  characteristic curve of double-wave-peak SPAD

采用被动淬灭电路来测量暗计数率(DCR),该 SPAD 的 DCR 曲线如图 11 所示。从图中可以看到,当过偏压为 1 V 时,器件的暗计数率为 1 kHz。一般情况下,SPAD 中的 DCR 主要有如下三个来源:一是热激发的噪声载流子;二是能级捕获效应;三是隧道击穿效应<sup>[16]</sup>。通过热激发产生的载流子是无法避免的,它普遍存在于各种 SPAD 中。能级捕获效应主要由器件材料本身固有的缺陷所致,它会使得器件中存在后脉冲,而后脉冲会导致 SPAD 的误计数,进而产生暗计数。隧道击穿效应包括带间隧穿效应和缺陷辅助隧穿效应,它主要与器件的掺杂浓度和反向偏压的大小有关。掺杂浓度越高,反向偏压越大,发生隧道击穿效应的概率也就越大。因此,可以看到器件的 DCR 随外加过偏压增加而增加,两者呈现出一种正相关的关系。

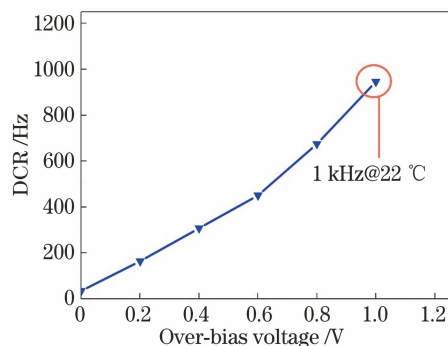


图 11 双波峰 SPAD 的 DCR 曲线图

Fig. 11 DCR curve of double-wave-peak SPAD

光子探测概率是 SPAD 的一项重要性能指标, 可以用探测到的光子数和入射总光子数之比来表示。采用光电测试系统测量了该双波峰 SPAD 的光子探测概率。先将该 SPAD 器件置于 22 °C 黑暗环境下, 测量并记录此时的暗电流。之后再给设备施加 300~1100 nm 波长的光, 测量并记录该 SPAD 器件对不同波长的光的探测概率。测试结

表 1 设计的 SPAD 的光子探测概率与参考文献对比

Table 1 Comparison of PDP test data between existed SPADs and proposed SPAD

Device name	Process	PDP
SPAD in Ref. [11]	0.13 $\mu\text{m}$ CMOS	34% (1.7 V@450 nm)
SPAD in Ref. [12]	a new silicon SPAD process	40% (20 V@800 nm)
SPAD in Ref. [13]	0.13 $\mu\text{m}$ CMOS	32%/29% (3 V@450 nm/670 nm)
SPAD in Ref. [17]	0.18 $\mu\text{m}$ CMOS	39% (2.5 V@500 nm)
Proposed SPAD	0.18 $\mu\text{m}$ BCD	32%/12% (0.5 V@520 nm/840 nm)

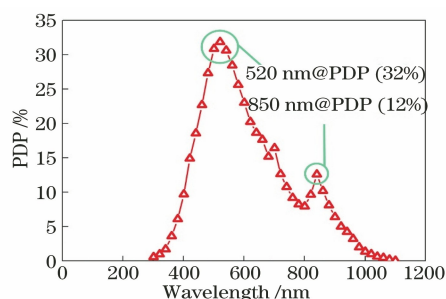


图 12 双波峰 SPAD 的 PDP 曲线图

Fig. 12 PDP curve of double-wave-peak SPAD

## 4 结 论

基于 180 nm 标准 BCD 工艺制作了一个双波峰 SPAD。经过器件仿真与实验验证, 该器件在 22 °C 和 0.5 V 过偏压下的 PDP 曲线有两个响应波峰: 一个波峰位于 520 nm 处, PDP 为 32%; 另一个波峰位于 840 nm 处, PDP 为 12%。目前, 平面硅基 SPAD 的光子探测概率峰值范围为 0.2%<sup>[18]</sup>~72%<sup>[9]</sup>。文献[9]中基于 130 nm CMOS 成像工艺提出了一种 SPAD。该 SPAD 利用专为 CMOS 成像而设计的介电叠层优化来提高外部量子效率。此外, 还利用了交流耦合使器件工作在高偏置电压的环境下。从而使得该 SPAD 能在 12 V 的过偏压下实现 72% 的光子探测概率, 是同类平面硅基 SPAD 中光子探测概率的最高值。但是其过偏压较大, 从而导致了暗计数率的升高。因此如何提高第二个峰位处的 PDP 是接下来需要探究的一个问题。综上所述, 该器件通过一个平面结和一个侧边结实现了对可见光和近红外光的双波峰探测, 并且能够在增加系统集成度的基础上满足某些特殊的应用需求, 从而为单

果如图 12 所示。从图中可以看到该器件的 PDP-波长曲线有两个波峰。第一个波峰位于 520 nm 波长处, 其 PDP 达到了 32%。第二个波峰位于 840 nm 处, 该处的 PDP 为 12%。换言之, 该器件能够检测到可见光和近红外光, 从而实现双波峰探测。表 1 列出了该双波峰器件与参考器件之间的性能参数比较。

波峰器件在双频段光检测中所遇到的不便提供了一种解决方案。不过该器件第二个峰位处的 PDP 较低, 仍需进一步改善。

## 参 考 文 献

- [1] Duan Y H, Cong M Y, Jiang D Y, et al. Spectral response cutoff wavelength of ZnO ultraviolet photodetector modulated by bias voltage[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 2004001.  
段雨晗, 丛明煜, 蒋大勇, 等. 电压调制 ZnO 紫外探测器光响应截止波长的研究[J]. 光学学报, 2020, 40(20): 2004001.
- [2] Liu K B, Yang X H, He T T, et al. Indium phosphide-based near-infrared single photon avalanche photodiode detector arrays[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(22): 220001.  
刘凯宝, 杨晓红, 何婷婷, 等. InP 基近红外单光子雪崩光电探测器阵列[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22): 220001.
- [3] Wang H, Yuan Z B, Tan M, et al. Effect of multiplication layer thickness on device properties of In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP avalanche photodiode[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1804001.  
王航, 袁正兵, 谭明, 等. 倍增层厚度对 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP 雪崩二极管器件特性的影响[J]. 光学学报, 2020, 40(18): 1804001.
- [4] Yang X G, Liu Y, Lei H X, et al. An organic-inorganic broadband photodetector based on a single polyaniline nanowire doped with quantum dots[J]. Nanoscale, 2016, 8(34): 15529-15537.
- [5] Yang X G, Bao D H, Zhang Y, et al. Single crossed heterojunction assembled with quantum-dot-embedded polyaniline nanowires[J]. ACS Photonics, 2016, 3(7): 1256-1264.

- [6] Fan-Yuan G J, Teng J, Wang S, et al. Optimizing single-photon avalanche photodiodes for dynamic quantum key distribution networks[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13(5): 054027.
- [7] Michalet X, Ingargiola A, Colyer R A, et al. Silicon photon-counting avalanche diodes for single-molecule fluorescence spectroscopy[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(6): 248-267.
- [8] Antolovic I M, Burri S, Bruschini C, et al. SPAD imagers for super resolution localization microscopy enable analysis of fast fluorophore blinking[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 44108.
- [9] Webster E A G, Grant L A, Henderson R K. A high-performance single-photon avalanche diode in 130-nm CMOS imaging technology[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2012, 33(11): 1589-1591.
- [10] Veerappan C, Charbon E. CMOS SPAD based on photo-carrier diffusion achieving PDP > 40% from 440 to 580 nm at 4 V excess bias[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(23): 2445-2448.
- [11] NiCLASS C, Gersbach M, Henderson R, et al. A single photon avalanche diode implemented in 130-nm CMOS technology[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(4): 863-869.
- [12] Gulinatti A, Rech I, Panzeri F, et al. New silicon SPAD technology for enhanced red-sensitivity, high-resolution timing and system integration[J]. *Journal of Modern Optics*, 2012, 59(17): 1489-1499.
- [13] Henderson R K, Webster E A G, Grant L A. A dual-junction single-photon avalanche diode in 130-nm CMOS technology[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2013, 34(3): 429-431.
- [14] Goetzberger A, McDonald B, Haitz R H, et al. Avalanche effects in silicon p-n junctions. II. Structurally perfect junctions[J]. *Journal of Applied Physics*, 1963, 34(6): 1591-1600.
- [15] Ghioni M, Gulinatti A, Rech I, et al. Progress in silicon single-photon avalanche diodes[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(4): 852-862.
- [16] Wang Y, Jin X L, Cao S G, et al. Analysis of gate-controlled single photon avalanche diode with high photon-detection-probability[J]. *Optics Communications*, 2021, 482: 126588.
- [17] Wu J J, Xie S, Mao L H, et al. Single photon avalanche diode with non-contact guard ring based on CMOS technology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(1): 0125001.  
吴佳骏, 谢生, 毛陆虹, 等. 基于标准 CMOS 工艺的非接触式保护环单光子雪崩二极管[J]. *光子学报*, 2018, 47(1): 0125001.
- [18] Cheng Z, Palubiak D, Zheng X Q, et al. Impact of silicide layer on single photon avalanche diodes in a 130 nm CMOS process[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(34): 345105.