

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2024.06.011

高性能近红外硅光电倍增管的设计

陈力颖^{1,2}, 左金^{1,2}, 程传同^{3,4}

(1. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 天津市光电检测技术与系统重点实验室, 天津 300387; 3. 中国科学院半导体研究所 光电子研究发展中心, 北京 100083; 4. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

摘要: 为了进一步提高硅光电倍增管在近红外波段的光子探测效率, 提出了一种平面型外延电阻淬灭型硅光电倍增管和一种基于倒金字塔结构的硅光电倍增管。通过各向异性腐蚀形成倒金字塔结构, 在倒金字塔4个侧面以离子注入的方式形成 p-enrich 区域, 增大了 PN 结的结面积, 加大了有效光探测面积, 提高了几何填充因子, 从而在一定程度上提高了光子探测效率, 并对相同掺杂浓度的平面型硅光电倍增管和基于倒金字塔结构的硅光电倍增管结构进行仿真。结果表明: 2种器件的击穿电压约为-13 V; 微单元尺寸为 20 μm 、过电压 6 V 时 900 nm 处的平面型外延电阻淬灭型硅光电倍增管和基于倒金字塔结构的硅光电倍增管的光子探测效率分别为 11.2% 和 15.6%, 说明 2 种结构均能够对近红外波段的光进行有效探测, 而基于倒金字塔结构的硅光电倍增管能够提高器件近红外波段的光子探测效率。

关键词: 硅光电倍增管; 倒金字塔结构; 近红外; 光子探测效率

中图分类号: TN152

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2024)06-0073-07

Design on high performance of near-infrared silicon photomultiplier

CHEN Liying^{1,2}, ZUO Jin^{1,2}, CHENG Chuantong^{3,4}

(1. School of Electronics and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Photoelectric Detection Technology and System, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 3. State Key Laboratory of Integrated Optoelectron, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China; 4. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to further improve the photon detection efficiency of silicon photomultiplier in near-infrared band, a planar epitaxial resistance quenched silicon photomultiplier and a silicon photomultiplier based on inverted pyramid structure were proposed. The device forms an inverted pyramid structure through anisotropic etching and forms a p-enrich region on the four sides of the inverted pyramid by ion implantation, which increases the junction area of the PN junction, the effective optical detection area, and the geometric filling factor and then improves the photon detection efficiency to a certain extent. The structure of the planar silicon photomultiplier and the silicon photomultiplier based on the inverted pyramid structure with the same doping concentration is simulated. The results show that the breakdown voltage of the two devices is about -13 V. The photon detection efficiencies of the planar epitaxial resistance quenched silicon photomultiplier and the silicon photomultiplier based on inverted pyramid structure at 900 nm are 11.2% and 15.6%, respectively when its size of the micro cell is 20 μm and the over bias voltage is 6 V, which describes that the two structures can effectively detect the light in the near-infrared band and the silicon photomultiplier based on the inverted pyramid structure can improve the photon detection efficiency in the near-infrared band of the device.

Key words: silicon photomultiplier; inverted pyramid; near infrared; photon detection efficiency

收稿日期: 2023-02-21 基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFA0209000); 国家自然科学基金青年项目(61904173)

第一作者: 陈力颖(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事射频集成电路、模拟集成电路、数模混合集成电路研究。E-mail: nkchenliy@163.com

通信作者: 程传同(1989—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事新型光电传感器研究。E-mail: chengchuantong@semi.ac.cn

近年来, 由于弱光探测技术在各个领域的应用, 光电探测器件尤其是硅光电倍增管(silicon photo-multiplier, SiPM)进入了一个全新的研发阶段。硅光电倍增管由于其具有单光子分辨能力高、体积小、可在亮光条件下进行长距离测距、集成度高等优点, 在激光雷达、天体物理、核医学诊疗、荧光检测、剂量测量、视觉成像等领域有非常重要和广泛的应用, 具有很大的发展前景^[1-4]。

硅光电倍增管是一种由多个雪崩二极管组成的阵列式结构, 最初由俄罗斯科学家 Yusipov 等^[5]提出。日本 Hamamatsu 公司在 2010 年利用深沟道刻蚀技术对硅光电倍增管结构重新设计, 较好地解决了雪崩过程中由于串扰噪声过大影响器件探测效率的问题, 并在 2019 年推出 SiPM S14160 系列, 该产品在可见光波段的光探测效率(photon detection efficiency, PDE)高达 50%。2011 年, 加拿大 Excelitas 公司实现了对硅光电倍增管应用的世界级高时间分辨率, 单光子时间分辨率达到 280 ps。此后, 德国 Ketek 公司对硅光电倍增管的性能加以改进并推出相关产品, 进一步推动了硅光电倍增管在光电探测领域的发展^[6]。在近红外波段, 2017 年意大利的 FBK 公司研制出的 35 μm 微结构 The red-green-blue-high density (RGB-HD SiPM 在 900 nm 处、过偏置电压为 8 V 时的光子探测效率达到 12%^[7]。除此之外, 基于非平面结构的 SiPM 技术也日益发展, 为了克服平面技术的局限性, Engemann 等^[8]提出了一种新的 SiPM, 即 Tip Avalanche Photodiode (TAPD)。试验结果表明, 该 TAPD 在 600 nm 处的 PDE 为 73%, 在 800 nm 处的 PDE 在 45% 以上, 在 905 nm 处的 PDE 也可达到 22%, 恢复时间为 4 ns。国内对光电器件的研究较晚, 北京师范大学新器件实验室提出了一种新型硅光电倍增器(silicon photomultiplier with epitaxial quenching resistor, EQR SiPM), 采用电阻率高的外延硅片, 让外延电阻充当淬灭电阻制成, 该实验室在 2020 年通过改变该器件的微单元尺寸优化了填充因子, 选用大电阻率的 N 型外延硅片, 利用离子注入的掺杂工艺形成 n-enrich 区与表层的 P++层, 两区接触形成 P-N 结结构, 然后利用外延层作为淬灭电阻构成硅光电倍增管的微单元结构。在温度为 20 $^{\circ}\text{C}$, 过偏压为 5 V 时, 15 μm 和 7 μm EQR SiPM 的最大光子探测效率位于 400 nm 波长处, 分别为 40% 和 34%^[9]。2021 年, 该实验室又成功研制出一款硅光电倍增管 EQR15-LE, 器件微单元的尺寸为 15 μm 、有效面积高达 9 mm^2 , 与该实验室以往的外延淬灭型器件相比, EQR15-LE 的暗计数率(dark count rate, DCR)得到了进

一步的优化, 同时 PDE 保持较高值。经测量, EQR15-LE 在温度为 20 $^{\circ}\text{C}$ 、过偏压为 7 V 时, DCR 的典型值为 226 kHz/mm^2 、最大 PDE 为 46%^[10]。深圳灵明光子提出的一款应用在传感器模块的 SiPM 芯片有效面积为 0.5 $\text{mm} \times 0.5 \text{ mm}$, 过偏压 3 V 下 905 nm 处的 PDE 可以达到 15%。

硅光电倍增管在近红外波段探测效率较低, 该缺点严重制约了其应用范围。制约 SiPM 在红外波段探测性能的主要原因是硅材料本征吸收截止波长为 1.1 μm , 在截止波长附近硅的吸收效率非常低。当探测波长超过 750 nm 时, 器件的探测效率下降趋势明显, 大多数探测器的探测效率低至 10%。随着激光雷达(LIDAR)等技术的广泛应用, 人们对近红外波段光的探测效率有了更高的要求, 提高 SiPM 在近红外波段的光子探测效率并使其探测范围向长波移动变得尤为重要。

本文以提高 SiPM 在近红外波段的光子探测效率为研究重点, 对 SiPM 的结构、性能进行设计与仿真, 旨在设计出一种具有较高近红外光子探测效率的高性能新型硅光电倍增管。

1 器件结构设计

图 1 所示为本文设计的平面型外延电阻淬灭型 SiPM 结构。

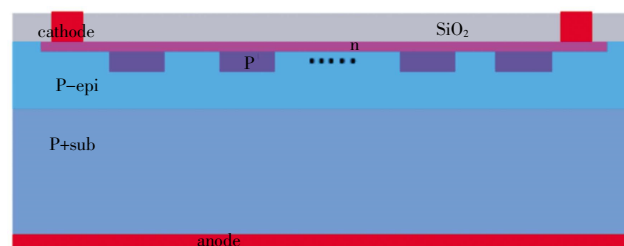


图 1 平面型硅光电倍增管结构

Fig.1 Structure of planar SiPM

图 1 中, 该器件选用电阻率较高的 p 型(100)外延硅片, 采用 p 型衬底以及 p-外延层, 首先利用光刻与离子注入工艺在 p-外延层上形成 p-enrich 区域, 然后在表层通过离子注入形成 n++区域, 二者形成 PN 结结构, p-enrich 区域下方的硅外延层作为淬灭电阻, 这种结构减少了死区面积, 在一定程度上可以增大光子探测效率。此外, 由于光子吸收取决于波长, 因此硅光传感器的最终光子探测效率也将取决于波长, 波长越长, 所需的吸收深度越深。因此, 本文在设计过程中, 通过加大离子注入的能量, 将耗尽区的深度增加, 雪崩区域较深使得器件可以更高效率地探测到近

红外波段的光子。器件表面连续的 n^{++} 层作为 SiPM 的阴极,同时在器件表面生长一层氧化硅增透膜减少光的损耗^[11-12],最后在芯片背面蒸一层金属作为阳极。

在平面型外延电阻淬灭型 SiPM 的基础上,本文还提出了一种基于倒金字塔结构的近红外 SiPM 的器件结构,如图 2 所示。

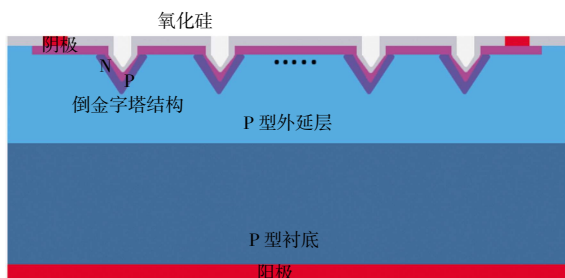


图 2 基于倒金字塔结构的硅光电倍增管结构

Fig.2 Structure of SiPM based on inverted pyramid structure

该结构与平面型 SiPM 的不同之处在于在第一次光刻之后利用 TMAH 溶液^[13]对 (100) 硅片进行各向异性腐蚀,形成倒金字塔结构^[14-17],然后在倒金字塔结构中通过离子注入的方式形成 p-enrich 区域,其他后续步骤与平面型 SiPM 制作步骤完全一致。这种结构的创新之处在于通过各向异性腐蚀形成倒金字塔结构,在倒金字塔 4 个侧面以离子注入的方式形成 p-enrich 区域,增大了 PN 结的结面积,加大了有效光探测面积,提高了几何填充因子,最终在一定程度上提高了光子探测效率。

图 3 所示为基于倒金字塔结构的 SiPM 微单元结构雪崩光电二极管 (avalanche photodiode, APD) 的掺杂浓度分布, APD 的边长为 $10\ \mu\text{m}$,微单元间隔 $5\ \mu\text{m}$ 。

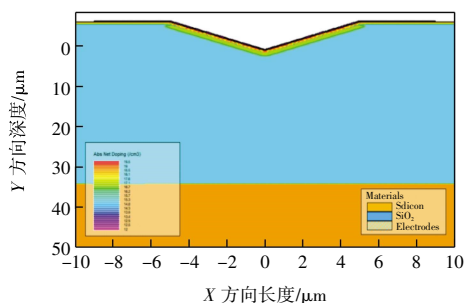


图 3 基于倒金字塔结构的 SiPM 器件微单元结构

Fig.3 Structure of SiPM microcell based on inverted pyramid structure

器件微单元中心处界面硼、磷离子注入浓度曲线如图 4 所示。

为了与平面型硅光电倍增管进行对比,2 种器件

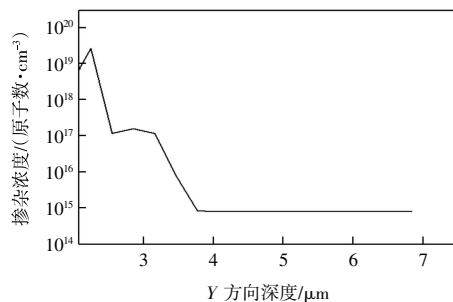


图 4 器件微单元中心处界面浓度曲线

Fig.4 Interface concentration at the center of micro unit of device

选用同一种外延硅片,且两种器件的离子注入浓度与尺寸均保持一致,磷离子注入能量约为 $150\ \text{keV}$,硼离子注入能量约为 $55\ \text{keV}$ 。由于磷离子注入能量较高,光刻胶可能无法作为阻挡层,因此可以先生长一层氧化硅作为阻挡层,在离子注入后利用氢氟酸将其腐蚀掉^[18-19]。离子注入硅的过程是破坏性的,它会使得部分硅产生晶格缺陷,这种破坏可以通过退火过程进行修复^[20-21]。

2 仿真结果

2.1 I-V 特性

将器件阴极设置为 $0\ \text{V}$ 、阳极设置为 $0\sim 20\ \text{V}$ 、迭代电压为 $-1\ \text{V}$,平面型 SiPM 器件的微单元 $I-V$ 特性仿真如图 5 所示。

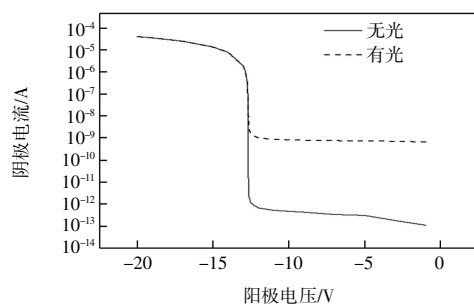


图 5 平面型硅光电倍增管微单元的 $I-V$ 曲线

Fig.5 $I-V$ curves of planar SiPM microcell

由图 5 可知,有光与无光情况下的击穿电压相同,均为 $-13\ \text{V}$,表明光照不影响器件的雪崩击穿电压,但击穿之前无光照下的电流值明显小于有光照下的电流值,击穿之后电流迅速增大至相同值。

同等条件下基于倒金字塔结构的 SiPM 器件微单元结构(微单元尺寸分别为 $10\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \mu\text{m}$)在无光照条件下的 $I-V$ 特性曲线如图 6 所示。

由图 6 可知,微单元尺寸为 $10\ \mu\text{m}$ 时的器件击穿

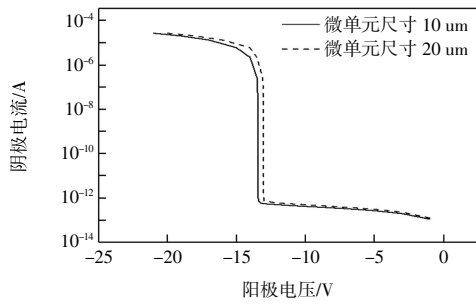


图 6 基于倒金字塔结构的硅光电倍增管微单元的 $I-V$ 曲线
 Fig. 6 $I-V$ curves of SiPM microcell based on inverted pyramid structure

电压为 -13.5 V ; 微单元尺寸为 $20\ \mu\text{m}$ 时, 器件击穿电压为 -13 V 。2 种尺寸的微单元 APD 的击穿电压变化不大, 由此可知, 器件微单元尺寸对击穿电压的影响不大。该结构微单元击穿电压与平面型硅光电倍增管微单元结构的雪崩击穿电压几乎保持一致, 说明器件结构对击穿电压基本没有影响。雪崩发生时, 2 种尺寸微单元器件的电流几乎为 0, 在雪崩发生时的电流均迅速增大至几十微安。

2.2 电场强度

对 2 种结构的 SiPM 微单元进行电场强度仿真, 其仿真结果如图 7、图 8 所示。

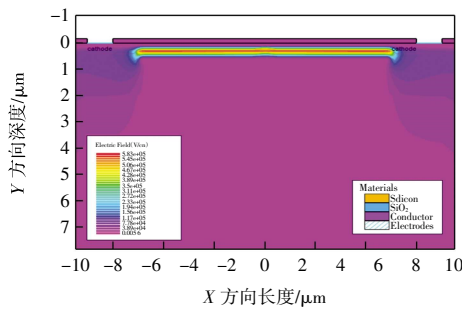


图 7 平面型硅光电倍增管微单元电场强度
 Fig.7 Electric field of planar SiPM microcell

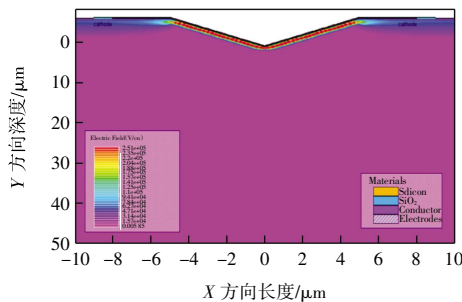


图 8 基于倒金字塔结构的硅光电倍增管微单元电场强度
 Fig.8 Electric field of SiPM microcell based on inverted pyramid structure

图 7、图 8 中, 红色代表高电场。可以观察到平面

型硅光电倍增管的高电场主要集中在 PN 结中心区域, 电场强度向两侧逐渐减弱, 避免了边缘击穿效应。对于倒金字塔结构的硅光电倍增管而言, 整个倒金字塔区域几乎全为电场强度超过 $2 \times 10^5\text{ V/cm}$ 的高电场。

图 9、图 10 所示为器件中心处沿 Y 方向的电场强度大小的变化曲线。

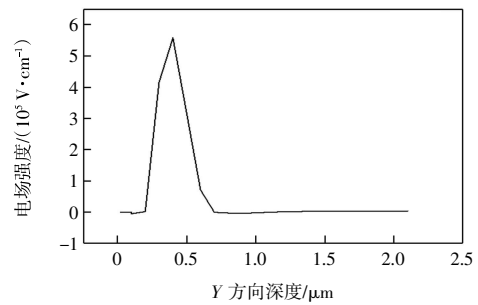


图 9 平面型硅光电倍增管中心处 Y 方向电场强度
 Fig.9 Electric field in Y direction at the center of planar SiPM

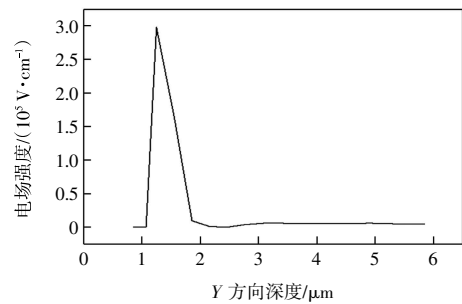


图 10 基于倒金字塔结构的硅光电倍增管中心处 Y 方向电场强度
 Fig.10 Electric field in Y direction at center of SiPM based on inverted pyramid structure

由图 9、图 10 可知, 电场强度由中心区域向两侧逐渐递减, 2 种结构的电场强度最大值分别约为 5.5×10^5 和 $3 \times 10^5\text{ V/cm}$, 大于 $2 \times 10^5\text{ V/cm}$, 电场强度小于 10^6 V/cm , 避免了齐纳击穿的发生。

2.3 光子探测效率仿真

2.3.1 雪崩产生率仿真

在平面型硅光电倍增管微单元尺寸为 $20\ \mu\text{m}$ 、过偏压为 6 V 时, 器件微单元中心沿 Y 方向雪崩产生率的变化趋势图像如图 11 所示。

由图 11 可以看出, 电子空穴对的雪崩产生率随纵向距离增大而逐渐增大, 雪崩产生率最高约为 90%, 最低约为 60%。基于倒金字塔结构的 SiPM 微单元边长分别为 $10\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \mu\text{m}$ 、过偏压为 6 V 时, 器件微单元中心沿 Y 方向雪崩产生率的变化趋势图像如图 12 所示。

由图 12 可以看出, 微单元尺寸为 $10\ \mu\text{m}$ 时, 雪崩产

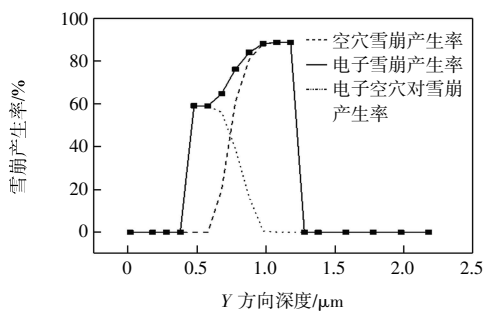
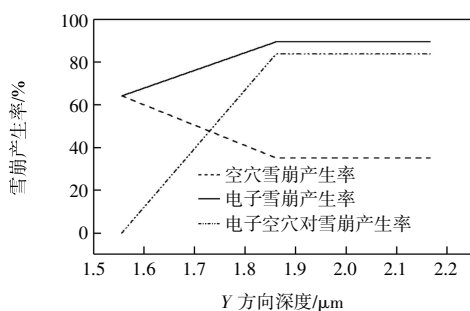
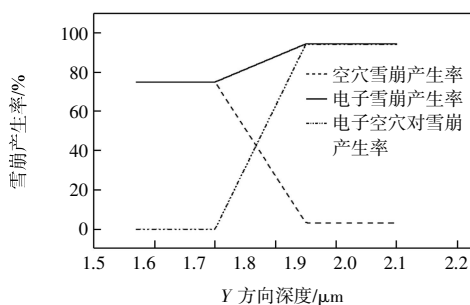


图 11 平面型硅光电倍增管中心处 Y 方向雪崩产生率
Fig.11 Generation rate of avalanche Joint in Y direction at center of planar SiPM



(a) 微单元尺寸为 10 μm



(b) 微单元尺寸为 20 μm

图 12 基于倒金字塔结构的硅光电倍增管中心处 Y 方向雪崩产生率

Fig.12 Generation rate of avalanche Joint in Y direction at center of SiPM based on inverted pyramid structure

生率最高约为 90%,最低约为 65%;微单元尺寸为 20 μm 时,雪崩产生率最高约为 95%,最低约为 75%。可见,2 种尺寸的微单元结构均具备较好的雪崩产生效果,并且雪崩产生概率随着器件微单元尺寸的增大而增大。

选取微单元尺寸为 10 μm 器件结构雪崩产生率最高的坐标点 (0,1.5),对其外加 -3~-7 V 范围内的过偏电压,得到该点的电子空穴对雪崩产生率曲线,如图 13 所示。由图 13 可以清晰地看到,雪崩击穿概率随偏置电压的增加在不断增大,但放大倍率不断减小。在靠近击穿电压的范围,雪崩效应趋于饱和。

2.3.2 量子效率仿真

图 14 所示为微单元尺寸 10 μm 的平面型硅光电

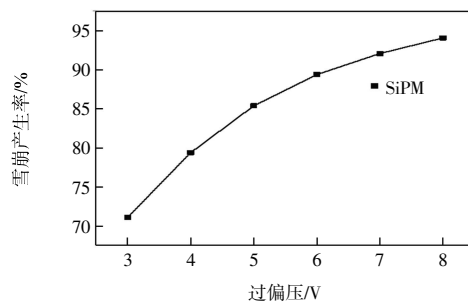


图 13 基于倒金字塔结构的硅光电倍增管不同偏压下(0,1.5)处的雪崩概率

Fig.13 Probability of avalanche Joint at (0,1.5) under different over bias voltage based on inverted pyramid structure

倍增管在过电压为 -6 V 时的量子效率仿真图像。

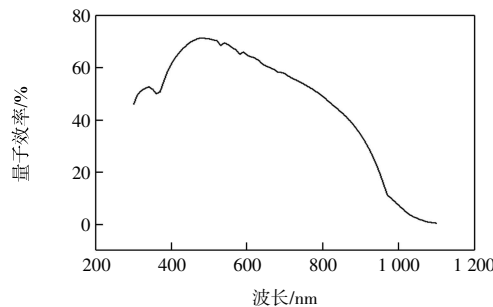


图 14 平面型硅光电倍增管的量子效率

Fig.14 Quantum efficiency of planar SiPM

由图 14 可知,量子效率的峰值位于 480 nm 处,约为 71.5%,900 nm 处的量子效率值为 34.3%。

图 15 所示为基于倒金字塔结构的硅光电倍增管微单元尺寸分别为 20 和 10 μm、过电压 -6 V 的量子效率仿真图像。

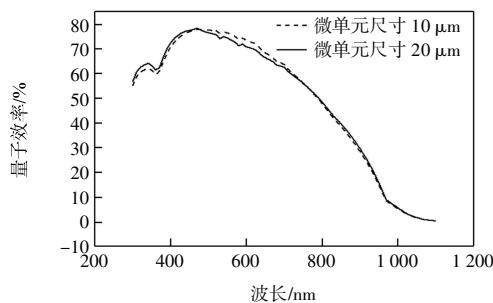


图 15 基于倒金字塔结构的硅光电倍增管的量子效率

Fig.15 Quantum efficiency of SiPM based on inverted pyramid structure

由图 15 可见,量子效率的峰值仍然位于 480 nm 处,峰值大小相等,没有随器件微单元尺寸的变化而变化,480 nm 处的量子效率约为 78%;微单元尺寸为 20 和 10 μm 的器件在 900 nm 处量子效率的大小分别

为 29.7%和28.5%，微单元尺寸为 20 μm 的器件量子效率略高于 10 μm 的器件。说明当器件材料、质量等条件不变时，微单元尺寸对量子效率的影响不明显。

2.3.3 几何填充因子仿真

本文设计的平面型硅光电倍增管器件的微单元尺寸分别为 20 μm 和 10 μm，每个微单元间距为 5 μm，计算得出平面型硅光电倍增管的几何因子约为 40%；而对于倒金字塔结构的 SiPM，有效光探测的 p 型区面积由原来的一个正方形平面变为倒金字塔结构的 4 个侧面，4 个侧面的总面积与原来的正方形面积比约为 1.79，这大大提高了几何因子，经计算，基于倒金字塔结构的 SiPM 的几何因子变为 70%。

2.3.4 光子探测效率仿真

图 16 为-19.5 V 工作电压下，20 μm 和 10 μm 2种微单元尺寸的基于倒金字塔结构的 SiPM 的 PDE 随波长变化的情况。由图 16 可知，微单元尺寸为 20 μm 时，470 nm 处的峰值 PDE 为 41.1%，900 nm 处的 PDE 约为 15.6%，微单元尺寸为 10 μm 时，480 nm 处的峰值 PDE 为 39.3%，900 nm 处的 PDE 约为 14.4%。

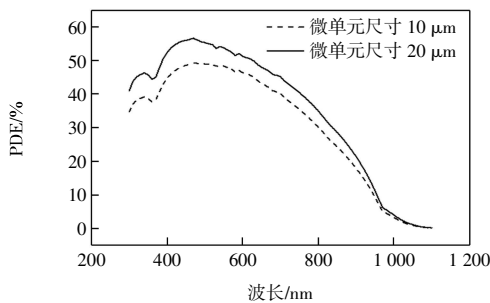


图 16 基于倒金字塔结构的硅光电倍增管的光子探测效率随波长的变化关系

Fig.16 PDE of SiPM based on inverted pyramid structure as a function of wavelength

图 17 所示为微单元尺寸为 20 μm 的平面型SiPM 的光子探测效率仿真图像。

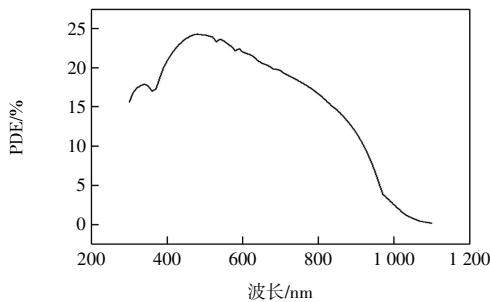


图 17 平面型硅光电倍增管的光子探测效率随波长的变化关系

Fig.17 PDE of planar SiPM as a function of wavelength

由图 17 可知，480 nm 处的峰值光子探测效率为

24.3%，900 nm 处的光子探测效率约为 11.2%。由此可得，基于倒金字塔结构的 SiPM 的光子探测效率高于相同尺寸的平面型 SiPM 的光子探测效率，并且该结构能够对近红外波段的光进行有效探测。

此外，图 18 给出了 900 nm 处不同过偏压条件下基于倒金字塔结构的 SiPM 2 种微单元尺寸的光子探测效率的大小，由趋势可以看到光子探测效率随过偏压的增大而增大。需要说明的是，工作电压越大，其暗电流和噪声特性就会变得越差。因此，如何在较低过偏压下获得较高的光子探测效率，是光电器件进一步研究的重点。

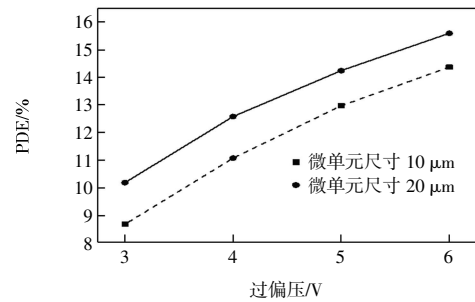


图 18 900 nm 处光子探测效率随过偏压的变化关系

Fig.18 PDE as a function of over bias voltage at 900 nm

为清晰阐述本文提出的基于倒金字塔结构的硅光电倍增管在近红外波段的优势，将其与平面型硅光电倍增管以及其他文献报道的硅光电倍增管器件加以比较，结果如表 1 所示。

表 1 不同结构 SiPM 近红外波段光子探测效率比较

Tab.1 Comparison of near-infrared photon detection efficiency of SiPM with different structures

SiPM 种类	工作电压/V	过电压/V	PDE/%
文献[7]器件	28	8	12(@900 nm)
文献[8]器件	50.4	7	22(@905 nm)
平面型 SiPM	19	6	11.2(@900 nm)
基于倒金字塔结构的 SiPM	19.5	6	15.6(@900 nm)

由表 1 可知，本文基于倒金字塔结构的硅光电倍增管在近红外波段的光子探测效率高于文献[7]所报道的器件光子探测效率，虽然低于文献[8]中器件在近红外波段的光子探测效率，但是器件结构比较简单，节约了成本。

3 结论

(1) 本文提出了一种平面型外延电阻淬灭型硅光电倍增管，通过加大离子注入能量，使得器件耗尽层

深度增加,从而更有效地对近红外波段的光进行探测,仿真得到过偏压 6 V、微单元尺寸为 20 μm 情况下,平面型硅光电倍增管的最大光子探测效率约为 24.3%,900 nm 处光子探测效率可达到 11.2%。

(2) 在平面型硅光电倍增管的基础上提出了一种新型的基于倒金字塔结构的硅光电倍增管,该器件的微单元结构在各向异性腐蚀后呈倒金字塔形状,在倒金字塔 4 个侧面以离子注入的方式形成 p-enrich 区域,增大了 PN 结的结面积,加大了有效光探测面积,提高了几何填充因子,在一定程度上提高了光子探测效率。仿真结果表明,过偏压 6 V、微单元尺寸为 20 μm 情况下基于倒金字塔结构的硅光电倍增管的最大光子探测效率约为 41.1%,900 nm 处光子探测效率可达到 15.6%,大于掺杂浓度相同的平面型 SiPM 微单元的光子探测效率,为设计适用于红外探测的非平面光电倍增器提供了新思路。

参考文献:

- [1] 陈法国,韩毅,于伟跃,等.硅光电倍增器在剂量测量中的应用现状与前景[J].核电子学与探测技术,2016,36(1):82-86.
CHEN F G, HAN Y, YU W Y, et al. Application status and perspective of silicon photomultiplier in dose measurement[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2016, 36(1): 82-86 (in Chinese).
- [2] ALTAMURA A R, ACERBI F, DI RUZZA B, et al. Radiation damage on SiPMs for space applications[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2023, 1045: 167488.
- [3] TRUNOV D N, MARIN V N, SADYKOV R A, et al. Multi-layer high-performance neutron scintillation counter based on SiPM and an organic light guide[J]. Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2022, 16(5): 826-830.
- [4] HADDADIFAM T, KARAMI M A. A theoretical study of digital silicon photomultiplier utilization in diffuse optical imaging systems[J]. Biomedizinische Technik Biomedical Engineering, 2019, 64(3): 357-363.
- [5] GASANOV A, GOLOVIN V, SADYGOV Z Y, et al. Avalanche photodetector based on metal-resistive-layer semiconductor structures[J]. Pisma, 1988, 14(8): 706-709.
- [6] 王麟.高增益、高探测效率的硅光电倍增器件研究[D].武汉:华中科技大学,2015.
WANG L. Research on silicon photomultiplier with high gain and high detection efficiency[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015 (in Chinese).
- [7] ACERBI F, PATERNOSTER G, GOLLA A, et al. Silicon photomultipliers and single-photon avalanche diodes with enhanced NIR detection efficiency at FBK[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, 912: 309-314.
- [8] ENGELMANN E, SCHMAILZL W, ISKRA P, et al. Tip avalanche photodiode: A new generation silicon photomultiplier based on non-planar technology[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(5): 6024-6034.
- [9] 刘红敏,龙金燕,代雷,等.大动态范围外延电阻淬灭型硅光电倍增器[J].光学精密工程,2020,28(3):535-541.
LIU H M, LONG J Y, DAI L, et al. Large dynamic range silicon photomultiplier with epitaxial quenching resistor[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(3): 535-541 (in Chinese).
- [10] 张琳,谢港,刘宇霄,等.外延电阻淬灭型硅光电倍增器的最新研究进展[J].红外与激光工程,2022(7):339-345.
ZHANG L, XIE G, LIU Y X, et al. Recent research progress of silicon photomultiplier with epitaxial quenching resistor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022(7): 339-345 (in Chinese).
- [11] 张倩颖.二氧化硅增透薄膜的制备及多功能化研究[D].西安:陕西科技大学,2021.
ZHANG Q Y. Preparation and multifunctional study of silicon dioxide anti-reflection film[D]. Xi'an: Shanxi University of Science & Technology, 2021 (in Chinese).
- [12] XU Y D, PENG C, XIN C F, et al. Preparation of silica antireflective films for solar energy application[J]. Materials Letters, 2013, 94: 89-91.
- [13] MERLOS A, ACERO M, BAO M H, et al. TMAH/IPA anisotropic etching characteristics[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1993, 37/38: 737-743.
- [14] 陈骄.硅的各向异性湿法腐蚀工艺及其在微纳结构中的应用研究[D].长沙:国防科学技术大学,2010.
CHEN J. Anisotropic wet etching process of silicon and its application in micro-nano structure[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010 (in Chinese).
- [15] 陈全胜,刘尧平,陈伟,等.不同硅晶面指数上的类倒金字塔结构研究与分析[J].物理学报,2018,67(22):316-325.
CHEN Q S, LIU Y P, CHEN W, et al. Different silicon crystal face index of inverted pyramid structure[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(22): 316-325 (in Chinese).
- [16] 吴俊桃.倒金字塔结构硅基太阳能电池及量产工艺研究[D].合肥:中国科学院大学,2020(in Chinese).
WU J T. Research on mass production and silicon solar cell of inverted pyramid structures[D]. Hefei: University of Chinese Academy of Sciences, 2020(in Chinese).
- [17] 严一峰.基于连续 CA 方法的硅各向异性腐蚀仿真[D].南(下转第 88 页)

- [14] HA J I. Voltage injection method for three-phase current reconstruction in PWM inverters using a single sensor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 767-775.
- [15] KIM H, JAHNS T M. Current control for AC motor drives using a single DC-link current sensor and measurement voltage vectors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(6): 1539-1547.
- [16] GU Y K, NI F L, YANG D P, et al. Switching-state phase shift method for three-phase-current reconstruction with a single DC-link current sensor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(11): 5186-5194.
- [17] 马鸿雁, 孙凯, 魏庆, 等. PWM 逆变器相电流重构研究与误差分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 108-114, 161.
MA H Y, SUN K, WEI Q, et al. Phase current reconstruction method for PWM inverter and error analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 108-114, 161 (in Chinese).
- [18] LU H F, CHENG X M, QU W L, et al. A three-phase current reconstruction technique using single DC current sensor based on TSPWM[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1542-1550.
- [19] 王文杰, 闫浩, 邹继斌, 等. 基于混合脉宽调制技术的永磁同步电机过调制区域相电流重构策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 6050-6059.
WANG W J, YAN H, ZOU J B, et al. Phase current reconstruction strategy of PMSM under overmodulation mode based on a hybrid space vector pulse width modulation technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 6050-6059 (in Chinese).
- [20] LAI Y S, LIN Y K, CHEN C W. New hybrid pulse-width modulation technique to reduce current distortion and extend current reconstruction range for three-phase inverter using only DC-link sensor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(3): 1331-1337.
- [21] 魏海峰, 陆彦如, 江廷宇, 等. 考虑非观测区补偿的永磁同步电机单电阻采样重构[J]. 电工技术学报, 2018, 33(12): 2695-2702.
WEI H F, LU Y R, JIANG T Y, et al. Single resistor sampling reconstruction of permanent magnet synchronous motor considering non-observation area compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(12): 2695-2702 (in Chinese).
- [22] TANG Q P, SHEN A W, LI W H, et al. Multiple-positions-coupled sampling method for PMSM three-phase current reconstruction with a single current sensor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 699-708.

本文引文格式:

- 耿强, 余朝阳, 周湛清. 基于测量矢量插入法的双电机相电流重构[J]. 天津工业大学学报, 2024, 43(6): 80-88.
GENG Q, YU Z Y, ZHOU Z Q. Phase current reconstruction of two motors based on measurement vector insertion method[J]. Journal of Tiangong University, 2024, 43(6): 80-88 (in Chinese).

(上接第 79 页)

- 京: 南京邮电大学, 2018.
YAN Y F. Simulation of anisotropic etching of silicon based on continuous CA method[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2018 (in Chinese).
- [18] 赵孟钢. 二氧化硅的氢氟酸缓冲腐蚀研究[J]. 科技信息, 2013(13): 196-197.
ZHAO M G. Research on buffering hydrofluoric fluoride corrosion of silicon dioxide[J]. Science & Technology Information, 2013(13): 196-197 (in Chinese).
- [19] 钱清友, 沈怡东. 二氧化硅湿法腐蚀速率的研究[J]. 天津化工, 2022, 36(2): 100-103.
QIAN Q Y, SHEN Y D. Study on wet etching rate of silicon dioxide[J]. Tianjin Chemical Industry, 2022, 36(2): 100-103 (in Chinese).
- [20] PIÑERO J C, VILLAR M P, ARAUJO D, et al. Impact of thermal treatments in crystalline reconstruction and electrical properties of diamond ohmic contacts created by boron ion implantation[J]. Physica Status Solidi (a), 2017, 214(11): 1-7.
- [21] GRIVICKAS P, ŠČAJEV P, KAZUCHITS N, et al. Carrier recombination parameters in diamond after surface boron implantation and annealing[J]. Journal of Applied Physics, 2020, 127(24): 245707.

本文引文格式:

- 陈力颖, 左金, 程传同, 等. 高性能近红外硅光电倍增管的设计[J]. 天津工业大学学报, 2024, 43(6): 73-79, 88.
CHEN L Y, ZUO J, CHENG C T, et al. Design on high performance of near-infrared silicon photomultiplier[J]. Journal of Tiangong University, 2024, 43(6): 73-79, 88 (in Chinese).