光电器件

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20260301003

近红外增强型硅基单光子探测器研究

黄 建*,郭安然,李睿智,马华平,刘丰豪
(重庆光电技术研究所,重庆 400060)

摘 要: 文章以平面拉通型SPAD结构为基础,利用Silvaco、TFCalc等仿真软件,对增透膜、吸收层、有源区掺杂分布等进行优化,完成了近红外增强型硅基单光子探测器设计。在器件表面构建黑硅结构以增强近红外单光子探测效率;采用退火与吸杂工艺修复损伤并排除杂质,从而降低暗计数率;进一步采用基于硝酸/氢氟酸/磷酸/硫酸混合溶液的湿法腐蚀工艺,实现黑硅近红外增强型硅单光子探测器制造。测试结果显示,该探测器的单光子探测效率在905 nm处达到59.8%,在1 060 nm处达13.1%,较未集成黑硅近红外增强结构器件分别提高42%和336%;暗计数率在263 K下小于400 Hz,在293 K下低于2 000 Hz,与常规平面型SPAD相当。得益于工艺兼容性,所采用的近红外响应增强技术具有广泛应用于SPAD、飞行时间直接测量型图像传感器、硅光电倍增管等光电探测器的潜力,可显著提高器件的灵敏度。

关键词: 黑硅;近红外增强;单光子雪崩二极管;单光子探测效率;暗计数率
中图分类号: TN364 **文章编号:** 1001－5868(2026)04－0616－06

Near-Infrared-Enhanced Silicon-Based Single-Photon Avalanche Diode Photodetector

HUANG Jian, GUO Anran, LI Ruizhi, MA Huaping, LIU Fenghao
(**Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN**)

Abstract: This paper presents the design of a near-infrared (NIR)-enhanced silicon-based single-photon avalanche diode (SPAD) using simulation software like Silvaco and TFCalc. This design employs a planar reach-through SPAD structure and achieves NIR enhancement via the optimization of the antireflection coatings, absorption layer, and doping distribution within active region, among other factors. A black silicon structure is utilized to improve the NIR single-photon detection efficiency, whereas annealing and gettering processes are employed to repair the damage, remove impurities, and reduce the dark count rate. The black silicon NIR-enhanced silicon single-photon detector is fabricated by a wet etching process using a mixed solution of nitric acid, hydrofluoric acid, phosphoric acid, and sulfuric acid. Test results demonstrate that the detector achieves single-photon detection rates of 59.8% and 13.1% at 905 and 1 060 nm, respectively. Compared with devices lacking the integrated black silicon NIR enhancement structure, the proposed structure improves the detection rates by 42% and 336% at 905 and 1 060 nm, respectively. The dark count rates of the black silicon detector are less than 500 and 2 000 Hz at 263 and 293 K, respectively, comparable to that of a conventional planar SPAD. Owing to its process compatibility, the proposed NIR-enhanced technique has considerable potential for significantly improving the sensitivity of various photodetectors, including SPAD, dTOF-CIS, and SPM.

Key words: black silicon; near infrared enhanced; single-photon avalanche diode; photo detection efficiency; dark count rate

收稿日期:2026－03－01.

*通信作者:黄 建

0　引言

硅单光子雪崩探测器(Single-Photon Avalanche Diode，SPAD)具有单光子探测效率(Photon Detection Efficiency，PDE)高、暗计数率(Dark Count Rate，DCR)小、死时间短、成本低等优点，在激光测距、微光探测、三维成像、量子通信等领域获得了广泛应用[1-4]。近年来，受自动/辅助驾驶、三维测绘等新兴市场推动，硅单光子探测器逐渐朝近红外波段发展，以适配人眼安全的激光工作波长。然而，受制于硅材料近红外吸收系数小(约为 277 cm^{-1}@905 nm，11 cm^{-1}@1 060 nm)[5]的物理特定限制，常规结构的 SPAD 器件在该波段的 PDE 极低(不超过 42%@905 nm，3%@1 060 nm)。若通过增加吸收层厚度来提高 PDE，则会极大增加 DCR 与工作过偏压要求，难以实现器件整体性能的提升[3-6]。

黑硅技术作为一种改进材料及器件性能的重要探测器技术，可在不增加吸收层厚度的情况下，大幅提高硅材料的近红外吸收率，因此受到了国内外学者的广泛研究[7-12]。然而，由于黑硅表面积较大、缺陷密度较高，易造成暗计数失控性增大，目前鲜有将其集成于 SPAD 的公开报道。本文首先基于 Silvaco、TFCalc 等仿真软件，完成了硅单光子探测器结构的优化设计；随后采用湿法腐蚀结合原子层淀积工艺，实现了黑硅的制备与片上集成；在不增加器件暗计数率、过偏压(V_{ex})等性能指标的前提下，大幅提高了探测器的近红外单光子探测效率，有效实现了器件综合性能的显著提升。

1　近红外增强型 SPAD 结构设计

1.1　总体结构

所制作的近红外增强型硅基 SPAD 采用正照平面拉通型总体结构(N^+ - P - π - P^+)，如图 1 所示。

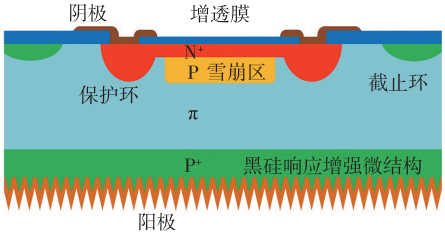


图 1　近红外增强型单光子探测器结构示意图

器件采用高阻单晶硅材料，以提高器件工作时内部电场，进而提高载流子漂移速度、减小器件响应时间；器件背面制作黑硅微结构，用于提高近红外光吸收效率，进而提高器件的单光子探测效率；器件进光面制作 SiO_2/Si_3N_4 近红外增透膜，以提高器件的外量子效率；表面有源区边缘制作保护环，提高器件抗击穿能力，进而提高器件环境适应性；有源区外围制作截止环，用以降低器件暗计数率。

1.2　结构参数

1.2.1　增透膜结构

增透膜结构主要影响入射光进入吸收区的效率，进而影响器件 PDE。采用硅工艺线常用的 SiO_2/Si_3N_4 作为近红外增透膜材料，以提高工艺兼容性。基于 TFCalc 薄膜设计软件，针对 905 nm，1 060 nm 激光波长增透需求，对增透膜系进行仿真优化，结果见图 2。该膜系(SiO_2 厚度为 17 nm，Si_3N_4 厚度为 95 nm)在 905 nm 透过率大于 99.9%，1 060 nm 透过率为 97.8%。

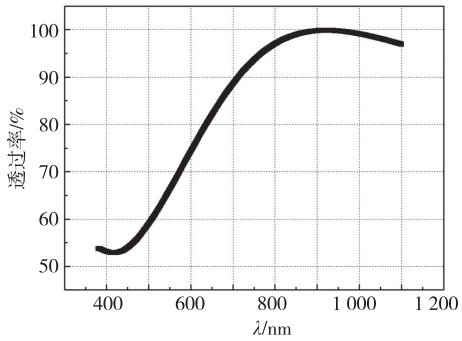


图 2　增透膜透射谱曲线

1.2.2　吸收层厚度

吸收层厚度限定了入射光的吸收空间，进而影响器件单光子探测器效率。PDE 计算公式为：

$$PDE = \eta \times F \times P \tag{1}$$

式中，η 为探测器光电转换效率，主要由增透膜、吸收层厚度、响应增强结构决定；F 为光敏区占空比；P 为雪崩触发概率，主要由雪崩层结构、吸收层厚度和工作偏压决定。

此外，吸收层厚度还会影响偏压分配比例(雪崩触发概率)、暗计数率产生体积、载流子输运距离等，进而影响单光子探测效率、暗计数率、死时间、时间抖动等性能参数。具体而言，吸收层厚度越厚，则光波吸收越充分，光子探测效率越高；但与此同时，雪崩层分压会减少，相同偏压下雪崩触发概率越低；吸收层越厚还会导致有源区体积越大，缺陷数量越多，暗计数率激发概率越大；由于载流子需要在更厚的吸收层中完成更长的漂移过程，载流子渡越时间

越长，响应速度越慢；吸收层越厚，俘获的光子释放行程更长，信号脉冲被检测出的时间点波动越大。由此可见，在保障光吸收效率前提下，应尽可能减小吸收层厚度，以达到最佳的综合性能平衡。

本文通过集成黑硅结构来实现PDE的提升，吸收层厚度则主要从保障雪崩触发概率方面考虑。基于Silvaco软件，采用Bipolar输运复合综合模型（含CONMOB，FLDMOB，CONSRH，AUGER，BGN等模型）、Okuto碰撞离化模型[13]、Geiger雪崩模型[14]、BBT隧穿模型[15]等，对不同吸收层厚度SPAD器件进行仿真，在不同工作偏压下的雪崩触发概率见图3。由图可见，在相同过偏压条件下，吸收层越厚，则雪崩触发概率越小。综合考虑吸收层厚度对光吸收效率影响，本文SPAD吸收层厚度确定为40 μm，雪崩触发概率P可达67.3%@V_{ex}=40 V。

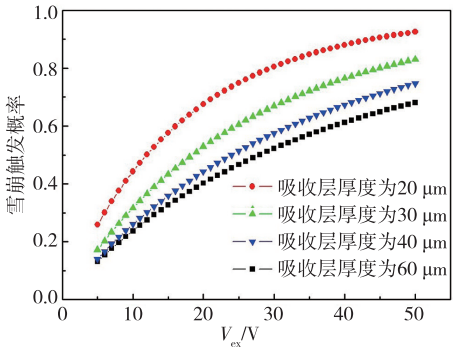


图3 吸收层厚度、过偏压与雪崩触发概率关系图

1.2.3 有源区结构

SPAD有源区包括电荷层（N^+）、雪崩层（P）、吸收层（π）、阳极层（P^+）等。通过调节雪崩层、电荷层掺杂剂量及掺杂深度、吸收层厚度及掺杂浓度等结构参数，可优化SPAD工作电压、暗计数率、时间抖动等参数。基于Silvaco软件，采用Bipolar，Okuto，Geiger，BBT等模型，优化了有源区结构，见表1～3。在过偏压40 V情况下，该结构的雪崩触发概率可达67.3%，暗计数率226 Hz@263 K。

表1 有源区结构参数表

参数名称	参数取值
雪崩层掺杂剂量	2×10^{12} cm^{-2}
雪崩层掺杂深度	3 μm
吸收层厚度	40 μm
吸收层掺杂浓度	3×10^{12} cm^{-3}
电荷层掺杂剂量	5×10^{14} cm^{-2}
电荷层掺杂深度	0.3 μm
有源区直径	120 μm

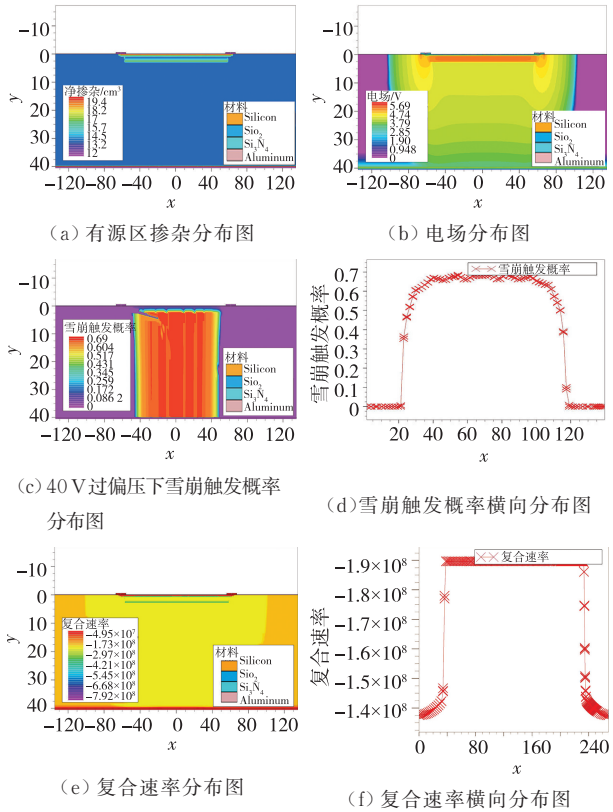
表2 仿真模型参数表

模型名称	参数名称	参数取值
SRH复合模型	TAUN0	1×10^{-6} s
	TAUP0	1×10^{-6} s
	ETRAP	0.3 eV

注：Bipolar，Okuto，Geiger，BBT等其他模型采用默认参数

表3 器件性能参数仿真计算值

参数名称	参数取值
吸收层雪崩触发概率均值	67.3%@V_{ex}=40 V
DCR	226 Hz@263 K



（a）有源区掺杂分布图 （b）电场分布图

（c）40 V过偏压下雪崩触发概率分布图 （d）雪崩触发概率横向分布图

（e）复合速率分布图 （f）复合速率横向分布图

图4 近红外增强型硅单光子探测器仿真模型与仿真结果

2 黑硅成型与SPAD集成制造

2.1 黑硅近红外吸收增强原理

黑硅近红外吸收增强主要来源于两个方面：表面微结构的陷光作用和能带改变。

如图5所示，黑硅表面微结构为密集尖锥结构，具有强烈的陷光作用。光入射到尖锥结构后在界面发生多次反射与折射，从而增加了光的吸收路径，进而提高了入射光的吸收率[16]。而且黑硅的等效折射率远大于空气，全反射临界角极小，可有效降低由入射（进硅的）光的二次出射（出硅）所引起的光损失。这就相当于在黑硅表面形成了一个光的“陷阱”，仅有极少数光能够“逃逸”出（1 100 nm以

下波段通常小于10%）。

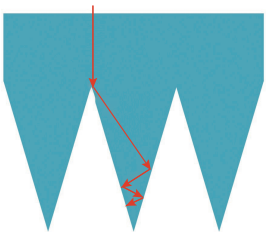


图 5　黑硅陷光原理示意图

黑硅能带改变主要通过两种方式：一是通过黑硅表面超精细微纳结构，或通过制作工艺形成的非晶态硅，形成超高密度局域态，减小禁带宽度；二是通过元素过饱和掺杂，形成中间能带，减小禁带宽度，从而延展吸收波长范围[16-21]。通常而言，黑硅表面微纳结构越精细、掺杂浓度越高，黑硅的禁带宽度越小，近红外光吸收也越强[21]，但是会减小少子寿命，增大器件的暗计数率。

2.2　黑硅成型工艺

黑硅成型工艺是近红外增强型 SPAD 的核心工艺，其形貌及缺陷密度直接决定了器件的 PDE 及暗计数率等核心性能指标。常见黑硅制作的工艺技术主要有：反应离子束刻蚀[16]、飞秒脉冲激光烧蚀[22]、电化学腐蚀[23]、金属辅助湿法腐蚀[24]等。不同制作技术获得的黑硅对光的吸收率不同，与其微结构差异也有紧密联系。黑硅尖锥角度越小，对近红外光的吸收效率也越高，但同时也会增大有源区表面积和缺陷密度，进而增大暗计数率。因此，选取工艺条件需根据器件应用需求折中优化处理。

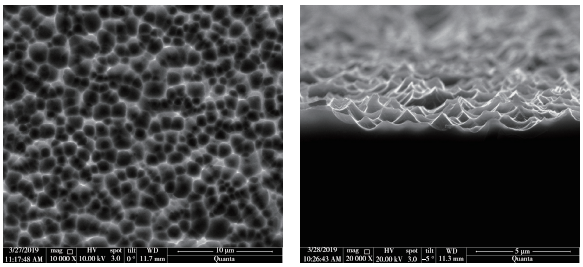
本文采用基于硝酸（HNO_3）/氢氟酸（HF）/磷酸（H_3PO_4）/硫酸（H_2SO_4）混合液的湿法腐蚀工艺制作黑硅。如图 6 所示，制得的黑硅微结构尺寸为 1～3 μm，黑硅尖锥角度适中，既具备良好的近红外吸收增强作用，又能够有效控制器件暗计数率。该湿法腐蚀工艺的化学反应方程式如（2）～（5）所示。其中，HNO_3 主要起氧化硅的作用，同时生成 NO_2，NO 等气体，离散地吸附在硅表面，辅助形成不均匀的腐蚀通道；HF 用于将氧化硅转换为水合物 H_2SiF_6；H_3PO_4 用于调节腐蚀表面粘滞度，控制反应速度与反应物扩散速度；H_2SO_4 用于游离氟含量控制，进而控制反应速度。通过调节 HNO_3/HF/H_3PO_4/H_2SO_4 混合液配比，借助粘滞在硅表面的反应生成气体所形成的不均匀腐蚀通道，控制后续硅的腐蚀去除，即可形成粗糙的黑硅表面形貌。

$$Si+4HNO_3\rightarrow SiO_2+4NO_2+2H_2O \quad (2)$$

$$Si+4NO_2+2H_2O\rightarrow SiO_2+4HNO_2 \quad (3)$$

$$Si+4HNO_2\rightarrow SiO_2+4NO+2H_2O \quad (4)$$

$$SiO_2+6HF\rightarrow H_2SiF_6+2H_2O \quad (5)$$



（a）顶视图　　（b）剖面图

图 6　湿法腐蚀制作的黑硅表面形貌 SEM 图

2.3　黑硅光电探测器制作工艺流程

黑硅光电探测器主要制作工艺流程见图 7。首先采用 LPCVD 工艺在正面制作 SiO_2/Si_3N_4 增透膜，对 905 nm 波段增透，进而提高外量子效率；通过离子注入掺杂后热退火处理形成保护环，提升抗边缘击穿能力；采用退火与吸杂工艺，修复损伤并排除杂质，以降低暗计数率；采用 2.2 节所述的湿法腐蚀工艺制作黑硅结构，提高器件 PDE，同时避免暗计数率过高；随后采用热蒸发工艺制作背面阳极，实现电学连接；采用氮氢退火工艺，减小金属半导体接触电阻；最后加强清洗与热处理并控制沾污，进一步降低器件暗计数率。

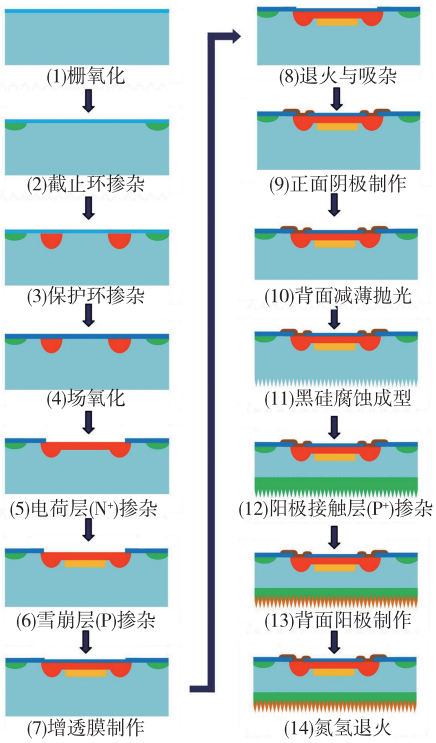


图 7　近红外增强型 SPAD 主要制作工艺流程

3 测试与分析

采用2.3节所述工艺制作了近红外增强型SPAD器件，对其响应光谱、PDE、暗计数率等参数与传统平面型SPAD器件（无黑硅近红外增强结构，其他结构相同）进行了对比测试。

3.1 响应光谱

图8为当偏置电压为10 V时，黑硅近红外增强型SPAD与传统平面型SPAD响应光谱对比图。由图可见，当波长小于800 nm时，两种器件响应率相当；当波长大于800 nm时，如1 060 nm处黑硅近红外增强型探测器响应率达到0.176 A/W，是平面型探测器响应率的4.4倍。这得益于黑硅陷光结构增加了吸收光程，以及黑硅微结构能带红移带来的近红外光吸收率增加，进而提高了近红外光光电转换效率。

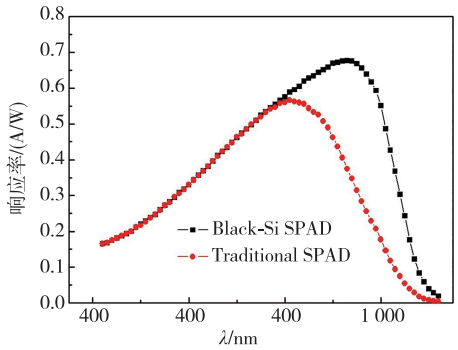


图8 近红外增强型与传统平面型SPAD响应光谱对比

3.2 单光子探测效率

如图9为黑硅近红外增强型SPAD与传统平面型SPAD的过偏压（V_{ex}）与PDE关系曲线对比图。由图可见，器件PDE随过偏压增加而增加，过偏压较低时增加速度较快，当过偏压大于20 V时，近红外增强型SPAD在905 nm波长下的PDE大于50%，1 060 nm波长PDE大于10%。随着过偏压继续增加，PDE变化较小，当过偏压为40 V时，近红外增强型SPAD在905 nm波长PDE可达59.8%，1 060 nm波长PDE可达13.1%，较传统平面型SPAD探测器PDE分别提高了42%和336%。结合器件（无倍增时）响应率计算（见图8），器件雪崩概率为63.7%@V_{ex}=40 V，与设计值（67.3%）吻合度较好，说明仿真模型、仿真参数与实际值接近。由此可见，黑硅陷光结构可显著提高硅SPAD近红外波段的单光子探测器效率。

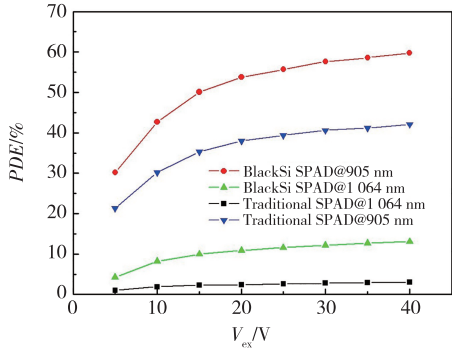


图9 近红外增强型与传统平面型SPAD探测器PDE对比

3.3 暗计数率

如图10为黑硅近红外增强型SPAD与传统平面型SPAD的暗计数率对比图。由图可见，器件暗计数率随过偏压增加而增加。黑硅近红外增强型SPAD与传统平面型SPAD的暗计数率相当（黑硅表面积更大，具有更多的结构缺陷，易形成暗计数产生中心，理论上暗计数率要远大于平面型SPAD），证明所采用的退火与吸杂工艺，可有效修复黑硅工艺损伤，降低暗计数率。当温度为293 K、过偏压为40 V时，暗计数率为1 978 Hz；当温度为263 K、过偏压为40 V时，暗计数率为384 K，与设计值（226 Hz）较为接近，这说明仿真模型、仿真参数与实际工艺较为匹配。

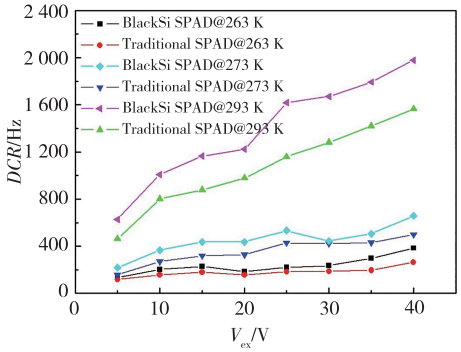


图10 近红外增强型与传统平面型SPAD暗计数率对比

4 结论与展望

基于湿法腐蚀工艺的黑硅具有较强的近红外增强效果，基于该结构制作的近红外增强型SPAD的PDE达到59.8%@905 nm，13.1%@1 060 nm，较未集成黑硅器件提高了42%@905 nm，336%@1 060 nm；DCR小于400 Hz@263 K，2 000 Hz@293 K，与常规平面型SPAD相当。得益于工艺兼容性，所采用的黑硅技术具有广泛应用于硅基SPAD、飞行时间直接测量型图像传感器（dToF-CIS）、硅光电倍增管（SiPM，MPPC）等光电探测器的潜力，可提高器件光子探测效率、暗计数率等性能，在微光探测、激光测距以及三维成像等领域具有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] 霍晓培，杨德振，喻松林，等. 单光子探测器研究现状与发展[J]. 激光与红外，2023，53(1)：3-11.
Huo Xiaopei，Yang Dezhen，Yu Songlin，et al. Research on status and development of single photon detector[J]. Laser & Infrared，2023，53(1)：3-11.

[2] 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.

[3] 丁　鹏，邓光平，马华平，等. 1 064nm单光子探测硅基SPAD探测组件设计[J]. 半导体光电，2024，45(6)：887-892.
Ding Peng，Deng Guangping，Ma Huaping，et al. Design of the 1 064 nm silicon single-photon avalanche photodiode module for photon detection [J]. Semiconductor Optoelectronics，2024，45(6)：887-892.

[4] 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.
Cheng Beitong，Dai Qian，Xie Xiumin，et al. Research progress of single-photon detectors[J]. Laser Technology，2022，46(5)：601-609.

[5] Johnson P B，Christy R W. Optical constants of the noble metals[J]. Physical Review B，1972，6(12)：4370-4379.

[6] Van Sieleghem E，Karve G，De Munck K，et al. A backside-illuminated charge-focusing silicon SPAD with enhanced near-infrared sensitivity[J]. IEEE Transactions on Electron Devices，2022，69(3)：1129-1136.

[7] 黄　建，雷仁方，江海波，等. 基于湿法腐蚀工艺的高性能黑硅光电探测器[J]. 半导体光电，2021，42(4)：464-468.
Huang Jian，Lei Renfang，Jiang Haibo，et al. High performance black silicon photodetector based on wet etching process[J]. Semiconductor Optoelectronics，2021，42(4)：464-468.

[8] 郑泽宇，罗　谦，徐开凯，等. 基于黑硅微结构的全硅PIN光电探测器[J]. 光电工程，2021，48(5)：200364.
Zheng Zeyu，Luo Qian，Xu Kaikai，et al. All-silicon PIN photodetector based on black silicon microstructure[J]. Opto-Electronic Engineering，2021，48(5)：200364.

[9] Richter A，Hermle M，Glunz S W. Reassessment of the limiting efficiency for crystalline silicon solar cells[J]. IEEE Journal of Photovoltaics，2013，3(4)：1184-1191.

[10] 邓光平，黄　建，鹿婷婷，等. 应用于高精度三维成像的硅基线性APD焦平面组件设计[J]. 半导体光电，2025，46(3)：456-463.
Deng Guangping，Huang Jian，Lu Tingting，et al. Design of a linear-mode Si-APD module for high accuracy 3D imaging[J]. Semiconductor Optoelectronics，2025，46(3)：456-463.

[11] Zhang P，Li S，Liu C，et al. Near-infrared optical absorption enhanced in black silicon *via* Ag nanoparticle-induced localized surface plasmon [J]. Nanoscale Research Letters，2014，9(1)：519.

[12] 王　锦，陶　科，李国峰，等. 倒金字塔结构的黑硅PIN光电探测器的研究[J]. 光电子·激光，2018，29(12)：1270-1274.
Wang Jin，Tao Ke，Li Guofeng，et al. Study of black silicon PIN photo-detector with inverted pyramidal structure [J]. Journal of Optoelectronics·Laser，2018，29(12)：1270-1274.

[13] Okuto Y，Crowell C R. Threshold energy effect on avalanche breakdown voltage in semiconductor junctions[J]. Solid-State Electronics，1975，18(2)：161-168.

[14] McIntyre R J. On the avalanche initiation probability of avalanche diodes above the breakdown voltage [J]. IEEE Transactions on Electron Devices，1973，20(7)：637-641.

[15] Schenk A. Rigorous theory and simplified model of the band-to-band tunneling in silicon[J]. Solid-State Electronics，1993，36(1)：19-34.

[16] Sheehy M A，Tull B R，Friend C M，et al. Chalcogen doping of silicon *via* intense femtosecond-laser irradiation[J]. Materials Science and Engineering：B，2007，137(1-3)：289-294.

[17] Pedraza A J，Fowlkes J D，Guan Y F. Surface nanostructuring of silicon [J]. Applied Physics A，2003，77(2)：277-284.

[18] Kim T G，Warrender J M，Aziz M J. Strong sub-band-gap infrared absorption in silicon supersaturated with sulfur [J]. Applied Physics Letters，2006，88(24)：241902.

[19] Crouch C H，Carey J E，Shen M，et al. Infrared absorption by sulfur-doped silicon formed by femtosecond laser irradiation[J]. Applied Physics A，2004，79(7)：1635-1641.

[20] Carey J E，Crouch C H，Shen M，et al. Visible and near-infrared responsivity of femtosecond-laser microstructured silicon photodiodes[J]. Optics Letters，2005，30(14)：1773.

[21] Kuboyama S，Ikeda N，Hirao T，et al. Enhanced avalanche multiplication factor and single-event burnout [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science，2003，50(6)：2233-2238.

[22] Sarnet T，Halbwax M，Torres R，et al. Femtosecond laser for black silicon and photovoltaic cells [J]. Commercial and Biomedical Applications of Ultrafast Lasers Ⅷ，2008，6881：688119.

[23] 刘光友，谭兴文，姚金才，等. 电化学制备薄黑硅抗反射膜[J]. 物理学报，2008，57(1)：514-518.
Liu Guangyou，Tan Xingwen，Yao Jincai，et al. “Black silicon” antireflection thin film prepared by electrochemical etching[J]. Acta Physica Sinica，2008，57(1)：514-518.

[24] 张安元，吴志明，赵国栋，等. 利用湿法刻蚀的方式制备黑硅[J]. 现代电子技术，2011，34(18)：133-136.
Zhang Anyuan，Wu Zhiming，Zhao Guodong，et al. Preparation of black silicon by means of wet etching [J]. Modern Electronics Technique，2011，34(18)：133-136.

作者简介：

黄　建(1984—)，男，重庆市人，博士，主要从事光电探测器研究。