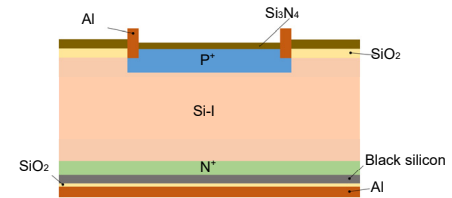


DOI: 10.12086/oe.2021.200364

## 基于黑硅微结构的全硅 PIN 光电探测器

郑泽宇<sup>1</sup>, 罗谦<sup>1</sup>, 徐开凯<sup>1\*</sup>, 刘钟远<sup>2</sup>, 朱坤峰<sup>3</sup><sup>1</sup>电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 610054;<sup>2</sup>中国电子科技集团第四十四研究所, 重庆 400060;<sup>3</sup>中国电子科技集团第二十四研究所, 重庆 400060

**摘要:** 本文报道了一种基于黑硅微结构的全硅 PIN 光电探测器。该器件结合了黑硅结构宽光谱高吸收的特性, 以及 PIN 光电探测器高量子效率高响应速度的特点, 通过在传统硅 PIN 光电探测器结构的基础上增加黑硅微结构层, 在不影响响应速度的条件下, 提高了探测器在近红外波段响应特性。并且针对纵向结构垂直入射 PIN 光电探测器时量子效率与响应速度相矛盾的问题, 提出了解决方案。测试结果表明, 该器件的量子效率可达 80%, 峰值波长为 940 nm, 光响应度达到 0.55 A/W, 暗电流降至 700 pA, 响应时间为 200 ns。

**关键词:** 全硅 PIN 光电探测器; 黑硅; 量子效率; 光响应度; 响应速度; 暗电流

**中图分类号:** TN36

**文献标志码:** A

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 Z Y, Luo Q, Xu K K, et al. All-silicon PIN photodetector based on black silicon microstructure[J]. *Opto-Electron Eng.*, 2021, 48(5): 200364

## All-silicon PIN photodetector based on black silicon microstructure

Zheng Zeyu<sup>1</sup>, Luo Qian<sup>1</sup>, Xu Kaikai<sup>1\*</sup>, Liu Zhongyuan<sup>2</sup>, Zhu Kunfeng<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Electronic Thin Film and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

<sup>2</sup>The 44th Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Chongqing 400060, China;

<sup>3</sup>The 24th Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Chongqing 400060, China

**Abstract:** An all-silicon PIN photodetector based on black silicon microstructure is reported. The device combines the characteristics of broad spectrum and high absorption of black silicon structure and the characteristics of high quantum efficiency and high response speed of PIN photodetectors. By adding a black silicon microstructure layer based on the traditional silicon PIN photodetector structure, the response characteristics of the detector in the near-infrared band are improved without affecting the response speed. A method is proposed to solve the contradiction between quantum efficiency and response speed in the vertical structure of the PIN photodetector. The test results show that the quantum efficiency of the device can reach 80%, and the peak wavelength is 940 nm. The light responsivity reaches 0.55 A/W, and the dark current is about 700 pA. The response time is 200 ns.

收稿日期: 2020-10-10; 收到修改稿日期: 2021-02-05

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFE0181500); 科技部资助项目(2018YFB2201203); 四川省杰出青年科学基金项目(2020JDJQ0022); 四川省科学技术厅资助项目(2019YFG0091); 四川省科学技术厅资助项目(2020ZHCG0008)

作者简介: 郑泽宇(1996-), 男, 硕士, 主要从事半导体光电器件与集成技术的研究。E-mail: 852510828@qq.com

通信作者: 徐开凯(1984-), 男, 博士, 教授, 主要从事半导体光电器件与集成技术的研究。E-mail: kaikaix@uestc.edu.cn

版权所有©2021 中国科学院光电技术研究所

**Keywords:** all-silicon PIN photodetector; black silicon; quantum efficiency; light responsivity; responding speed; dark current

## 1 引言

在所有半导体光电探测器中,硅基光电探测器是发展时间最长、工艺最成熟的器件。因其与标准 CMOS 工艺的兼容性,以及硅材料本身成本低且性能稳定的特性而备受关注。针对不同的应用领域,硅基光电探测器已经发展出了多样化结构,主要包括硅 PN 结光电探测器、硅 MSM 光电探测器、硅 APD 光电探测器与硅 PIN 光电探测器。其中硅基 PIN 光电探测器凭借其高灵敏度、高响应速度、低噪声以及性能稳定等特点,成为目前光电子领域中应用最广泛的探测器之一。

由于硅是间接带隙材料,不能吸收波长大于 1100 nm 的光波,基于纯硅材料无法在通信波段(1.31  $\mu\text{m}$ ~1.55  $\mu\text{m}$ )研制出高效的光探测器。探测这些波段时必须引入锗材料以实现硅基锗 PIN 光电探测器。自 2007 年 Intel 首次提出锗硅 PIN 光电探测器以来<sup>[1]</sup>,已有许多性能优秀的锗硅探测器被报道<sup>[2-5]</sup>。2017 年,Virot 等报道了一种基于横向 Si/Ge/Si 异质结的波导集成硅基锗 PIN 光电探测器,在波长 1550 nm 处光响应度高达 1.1 A/W,响应带宽超过了 50 GHz<sup>[2]</sup>。2019 年,Virot 等在之前研究的基础上提出一款可用于纳米光子集成电路的 25 Gbps 锗硅 PIN 光电探测器,在 -1 V 的低压下带宽为 9 GHz,暗电流小于 150 nA<sup>[3]</sup>。

在波长小于 1100 nm 的可见光和近红外光波段内,硅 PIN 光电探测器具有成本低且性能出色,被广泛应用于高能射线探测和环境监测等领域<sup>[6-8]</sup>。根据器件内部 PIN 结方向的不同,硅 PIN 探测器主要分为横向边入射型与纵向垂直入射型。通常边入射探测器比垂直入射探测器有更高的量子效率与光响应度<sup>[9]</sup>。2013 年,Abdullash 报道了一款高量子效率的横向 PIN 光电探测器,通过在 N 阱与 P 阱之间增加高阻本征层,在 800 nm 处实现了 0.62 A/W 的光响应度与 13.1 GHz 的 3 dB 带宽,量子效率接近 96%<sup>[10]</sup>。横向结构探测器多采用波导结构,通过将光的传播方向与载流子输运方向分离的方法解决高量子效率与高响应度之间的矛盾,从而提高了探测器的量子效率与响应速度。但波导结构工艺复杂,工程量大,因此横向边入射探测器制作成本较高。垂直入射探测器与横向入射探测器相比具有更大的光接收面积,工艺简单且制作成本更低。纵向结构探测器需要增加本征层的厚度来增加光吸

收,以提高光响应度与量子效率。但另一方面,为了提高器件响应速度,减小载流子渡越时间,器件的本征层被要求尽量做窄,这就使得器件的量子效率有所下降。这种量子效率与响应速度之间相互制约的关系阻碍了纵向结构探测器性能的进一步提高。若能解决量子效率与响应速度之间的矛盾,则垂直入射探测器的实用性更强,应用范围更广。

1998 年,美国哈佛大学 Mazur 团队首次发现采用飞秒激光技术对硅材料进行表面改造后形成的硅微结构具有宽光谱高吸收特性,对可见光及近红外光波段的光几乎全部吸收。因肉眼观察呈黑色,这种硅微结构被称为“黑硅”<sup>[11-12]</sup>。黑硅的这一性质在高性能光电探测器领域具有重要的应用潜力,并且已经被用于光伏领域之中研制出了高效率的太阳能电池<sup>[13]</sup>。但在硅 PIN 光电探测器领域,黑硅结构的应用却鲜有报道。

本文研制出基于黑硅微结构层的 PIN 光电探测器,提出了在不影响探测器响应速度的情况下提升器件光响应度的方法。通过在常规 PIN 探测器结构的基础上于器件背面设置黑硅微结构层,提高了器件对可见光及近红外光的吸收率。这种黑硅微结构层还优化了探测器的表面钝化效果,降低了器件暗电流水平。经测试验证,相较于常规硅 PIN 光电探测器,该器件在近红外波段的光响应度与量子效率均有明显提升。

## 2 器件结构与制备

图 1 为基于黑硅微结构层的全硅 PIN 光电探测器的横截面示意图。器件包括: N 型硅衬底层(I 区)、P 型重掺杂光敏区(P<sup>+</sup>区)、N 型重掺杂区(N<sup>+</sup>区)、黑硅微结构层、SiO<sub>2</sub>钝化膜、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>增透膜与金属铝电极。其中重掺杂层厚度约为 150 nm ~ 200 nm, P<sup>+</sup>区注入硼离

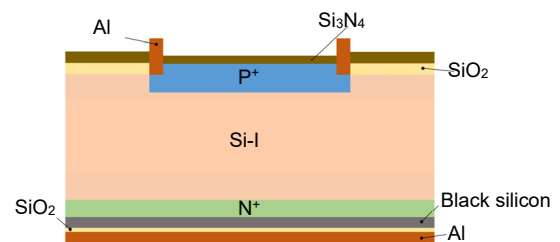


图 1 基于黑硅微结构的全硅 PIN 光电探测器横截面示意图

Fig. 1 Cross-sectional schematic diagram of an all-silicon PIN photodetector based on the black silicon microstructure

子, 掺杂浓度为  $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\text{N}^+$ 区注入磷离子, 掺杂浓度为  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\text{N}$ 型硅衬底层厚度约为  $250 \mu\text{m}$ 。所述黑硅微结构层利用飞秒激光技术于  $\text{N}^+$ 区下表面制成。器件钝化膜设置在黑硅微结构层表面, 增透膜设置在  $\text{P}^+$ 区表面,  $\text{P}$ 电极与  $\text{N}$ 电极分别通过钝化膜与增透膜上设置的电极孔与  $\text{P}^+$ 区、 $\text{N}^+$ 区接触。

这种黑硅微结构在近红外波段的光吸收率可达到90%以上。之所以黑硅微结构层可以提高探测器在近红外波段的量子效率与光响应度, 一方面是因为飞秒激光辐照硅材料的过程中, 通过超短光脉冲与硅材料之间剧烈的瞬态相互作用,  $\text{S}$ 元素过饱和地掺入到  $\text{Si}$ 晶格中, 在硅材料表面形成突破材料固溶度极限的过饱和掺杂<sup>[14-15]</sup>。过饱和掺杂的  $\text{S}$ 元素在硅材料表面形成深能级, 使得能量小于禁带的光子也能被这种改性硅材料所吸收, 从而提高硅对近红外光的吸收率<sup>[16]</sup>。另一方面是因为这种黑硅微结构层与背面铝电极形成光反射镜, 可以有效地将未吸收的近红外光反射回衬底, 改变了入射光的反射途径, 增加了入射光在耗尽区内的有效光路长度, 使得耗尽区内产生了更多的光生载流子, 光电流显著提升。不同于文献<sup>[17-19]</sup>中密集型或针状的结构, 该器件形成的黑硅微结构表面更为平缓, 形成的凸点较大且分布较为均匀。在制成光电探测器过程中, 这种准周期凸点状结构的表面钝化效果比针状结构更好, 可以有效降低器件的表面态密度与表面电荷复合率, 减小了热场激发电流和表面产生-复合电流。该黑硅微结构层通过优化表面钝化效果从而减小器件的表面漏电流, 达到降低器件总暗电流的目的, 提高了探测器的灵敏度。

为提高器件的响应速度, 选用厚度为  $625 \mu\text{m}$ 、电阻率为  $2000 \Omega \cdot \text{cm}$  的高阻  $\text{N}$ 型硅材料作为衬底。首先在衬底层上表面生长  $\text{SiO}_2$  氧化层, 然后在所述氧化层上光刻出有源区, 采用离子注入与高温扩散相结合对有源区进行掺杂处理形成  $\text{P}^+$ 区。随后在完成掺杂处理的衬底层上表面生长  $\text{Si}_3\text{N}_4$  增透膜, 之后通过背面减薄工艺将硅片减薄到  $250 \mu\text{m}$  后, 同样采用离子注入与高温扩散相结合对衬底层下表面进行掺杂处理, 形成  $\text{N}^+$ 区。

掺杂处理完成后的硅片依次经三氯乙烯 ( $\text{C}_2\text{HCl}_3$ )、丙酮 ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ )、甲醇 ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) 清洗。在高浓度硫气氛中, 钛蓝宝石激光再生放大器产生的波长  $800 \text{ nm}$ 、脉冲宽度  $100 \text{ fs}$ 、频率  $1 \text{ kHz}$ 、功率  $2 \text{ W}$  的飞秒脉冲垂直照射到  $\text{N}^+$ 区的下表面上, 移动硅衬底使其保持一定速度相对于激光束进行平移, 获得了大面积

黑硅微结构。图 2 为制得的黑硅微结构层的电镜扫描图, 从图中可以看出, 衬底表面形成了约  $0.5 \mu\text{m} \sim 1 \mu\text{m}$  高、准周期分布的暗黑色丘状凸点, 凸点较大且表面平缓。之后采用 PECVD 设备在黑硅微结构层表面生长  $\text{SiO}_2$  钝化层。最后, 在增透膜与钝化膜上分别光刻出  $\text{P}$  电极孔与  $\text{N}$  电极孔, 在相应电极孔内分别制作出  $\text{P}$  铝电极与  $\text{N}$  铝电极。制成的硅光电探测器的光敏面积为  $5.8 \text{ mm} \times 5.8 \text{ mm}$ , 器件封装在  $\text{T0-8}$  型管座内。

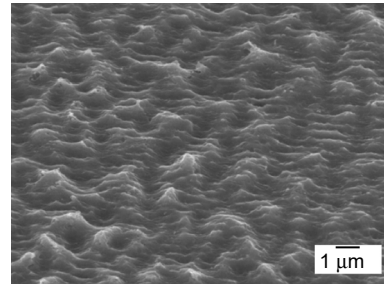


图 2 黑硅微结构层电镜扫描图  
Fig. 2 Scanning electron microscope image of the black silicon microstructure layer

### 3 测试结果与讨论

#### 3.1 器件光谱响应测试

光响应度与量子效率是光电探测性能最重要的指标之一, 是衡量探测器光电转换能力的参数。光电探测器转化的光电流与有效入射光功率的比值定义为光响应度, 器件在不同波长的光照射条件下的光响应度即光谱响应。外量子效率定义为一个入射光子所能产生的电子数目, 和光响应度是对应关系, 其转换式:

$$R = \frac{I_p}{P_{\text{opt}}} = \frac{q\eta_{\text{ex}}}{h\nu}, \quad (1)$$

其中:  $R$  为光响应度,  $I_p$  为光电流,  $P_{\text{opt}}$  为入射光功率,  $\eta_{\text{ex}}$  是量子效率,  $h$  是普朗克常数,  $\nu$  为入射光频率。与外量子效率对应的物理量是内量子效率  $\eta_{\text{in}}$ , 定义为一个入射光子所产生的电子-空穴对的数目。对于 PIN 光电探测器,  $300 \mu\text{m}$  的硅片可以使波长在  $100 \text{ nm}$  以下的光的内量子效率接近  $100\%$ 。若设吸收层厚度为  $d$ , 材料吸收系数为  $\alpha$ , 外量子效率与内量子效率的关系:

$$\eta_{\text{ex}} = (1 - R)(1 - e^{-\alpha d})\eta_{\text{in}}. \quad (2)$$

由式(1)与式(2)可得, 若要提高探测器响应度和量子效率, 可以增加吸收层厚度。在具有黑硅结构的 PIN 探测器中, 黑硅微结构层与背面铝电极形成光反射镜, 使得入射光来回反射, 相当于增加了吸收层厚度  $d$ , 提高器件对光的吸收能力。

图 3(a)为本文提出的黑硅 PIN 探测器 GD3252Y

与滨松公司生产的 S1336 器件<sup>[20]</sup>、S3477 器件<sup>[21]</sup>和 S12698<sup>[22]</sup>器件的光谱响应曲线。由图中可以看出, GD3252Y 的光谱响应范围为 400 nm ~ 1100 nm。在 700 nm ~ 1000 nm 之间, 基于黑硅结构的探测器的响应度明显高于同光敏面积的其他器件。该器件峰值波长为 940 nm, 响应度达到了 0.55 A/W。S1336 器件的峰值波长为 900 nm, 响应度为 0.5 A/W。S12698 的峰值波长为 800 nm, 响应度为 0.38 A/W。S3477 的峰值波长为 960 nm, 响应度为 0.42 A/W。可以看出, 黑硅 PIN 探测器在近红外光波段处的光响应度相较于常规 PIN 探测器有明显提升, 提升幅度在 10% 以上。图 3(b) 给出了黑硅 PIN 光电探测器 GD3252Y 的量子效率曲线, 为便于对比, 图中还给出了常规 PIN 探测器的量子效率曲线。可以看出, 在 10 mV 的反向偏压下, GD3252Y 器件量子效率最高可达 80%。与常规 PIN 探测器相比, 黑硅 PIN 探测器在 700 nm ~ 1000 nm 近红外光波段内, 量子效率均有提升, 其中在波长 850 nm 附近的量子效率提升最大, 约为 16% 以上。当波长超过 1000 nm 后, 探测器的量子效率与光响应度迅速下降, 主要是因为硅对于长波长光的吸收系数迅速降低导致。本文

研制的黑硅微结构探测器不同于传统硅 PIN 探测器, 没有采用加宽器件本征层的方式提高器件的光响应度, 因此可以在不影响探测器的响应速度条件下提升器件的光响应度与量子效率。

### 3.2 器件暗电流测试

暗电流为探测器在反向偏置且无光照情况下的泄漏电流。器件的暗电流水平决定了探测器所能探测器的最小光信号强度, 是光电探测器最重要的参数之一。暗电流通常由体内漏电流和表面漏电流组成, 是系统噪声的主要来源。

对黑硅 PIN 光电探测器在常温下光电特性的测试结果如表 1 所示。当测试所加反向偏置电压为 10 mV 时, 测得基于黑硅微结构层的 PIN 探测器暗电流为 700 pA 左右, 低于一般 PIN 光电探测器 nA 级别的暗电流水平, 与滨松 S1336 与 S12698 器件暗电流水平相当, 满足应用于微光探测的器件要求。

表 1 基于黑硅微结构的 PIN 光电探测器的光电特性 (T<sub>a</sub>=23 °C)

Table 1 Photoelectric characteristics of the PIN photodetector based on the black silicon microstructure (T<sub>a</sub>=23 °C)

Parameter	Test conditions	Typical value
Photosensitive area size (A)		5.8 mm×5.8 mm
Spectral response range (λ)		400 nm ~ 1100 nm
Rise time (t <sub>r</sub> )	V <sub>R</sub> =10 mV	200 ns
Dark current (I <sub>b</sub> )	V <sub>R</sub> =10 mV	700 pA
Capacitance (C <sub>i</sub> )	F=10 MHz V <sub>R</sub> =10 mV	280 pF
Reverse voltage (V <sub>R</sub> )		10 mV

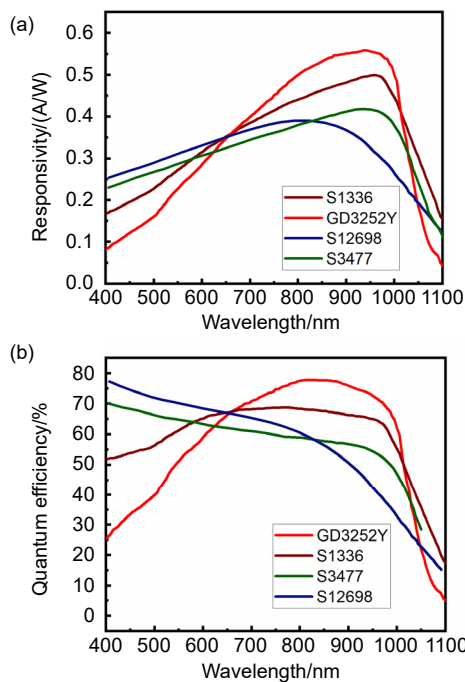


图 3 基于黑硅微结构的硅 PIN 光电探测器 GD3252Y 与常规 PIN 光电探测器光谱响应和量子效率的对比曲线

Fig. 3 Comparison curves of spectral response and quantum efficiency between silicon PIN photodetector GD3252Y based on the black silicon microstructure and the conventional PIN photodetector

### 3.3 器件响应速度测试

影响探测器响应速度的主要因素包括光生载流子渡越耗尽区的漂移时间、光生载流子从耗尽区外扩散至耗尽区的扩散时间以及探测器本身电容的充放电时间(RC 时间常数)。为提高器件的响应速度, 通常将本征区(I 区)完全耗尽, 使得扩散时间接近于零, 并且尽可能将 I 区做窄, 减小光生载流子的距离, 缩短漂移时间。由于探测器本身也是一种阻抗原件, 在光电转换的过程中存在一定的时间常数。最小化器件电容, 可降低 RC 时间常数, 提高器件响应速度。

硅基 PIN 光电探测器的电容主要通过影响上升时间而直接影响器件的响应速度, 器件的电容越小, 上升时间越短。当测试电压为 10 mV 反向偏置电压, 频率为 10 MHz 时, 器件结电容典型值为 280 pF。测试所得的黑硅 PIN 探测器电容特性曲线如图 4 所示, 从

图中可以看出, 器件的结电容随反向偏压的增大呈现出先急剧减小后基本不变的趋势, 约在 10 V 后趋于稳定。这是由于反向偏压较小时, 耗尽区没有完全展宽。随着反向偏压增大, 耗尽区展开的宽度也随之增大, 使得结电容迅速减小。当耗尽区完全展宽后其宽度不再产生变化, 并且小光强入射条件下耗尽区内存在的堆积载流子的影响较小, 因此探测器的电容基本趋于稳定。由表 1 可知, 测试得器件的响应时间为 200 ns, 符合快速响应光电探测器等应用要求。

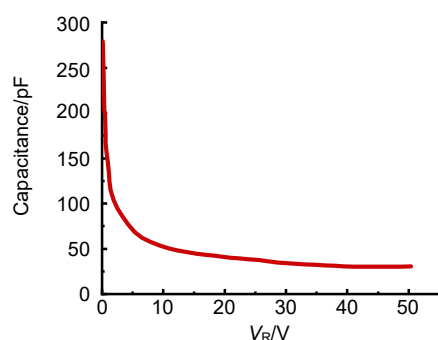


图 4 基于黑硅微结构的全硅 PIN 光电探测器电容特性曲线

Fig. 4 Capacitance characteristic curve of the all-silicon PIN photodetector based on black silicon microstructure

## 4 结论

报道了基于黑硅微结构的全硅 PIN 光电探测器。该器件采用飞秒激光技术, 在常规 PIN 光电探测器结构的基础上增设黑硅结构层, 以提高器件对近红外光的吸收能力。对器件的光电特性进行测试后, 测试结果表明, 相较于常规硅 PIN 光电探测器, 该器件在近红外光波段处的光响应度提升约 10%, 量子效率达到 80%。本文提出一种解决纵向结构垂直入射型全硅 PIN 探测器量子效率与响应速度之间的矛盾的方法, 改善了因长波光子在普通硅材料中穿透深度较大而导致全硅探测器在近红外光波段响应特性差的现状。相对于传统密集针状黑硅结构, 这种平缓凸点状的黑硅微结构层表面钝化效果较好, 可降低光电探测器的暗电流水平。

## 参考文献

- [1] Yin T, Cohen R, Morse M M, *et al.* 31 GHz Ge *n-i-p* waveguide photodetectors on Silicon-on-Insulator substrate[J]. *Opt Express*, 2007, **15**(21): 13965–13971.
- [2] Virost L, Benedikovic D, Szelag B, *et al.* Integrated waveguide PIN photodiodes exploiting lateral Si/Ge/Si heterojunction[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(16): 19487–19496.
- [3] Benedikovic D, Virost L, Aubin G, *et al.* 25 Gbps low-voltage hetero-structured silicon-germanium waveguide pin photodetectors for monolithic on-chip nanophotonic architectures[J]. *Photonics Res*, 2019, **7**(4): 437–444.
- [4] Chen H, Verheyen P, De Heyn P, *et al.* Dark current analysis in high-speed germanium p-i-n waveguide photodetectors[J]. *J Appl Phys*, 2016, **119**(21): 213105.
- [5] Chen H, Verheyen P, De Heyn P, *et al.* -1 V bias 67 GHz bandwidth Si-contacted germanium waveguide p-i-n photodetector for optical links at 56 Gbps and beyond[J]. *Opt Express*, 2016, **24**(5): 4622–4631.
- [6] Cho H M, Barber W C, Ding H J, *et al.* Characteristic performance evaluation of a photon counting Si strip detector for low dose spectral breast CT imaging[J]. *Med Phys*, 2014, **41**(9): 091903.
- [7] Vaseashta A, Khudaverdyan S. *Advanced Sensors for Safety and Security*[M]. Dordrecht: Springer, 2013.
- [8] Ho C K, Robinson A, Miller D R, *et al.* Overview of sensors and needs for environmental monitoring[J]. *Sensors*, 2005, **5**(2): 4–37.
- [9] Menon P S, Shaari S. Surface versus lateral illumination effects on an interdigitated Si planar PIN photodiode[J]. *Proc SPIE*, 2005, **5881**: 58810S.
- [10] Tasirin S K, Menon P S, Ahmad I, *et al.* High performance silicon lateral PIN photodiode[J]. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci*, 2013, **16**: 012032.
- [11] Her T H, Finlay R J, Wu C, *et al.* Microstructuring of silicon with femtosecond laser pulses[J]. *Appl Phys Lett*, 1998, **73**(12): 1673–1675.
- [12] Wu C, Crouch C H, Zhao L, *et al.* Near-unity below-band-gap absorption by microstructured silicon[J]. *Appl Phys Lett*, 2001, **78**(13): 1850–1852.
- [13] Savin H, Repo P, von Gastrow G, *et al.* Black silicon solar cells with interdigitated back-contacts achieve 22.1% efficiency[J]. *Nat Nanotechnol*, 2015, **10**(7): 624–628.
- [14] Winkler M T, Sher M J, Lin Y T, *et al.* Studying femtosecond-laser hyperdoping by controlling surface morphology[J]. *J Appl Phys*, 2012, **111**(9): 093511.
- [15] Crouch C H, Carey J E, Shen M, *et al.* Infrared absorption by sulfur-doped silicon formed by femtosecond laser irradiation[J]. *Appl Phys A*, 2004, **79**(7): 1635–1641.
- [16] Sher M J. Intermediate band properties of femtosecond-laser hyperdoped silicon[D]. Cambridge, Massachusetts: Harvard University, 2013.
- [17] Baker - Finch S C, McIntosh K R. Reflection distributions of textured monocrystalline silicon: implications for silicon solar cells[J]. *Prog Photovolt*, 2013, **21**(5): 960–971.
- [18] Peng K Q, Xu Y, Wu Y, *et al.* Aligned single-crystalline Si nanowire arrays for photovoltaic applications[J]. *Small*, 2005, **1**(11): 1062–1067.
- [19] Shen M Y, Crouch C H, Carey J E, *et al.* Femtosecond laser-induced formation of submicrometer spikes on silicon in water[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, **85**(23): 5694–5696.
- [20] Hamamatsu Photonics. Silicon photodiode S1336-8BK[EB/OL]. [2021-01-12]. <http://www.hamamatsu.com.cn/product/17585.html>.
- [21] Hamamatsu Photonics. Silicon photodiode S3477-04[EB/OL]. [2021-01-12]. <http://www.hamamatsu.com.cn/product/17626.html>.
- [22] Hamamatsu Photonics. Silicon photodiode S12698-02[EB/OL]. [2021-01-12]. <http://www.hamamatsu.com.cn/product/18699.html>.

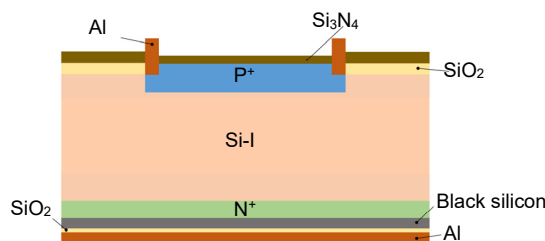
# All-silicon PIN photodetector based on black silicon microstructure

Zheng Zeyu<sup>1</sup>, Luo Qian<sup>1</sup>, Xu Kaikai<sup>1\*</sup>, Liu Zhongyuan<sup>2</sup>, Zhu Kunfeng<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Electronic Thin Film and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

<sup>2</sup>The 44th Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Chongqing 400060, China;

<sup>3</sup>The 24th Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Chongqing 400060, China



Cross-sectional schematic diagram of an all-silicon PIN photodetector based on the black silicon microstructure

**Overview:** Silicon-based PIN photodetectors have become one of the most widely used detectors in the field of optoelectronics due to their high photoresponse, fast response speed, and stable performance. Since silicon is an indirect band gap material and cannot absorb light waves with a wavelength greater than 1100 nm, silicon PIN photodetectors are mostly used to detect visible light and near-infrared light.

According to the direction of the PIN junction inside the device, silicon PIN detectors are mainly divided into lateral side incident type and vertical surface incident type. Although the vertical incidence silicon PIN photodetector has a larger light receiving area than the horizontal PIN detector, the band gap of silicon limits its ability to absorb near-infrared light. In order to improve the response speed of traditional silicon PIN photodetectors with vertical incidence, the high resistance intrinsic region is usually narrowed to minimize the drift time of photo-generated carriers. However, a too thin I region will cause the incident long-wave photons to be emitted from the device without completely converting them into photo-generated carriers, which reduces the quantum efficiency and photoresponsivity of the device. Therefore, the vertical incidence silicon PIN photodetector faces the contradiction between high quantum efficiency and high response speed.

This paper reports an all-silicon PIN photodetector based on the black silicon microstructure. Femtosecond laser technology is used to set a layer of the black silicon microstructure on the back of the traditional PIN detector to form supersaturated doping on the surface of the silicon material. The photons with energy less than the band gap can also be absorbed by the modified silicon material, which improves the absorption rate of visible light and near-infrared light. And this black silicon microstructure layer also forms a light reflector with the back aluminum electrode, which can effectively reflect the unabsorbed near-infrared light back to the substrate and increase the incident light in the depletion zone by changing the reflection path of the incident light. The effective optical path length makes more photo-generated carriers generated in the depletion region, which improves the light responsivity and quantum efficiency of the device in the near-infrared band.

By adding a black silicon microstructure layer on the basis of the traditional silicon PIN photodetector structure, the response characteristics of the detector in the near-infrared band are improved without affecting the response speed. A method is proposed to solve the contradiction between the quantum efficiency and the response speed in the vertical structure of the PIN photodetector. It has been tested and verified that the device has a responsivity of 0.55 A/W at 940 nm, which is about 10% higher than the traditional PIN detector. The quantum efficiency can reach 80%.

Zheng Z Y, Luo Q, Xu K K, *et al.* All-silicon PIN photodetector based on black silicon microstructure[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(5): 200364; DOI: 10.12086/oe.2021.200364

Foundation item: National Key R&D Program of China (2018YFE0181500), the Ministry of Science and Technology (2018YFB2201203), the Science Foundation for Distinguished Young Scholars of Sichuan (2020JDJQ0022), Sichuan Provincial Department of Science and Technology (2019YFG0091), and Sichuan Provincial Department of Science and Technology (2020ZHCG0008)

\* E-mail: kaikaix@uestc.edu.cn