

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.03.008

短波红外自滤波超窄带锗平面结构光电探测器

方昶月, 王莉, 王艺飞, 柳宇健, 罗林保

(合肥工业大学 微电子学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:文章基于锗平面肖特基结构,通过调控光生载流子收集过程中的复合作用,成功研制探测波长位于1 290 nm、半高宽仅为8 nm且无需滤光片的自驱动短波红外光电探测器。该器件性能稳定,抗干扰能力强,在接收1 290 nm光信号时,器件的串扰值在1 278~1 311 nm波长范围以外均小于-10 dB,可应用于红外系统信息的采集。文章研究结果可以为相关窄带探测器的设计提供理论和实验参考。

关键词:窄带探测;锗;肖特基结;短波红外;光电探测器

中图分类号:TN215

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2025)03-0343-05

Filterless short-wavelength infrared ultra-narrowband planar-type Ge photodetector

FANG Changyue, WANG Li, WANG Yifei, LIU Yujian, LUO Linbao

(School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: In this work, a filterless self-powered short-wavelength infrared narrowband photodetector was realized based on a planar-type Ge Schottky structure by adjusting the recombination in the photo-generated carrier collection process, with a response peak located at 1 290 nm. And the full width at half maximum of the device was only 8 nm. It exhibited high stability and anti-interference ability. Unless the wavelength of the background light was in the range of 1 278-1 311 nm, the crosstalk value of the device remained below -10 dB. It is shown that the device can be applied to the infrared optoelectronic systems, which provides theoretical and experimental references for the design of related narrowband photodetectors.

Key words: narrowband detection; germanium; Schottky junction; short-wavelength infrared; photodetector

窄带光电探测器仅对小范围内波长的信号有响应,因此可以有效降低背景光噪声的影响^[1]。短波红外光的波长范围为1 000~1 700 nm,在生物组织、云、雾和霾中均具有高穿透能力^[2],因此短波红外窄带光电探测器在光通信、健康检测以及物体识别和分类等领域均具有广泛的应用前景^[3]。对于窄带探测器,探测峰半高宽是一个重要参数,它标志着窄带探测器对目标波长的选择

性。一般认为窄带光电探测器的理想半高宽应小于100 nm^[4],并且半高宽越小,窄带探测器抑制光谱窗口干扰信号的能力就越强。

然而获得具有窄带吸收光谱的光电材料非常困难,商业上通常采用宽光谱探测器与滤波片相结合的方法来获得窄带探测,但这不可避免地会导致光电系统结构复杂以及探测器面阵密度低等问题^[5]。为此,研究人员提出了多种无需滤波片

收稿日期:2023-04-03;修回日期:2023-04-24

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(2108085MF229)

作者简介:方昶月(1997—),女,安徽合肥人,合肥工业大学硕士生;

王莉(1977—),女,河北高碑店人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:wlhgd@hfut.edu.cn;

罗林保(1981—),男,安徽肥东人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

的窄带探测机制,其中大部分机制利用光敏材料厚度调控器件的光谱响应性能,较有代表性的如载流子收集窄化机制、激子解离机制以及电荷注入窄化机制等^[6-8]。

窄带探测器通常采用垂直结构构建,虽然可以由此获得可靠的窄带探测,但是由于需要在感光层的上、下表面均制备电极,并且使用时光信号需从感光层下方引入,导致该类型窄带探测器与现代微电子平面工艺的兼容性降低。而且已报道的平面窄带光电探测器往往需要复杂的设备与器件结构才可以实现^[9]。

本文基于锗平面肖特基结构,利用表面态复合作用调控器件的光谱响应特性,得到探测峰值波长位于 1 290 nm 的窄带短波红外光电探测器。该器件探测峰半高宽仅为 8 nm,且结构简单,制备工艺同微电子工艺高度兼容。

1 器件仿真、制备及测试

1.1 器件仿真

采用半导体工艺仿真和器件仿真工具 TCAD 对器件中不同波长光子吸收率的大小和分布进行模拟仿真。器件的二维模型是基于 1 000 μm 厚的 n 型磷掺杂 (100) 锗衬底 ($1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 构建,尺寸为 10 000 $\mu\text{m} \times 1 000 \mu\text{m}$ 。模型网格点数设置为 31 810,以保证在较短的时间内获得足够的模拟精度。器件的欧姆电极和肖特基电极的长度均设置为 100 μm 。光束设置为垂直照射在锗衬底表面,通过求解泊松方程和连续方程、产生复合模型和 Shockley-Read-Hall 复合模型分析模拟载流子的产生复合过程。

1.2 器件制备

锗平面结构肖特基窄带光电探测器的结构示意图如图 1 所示,该光电探测器是基于单面抛光的(100)晶向 n 型锗单晶衬底制备的。锗衬底的电阻率为 0.003~0.005 $\Omega \cdot \text{cm}$,厚度为(400 \pm 50) μm 。首先将锗衬底切割为 0.5 cm \times 1.0 cm 的锗片,依次使用丙酮、酒精、去离子水超声各清洗 15 min,接着使用氮气吹干备用。利用高温绝缘胶带在锗衬底上限定电极的形状和位置,其中肖特基电极采用钛金属材料,欧姆电极采用镍电极,电极的沉积在高真空磁控溅射系统中进行,值得注意的是,真空度需先抽到 5×10^{-4} Pa,通入氩气,之后真空度调至 0.2 Pa 再进行溅射,沉积速度为 0.3 nm/s。利用银丝将电极引出来后,将器件固定在 PCB 板上便于测试,并采用黑色绝缘胶

带和铜箔对器件进行遮光,而方形透光区域大小设置为 1 mm \times 3 mm。

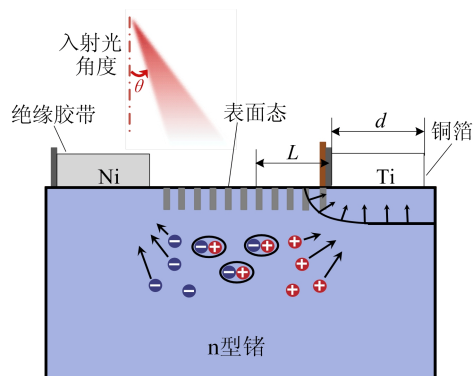


图 1 锗平面结构肖特基窄带光电探测器结构示意图

1.3 器件测试

通过 Keithley 4200-SCS/F 半导体特性分析系统对锗窄带探测器的电学性质进行采集。器件的光谱、稳定性以及背景光噪声干扰等测试则基于超连续光谱光源(YSLphotonics SC-OEM)和光可调谐滤波器系统(YSLphotonics AOTF Pro, AOTF Single)进行。所有光源的功率强度在测量前均使用功率计(Thorlabs GmbH, PM 100D)进行仔细的校准。

2 结果与讨论

从图 1 可以看出,除了特定的光照区域,器件的其余部分均被黑色绝缘胶带和铜箔覆盖,以防止被光照射到。这一独特的结构使得除光照区以外的部分仅存在复合过程,从而使器件的载流子收集过程主要由复合过程所主导。理论模拟结果如图 2 所示。从图 2 可以看出:波长为 650 nm 的入射光刚进入锗肖特基光电探测器 3 μm 左右几乎被锗单晶完全吸收;而随着入射光波长的增加,光的透射深度也随之逐渐变大;当光的波长达到 1 290 nm 后,光的透射深度接近 1 000 μm 。

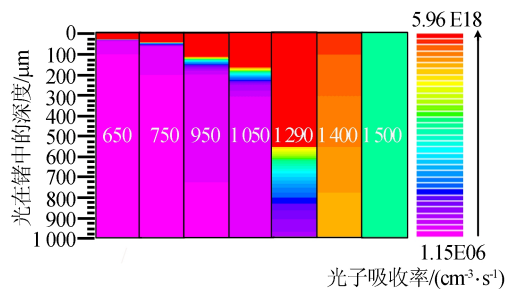


图 2 不同波长光照射下锗中的光子吸收率二维分布模拟图

进一步对光子吸收率的研究表明,随着入射光波长的减小,锗表面处的光子吸收率急剧增加。不同波长的光在锗表面的光子吸收率如图 3 所示。

从图 3 可以看出,波长为 650 nm 的光锗表面的光子吸收率可达 $5.96 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$,而当光的波长为 1 400 nm 时,其光子吸收率仅为 $2.29 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从图 1 器件结构原理示意图可以看出:短波长的光由于透射深度小,在靠近表面处所激发产生的大量光生载流子会发生强烈的表面复合从而迅速湮灭;而长波长的光由于透射深度较大,除了少量载流子被表面态复合掉,还有相当一部分载流子因产生在较深的位置,受表面复合影响较小,这使得它们可以在距离光照区较远的位置被肖特基电极收集到。从仿真结果可以看出,利用表面复合作用能够实现探测器对长波长光的选择性响应。

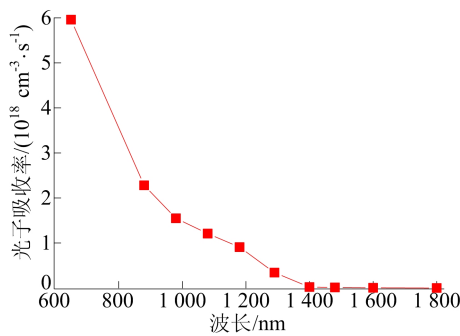


图 3 不同波长光在锗表面的光子吸收率

肖特基电极距光照区距离为 0.2 mm 时,不同长度的肖特基电极器件的归一化光谱响应如图 4 所示。

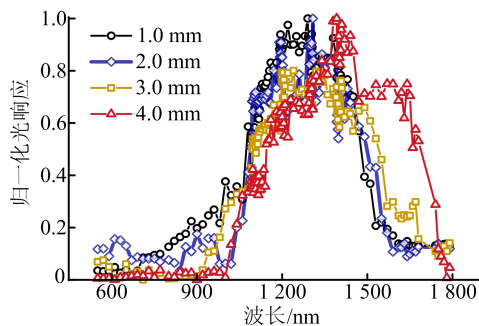


图 4 不同长度的肖特基电极器件的归一化光谱响应

从图 4 可以看出,随着电极长度由 1.0 mm 增加到 4.0 mm,器件的最大可探测波长范围随之从 1 613 nm 扩展到 1 779 nm。

肖特基电极距光照区距离不同时肖特基电极器件的归一化光谱响应如图 5 所示。

从图 5 可以看出,在保持肖特基电极为 1.0 mm 长度不变的条件下,逐渐增大其与光照区的距离会导致器件的峰值响应由 1 038 nm 明显红移到 1 442 nm,并且器件响应峰的半高宽迅速由 762 nm 减小为 385 nm。

这是由于除了光照区外,光照区与肖特基电极之间的锗表面也存在着大量的表面态^[10],在光生载流子传输的过程中,这些表面态所导致的表面复合作用会不断地消耗载流子的数量,使得当增大肖特基电极与光照区之间的距离时,短波长光所激发的光生载流子很难到达肖特基电极空间电荷区,从而器件表现出对短波长光响应的滤波效应。

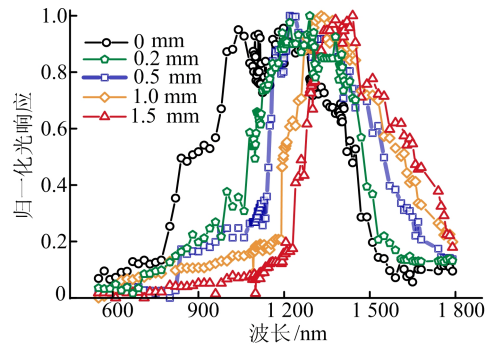


图 5 肖特基电极距光照区不同时器件的归一化光谱响应

研究结果显示,除了肖特基电极长度以及电极与光照区之间的距离,改变光的入射角也会对器件的光谱响应有较大的影响。

入射光入射角度为 0° 、 40° 、 62° 、 75° 、 87° 时器件的光谱响应曲线如图 6 所示。

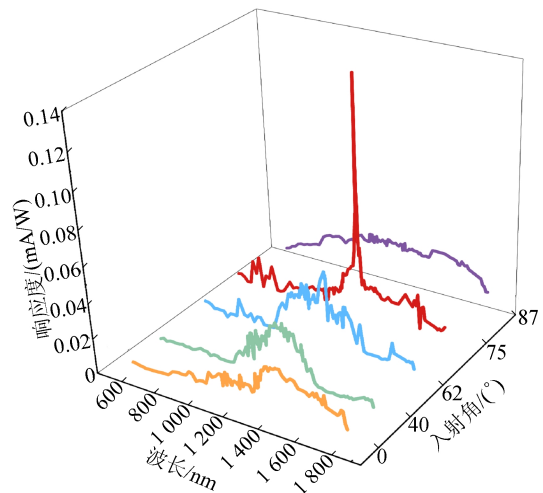


图 6 入射光入射角度不同时器件的光谱响应

图 6 中,入射角为 0° 、 87° 的曲线值分别为实际测量值的 2 倍和 5 倍。

从图 6 可以看出,随着入射角的增加,器件的峰值波长逐渐蓝移,并且光响应度得到了明显提升。当入射角增加到 62° 时,在波长 1 290 nm 附近出现一个小的尖峰;随着入射角进一步增大到 75° ,该尖峰强度大幅增加,其他波长光的响应却逐渐被抑制,器件显示出对 1 290 nm 光的强波长选择性;但若进一步增大入射角,则该波长选择性消失,且器件的响应迅速减小。

这一实验现象可以从如下角度解释:随着入射角的增大,入射光将向肖特基结方向偏转,使得其激发的光生载流子同肖特基电极的距离变小,这有利于肖特基电极对光生载流子的收集,因此会形成较大的光生电流,但同时也使得光的传输路线更加贴近表面,增大了表面态的复合作用对器件载流子收集过程的影响;而随着入射角的增大,表面复合作用对短波长响应的抑制作用也会不断增强,从图 2 可以观察到当光在锗单晶中的传输距离超过 180 μm 时,锗单晶对 1 290 nm 光的吸收率远远高于其他波长的光,因此在合适的人射角时,就会实现对波长 1 290 nm 光的窄带探测。

入射光强为 $5 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 时器件稳定性测试曲线如图 7 所示。

从图 7 可以看出,该窄带探测器具有良好的可重复性。在波长 1 290 nm 的光照射下,即使信号开关达到 60 次,器件的开关特性仍基本保持不变;并且即使在室温放置 3 个月,器件的光响应也观测不到明显的衰减。这说明器件的稳定性很高。

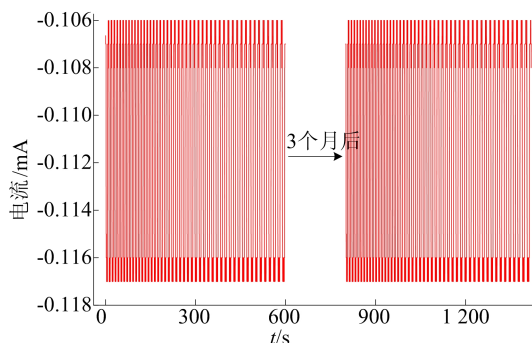


图 7 入射光强为 $5 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 时器件稳定性测试曲线

值得注意的是,该器件的探测峰半高宽经测量仅为 8 nm。

本武器件与已报道的短波红外窄带探测器性

能的比较如图 8 所示。

从图 8 可以看出,本武器件性能明显优于目前已报道的短波红外窄带光电探测器。

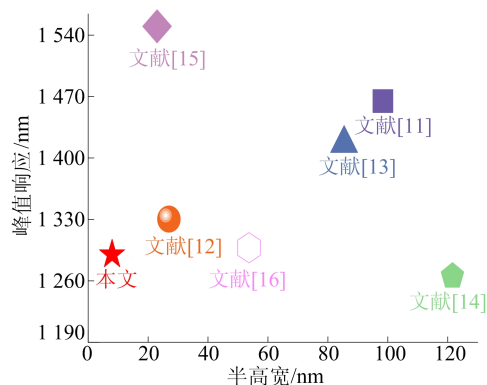


图 8 本武器件与已报道的短波红外窄带探测器的性能比较

为了评估其他波长的光对 1 290 nm 信号检测的影响,计算窄带光电探测器在 1 290 nm 波长与其他波长之间的串扰值,其公式为:

$$C(\lambda) = 20 \lg \frac{I_{\text{ph}}(\lambda, V)}{I_{\text{ph}}(\lambda_{\text{peak}}, V)} \quad (1)$$

其中: $I_{\text{ph}}(\lambda, V)$ 为在 V 偏压下测量的光电流; $\lambda_{\text{peak}} = 1 290 \text{ nm}$ 。

串扰值随入射光波长变化的曲线如图 9 所示。

从图 9 可看出,除了 1 278~1 311 nm 波段的光,其余波长的光对 1 290 nm 光信号的串扰值均小于 -10 dB。背景光干扰的测试结果也支持这一结论。

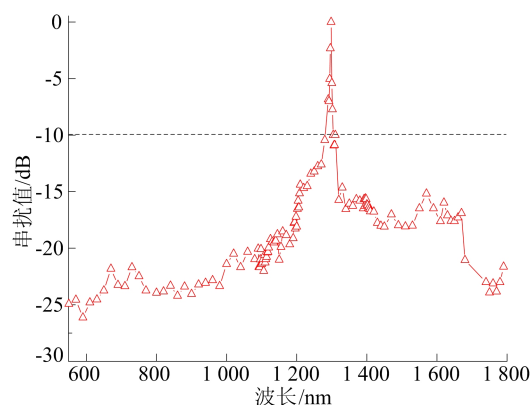


图 9 串扰值随入射光波长变化的曲线

等光强背景光干扰下器件接收 1 290 nm 信号的响应曲线如图 10 所示。

从图 10 可以看出,即使在背景光的强度与 1 290 nm 光信号强度相同的情况下,除了 1 300 nm

的噪声光带来一些影响,其余波长的光带来的噪声信号均小于 1 290 nm 光响应强度的 1/e,因此可以忽略。

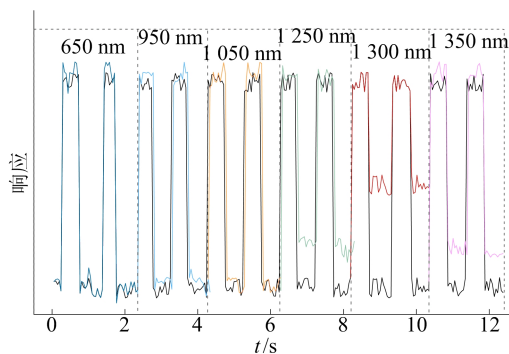


图 10 等光强背景光干扰下器件接收 1 290 nm 信号的响应曲线

3 结 论

本文研制的短波红外锗肖特基窄带探测器探测峰值波长为 1 290 nm、半高宽小于 10 nm,展现出很高的波长选择性;且器件结构简单,制备工艺同硅 CMOS 工艺高度兼容,在红外系统中具有广阔的应用前景。该器件结构和工作原理可为构建高性能窄带探测器提供理论和实验参考。

[参 考 文 献]

- [1] WANG L, LUO H, ZUO H, et al. Highly sensitive narrowband Si photodetector with peak response at around 1 060 nm[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(8): 3211-3214.
- [2] ROWLANDS C J, BRUNS O T, FRANKE D, et al. Increasing the penetration depth of temporal focusing multiphoton microscopy for neurobiological applications[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2019, 52(26): 264001.
- [3] XU Y, LI R, BAI S, et al. Chalcogenide-based narrowband photodetectors for imaging and light communication[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 33(11): 2212523.
- [4] 吴刚, 刘智鑫, 陈红征. 近红外窄波段选择性光电探测器: 202110272095. 2[P]. 2021-06-29.
- [5] XUE J, ZHU Z, XU X, et al. Narrowband perovskite photodetector-based image array for potential application in artificial vision[J]. Nano Letters, 18(12): 7628-7634.
- [6] WANG L, CHEN B, FANG C, et al. Wavelength-tunable multispectral photodetector with both ultraviolet and near-infrared narrowband detection capability[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2022, 69(6): 3258-3261.
- [7] 解博名, 张凯, 李静雯. 通过控制陷阱分布实现高灵敏度窄带近红外响应有机光探测器[J]. 高分子学报, 2022, 53(4): 424-423.
- [8] LIU M, YANG K, ZHAO Z, et al. Narrowband photomultiplication organic photodetectors by employing phosphorescent material as optical field adjusting layer[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2021, 125(33): 18536-18542.
- [9] 郭越, 孙一鸣, 宋伟东. 多孔 GaN/CuZnS 异质结窄带近紫外光电探测器[J]. 物理学报, 2022, 71(21): 382-390.
- [10] LIETEN R R, DEGROOTE S, KUIJK M, et al. Ohmic contact formation on n-type Ge [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(2): 022106.
- [11] SOBHANI A, KNIGHT M W, WANG Y, et al. Narrowband photodetection in the near-infrared with a plasmon-induced hot electron device[J]. Nature Communications, 2013, 4: 1-6.
- [12] YANG J, HUANG J, LI R, et al. Cavity-enhanced near-infrared organic photodetectors based on a conjugated polymer containing [1,2,5]selenadiazolo[3,4-c]pyridine[J]. Chemistry of Materials, 2021, 33(13): 5147-5155.
- [13] YU Y, ZHONG F, CHU Q, et al. Polarization-sensitive narrowband infrared photodetection triggered by optical Tamm state engineering [J]. Optics Express, 2023, 31(5): 8797-8804.
- [14] TANZID M, AHMADIVAND A, ZHANG R, et al. Combining plasmonic hot carrier generation with free carrier absorption for high-performance near-infrared silicon-based photodetection [J]. ACS Photonics, 2018, 5(9): 3472-3477.
- [15] XIAO H, LO S C, TAI Y H, et al. Spectrally selective photodetection in the near-infrared with a gold grating-based hot electron structure[J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(16): 161103.
- [16] WANG Y, SIEGMUND B, TANG Z, et al. Stacked dual-wavelength near-infrared organic photodetectors[J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9(6): 2001784.

(责任编辑 胡亚敏)