

弱电离子区场增强的 Ge 基 PIN 结构阻挡杂质带红外探测器

刘赤县^{1,2,5}, 陈天业^{1,2,5}, 王泽欣⁶, 胡清智⁶, 窦伟^{1,2,5}, 刘晓艳^{2,4}, 凌静威¹,
潘昌翊^{1,2,4}, 朱家旗^{2,4}, 王鹏^{1,2}, 邓惠勇^{1,3*}, 沈宏^{1,2*}, 戴宁^{1,2,4,5*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外科学与技术全国重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 华东师范大学 精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200241;

4. 国科大杭州高等研究院 物理与光电工程学院, 浙江 杭州 310024;

5. 上海科技大学 物质科学与技术学院, 上海 201210;

6. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200444)

摘要: 本文研制了一种新型的锗(Ge)基阻挡杂质带(Blocked-impurity-band, BIB)红外探测器, 采用平面型 PIN 结构, 并利用近表面处理技术制备探测区和电极接触区。探测器展示了显著的整流特性, 在反向偏压下具有极低的暗电流, 且工作温度可提升至 15 K。在该温度下, 探测器在 0 ~ -5 V 反向偏置电压范围内, 黑体探测率基本稳定在 $6 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。通过能带结构分析, 详细讨论了探测器的暗电流机理以及温度变化对光响应的影响, 提出了基于低温弱电离子区的工作原理。此外, 还对探测器的黑体响应率、黑体探测率进行了系统测试, 并揭示了探测器在更高工作温度下维持高性能的机制。本研究为 Ge 基 BIB 探测器的温度性能提升提供了创新的思路, 并为未来红外探测器的设计和应用提供了理论依据和实验数据支持。

关键词: BIB 探测器; 能带结构; 探测率; PIN 结构

中图分类号: TN215

文献标识码: A

Field-enhanced Ge-based PIN structure blocked impurity band infrared detectors in weakly ionized regions

LIU Chi-Xian^{1,2,5}, CHEN Tian-Ye^{1,2,5}, WANG Ze-Xin⁶, HU Qing-Zhi⁶, DOU Wei^{1,2,5}, LIU Xiao-Yan^{2,4},
LING Jing-Wei¹, PAN Chang-Yi^{1,2,4}, ZHU Jia-Qi^{2,4}, WANG Peng^{1,2}, DENG Hui-Yong^{1,3*},
SHEN Hong^{1,2*}, DAI Ning^{1,2,4,5*}

(1. State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200241, China;

4. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China;

5. School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China;

6. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: A novel germanium (Ge)-based blocked-impurity-band (BIB) infrared detector with a planar PIN structure was developed, using a near-surface processing technique to fabricate the target and electrode contact regions. The de-

收稿日期: 2025-01-20, 修回日期: 2025-02-23

Received date: 2025-01-20, Revised date: 2025-02-23

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFA1608701), 国家自然科学基金(62274168, 11933006 和 U2141240) 和杭州创新团队项目(TD2020002)

Foundation items: Supported by the National Key R&D Program of China (2023YFA1608701), the National Natural Science Foundation of China (62274168, 11933006 and U2141240), the Hangzhou Leading Innovation and Entrepreneurship Team (TD2020002)

作者简介(Biography): 刘赤县(1996—), 男, 山东临沂, 博士研究生, 主要研究领域为 Ge 基阻挡杂质带红外探测器制备及光电性质研究. E-mail: liuchixianll@outlook.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: hydeng@lps.ecnu.edu.cn; hongshen@mail.sitp.ac.cn; ndai@mail.sitp.ac.cn

tector demonstrates significant rectifying characteristics, exhibiting extremely low dark current under reverse bias, and its working temperature is extended to 15 K. At this temperature, the detector maintains a stable detectivity of $6 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ within the reverse bias voltage range of 0 V to -5 V. Through the band structure analysis, the dark current mechanism and the impact of temperature variation on optical response were discussed in detail, and the working principle based on the low-temperature weak ionization region was proposed. Additionally, tests of the detector's blackbody response current and detectivity were systematically measured, and the mechanism of maintaining high performance at elevated working temperatures was clarified. The result provides innovative insights for enhancing the temperature performance of Ge-based BIB detectors and offers the theoretical and experimental support for the design and application of future infrared detectors.

Key words: BIB detector, band structure, detectivity, PIN structure

引言

长波红外探测器在红外天文物理、航空航天和国防等领域有重要的应用前景。阻挡杂质带 (Blocked-Impurity-Band, BIB) 探测器因其具有探测灵敏度高、响应速度快、抗辐射性能好等特点^[1-7], 是远红外波段天文观测的首选, 广泛应用于各类天文望远镜^[8]。BIB 探测器最初由美国罗克韦尔公司的研究人员 Petroff 和 Stapelbroek 在 1979 年提出^[9, 10], 通过在传统非本征探测器结构基础上增加一层阻挡区来抑制暗电流, 这样可以保证在吸收层掺杂浓度大大增加的同时, 暗电流也能维持在很低的水平。不仅如此, 掺杂浓度的增加也拓宽了探测器的响应范围^[11-14]。然而, BIB 探测器的工作温度极低, 极大增加了运行成本, 限制了在其他领域的应用。这是由于 BIB 探测器的有效探测区域主要依靠电位的补偿杂质组成的空间电荷区, 随着温度的升高, 杂质能级电离增加, 但是补偿杂质的掺杂浓度很低, 这使得空间电荷区电荷密度变化过快, 导致耗尽深度减小很明显, 探测器的非本征光响应会急剧下降^[15]。对于传统的锗 (Ge) 基 BIB 探测器, 光响应基本在 10 K 左右完全消失。

本文采用近表面处理技术, 研制了一种新型平面型 PIN 结构的 Ge 基 BIB 探测器, 包含两种掺杂的探测区 (Target Region of P, TRP; Target Region of B, TRB) 和两种电极接触区 (Contact Region of P, CRP; Contact Region of B, CRB)。探测器有很明显的整流特性, -5 V 的反向偏置电压以及 50 K 温度下, 其暗电流仍能保持在 20 pA 左右。通过分析样品在正反偏下的能带变化, 阐述了样品的暗电流机理和温度对光响应的影响。本研究还对探测器的黑体响应率和黑体探测率进行了测试, 在确保探测器黑体高探测率和低暗电流的同时, 工作温度提升至 15 K, 其黑体探测率在很宽的电压范围 (0 ~ -5 V) 内能保

持 $6 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 的较高水平。相较于传统 Ge 基 BIB 探测器, 该探测器具备更广泛的应用前景。

1 样品结构

图 1(a) 展示了样品的结构示意图, 包括高纯 Ge 衬底 (电阻率 $> 50 \Omega \cdot \text{cm}$)、两个探测区 (TRB 和 TRP)、两个电极区 (CRB 和 CRP) 以及金 (Au) 电极。TR 和 CR 均通过离子注入技术制备, 其中 CR 区域的掺杂浓度较高, 达到了简并掺杂, 从而提高了光生载流子的收集效率。样品采用近表面加工技术制备^[13, 16], 具体过程如图 2 所示。首先利用光刻技术在衬底表面形成 TR 和 CR 区域的图形, 并使用 $3 \mu\text{m}$ 厚的光刻胶作为后续离子注入的掩模层。为了提高掺杂区域的均匀性, 采用了多步离子注入工艺, 并通过不同能量和剂量的注入优化掺杂效果。离子注入之前, 使用 TCAD 进行了仿真, 模拟了 TR 和 CR 区域的离子浓度随深度的变化 (仿真结果见图 3)。TRP 和 TRB 经过五次不同能量和剂量的注入, 最终掺杂浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 注入深度分别为 $1.1 \mu\text{m}$ 和 $0.7 \mu\text{m}$ 。CRP 和 CRB 则通过两次大剂量低能量注入, 减小样品的损伤, 并在较浅的深度内完成简并掺杂, 掺杂浓度为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 注入深度分别为 $0.5 \mu\text{m}$ 和 $0.3 \mu\text{m}$ 。TRB 与 TRP 之间的未掺杂区域为 UR。

在离子注入步骤中, 样品经过了两次退火过程以修复晶体损伤并激活掺杂。P 掺杂后, 样品在 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 下进行了 60 s 的快速热退火; B 掺杂后, 样品在 $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 下进行了 60 s 的快速热退火。退火过程有助于修复注入过程中产生的缺陷并激活杂质离子。退火完成后, 使用等离子增强化学气相沉积 (PECVD) 工艺沉积了 200 nm 厚的 Si_3N_4 层, 用于保护探测器表面并作为减反射层。通过反应离子刻蚀 (RIE) 技术去除 CRP 和 CRB 表面的 Si_3N_4 层, 并采

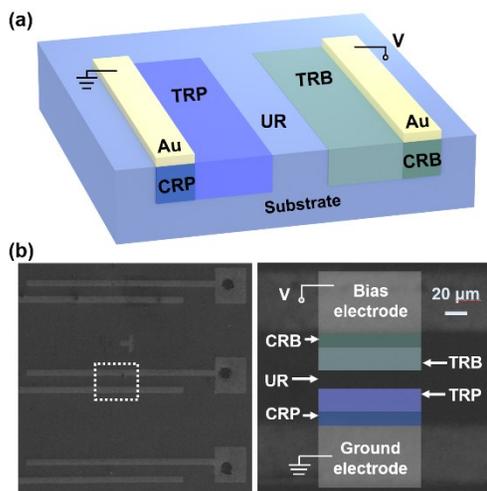


图1 (a)样品的三维结构图;(b)样品的SEM图像
Fig. 1 (a) The 3D structural diagram of the sample; (b) the SEM image of the sample

用电子束蒸发技术沉积 100 nm 的 Au 层作为接触电极。最终,在 300 °C 下进行了 300 s 的退火处理,获得了新型的远红外非本征探测器。图 1(b)为样品的扫描隧道显微镜(SEM)图像,展示了 TR、CR 和 UR 区域的分布情况。TR 和 CR 的宽度分别为 20 μm 和 10 μm,长度为 800 μm,而 UR 区域则采用了三种不同的宽度:10 μm、15 μm 和 25 μm。

为了抑制杂质能级中载流子的热激发,探测器需在超低温条件下工作。暗电流的测试采用闭环

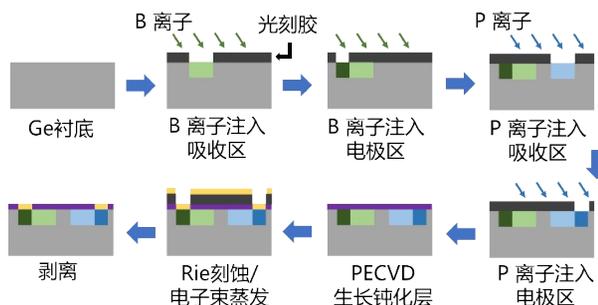


图2 样品制备流程
Fig. 2 The fabrication process flowchart of the sample

环液氮冷却低温恒温器(OptistatAC-V),其测试温度范围覆盖 3.2~300 K。光电流测试系统则由 IR-301 黑体辐射源,SR830 锁相放大器以及 SR570 前置电流放大器组成,并配备了具有高透过率的 HDPE 远红外光学窗口。HDPE 窗片的红外透射强度如图 4 所示,可以有效过滤短波红外部分,允许甚长波红外及更长波段的辐射透过。

2 结果和讨论

为了研究平面型 PIN 结构对暗电流的抑制效果,测试了三个具有不同 UR 宽度的样品在不同温度下的暗电流,同时以常规 Ge: B 的 BIB 探测器作为对比测试其暗电流特性。图 5(a)显示了三个样品在 3.2 K 下的 $I - V$ 曲线。可以看出,PIN 器件表

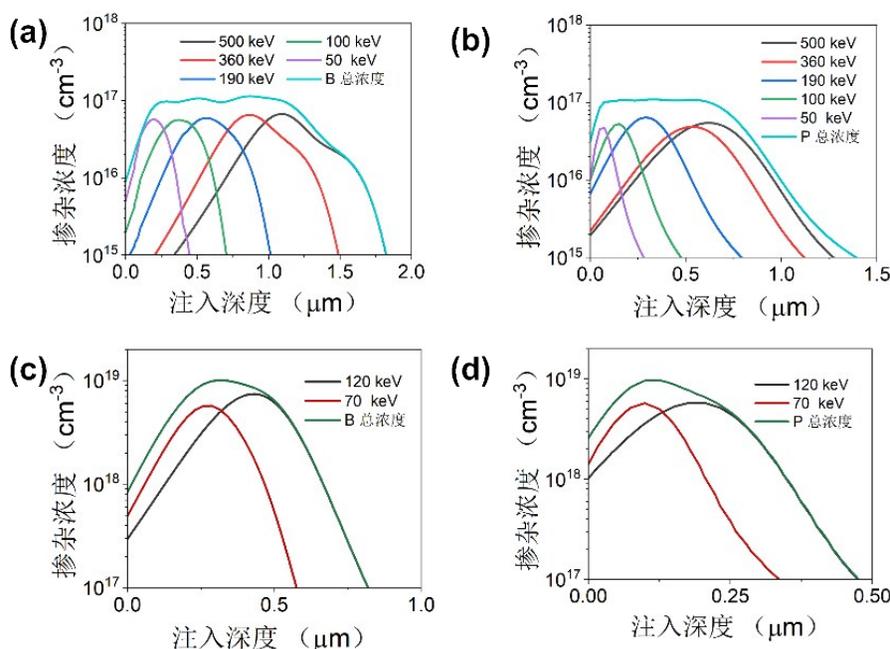


图3 离子注入杂质浓度随深度的分布:(a)、(b)、(c)、(d)分别为 TRB、TRP、CRB 和 CRP 的杂质浓度分布
Fig. 3 The distribution of ion-implanted impurity concentration versus depth; (a), (b), (c), and (d) show the impurity concentration profiles for TRB, TRP, CRB, and CRP, respectively

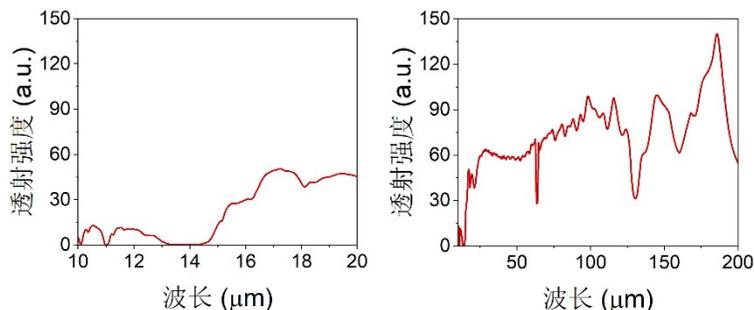
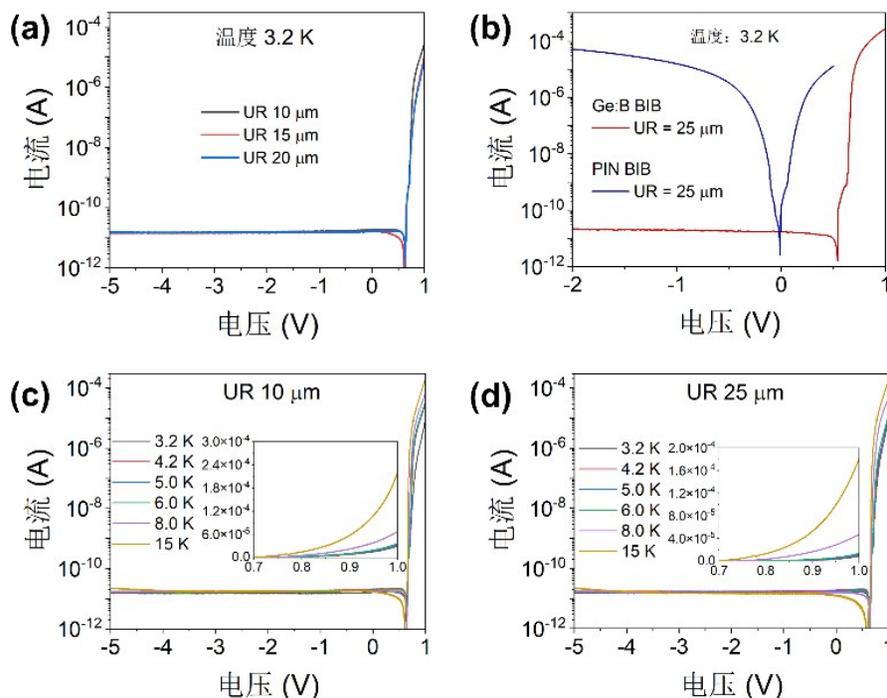


图4 HDPE窗片的红外透射强度

Fig. 4 The infrared transmittance intensity of the HDPE window

现出明显的整流特性,在反偏情况下,其暗电流非常低,基本维持在 2.5×10^{-11} A 左右。图 5(b)则对比了 3.2 K 下阻挡区相同的 PIN 型和常规型 BIB 探测器的暗电流。可以观察到,常规 BIB 探测器不具备明显的整流特性。图 5(c)和 5(d)分别展示了 I 区宽度为 $10 \mu\text{m}$ 和 $25 \mu\text{m}$ 的样品在 3.2 K、7 K、10 K、15 K、30 K 和 50 K 条件下的暗电流 I - V 对数曲线,其中嵌入的小框显示了 0.5~1.0 V 范围内的 I - V 线性曲线。结果表明,随着温度升高,正偏情况下器件的暗电流逐渐增大,而反偏情况下的暗电流几乎保持不变。

为了探究器件在反向偏置下的暗电流特性,取不同 UR 宽度的探测器在 $-1 \sim -5$ V 的反向偏置范围内的暗电流,如图 6 所示。图 6(a)展示了在 3.2 K 温度下,不同 UR 宽度器件的反偏暗电流对比结果。从图中可以看出,暗电流随电压和 UR 宽度的变化并不显著,这表明 UR 宽度并非影响 PIN 型 BIB 探测器反偏暗电流的主要因素。图 6(b)、6(c)和 6(d)分别显示了 UR 宽度为 $10 \mu\text{m}$ 、 $15 \mu\text{m}$ 和 $25 \mu\text{m}$ 的器件在不同温度下的暗电流曲线。可以观察到,在温度低于 15 K 时,不同温度下器件的暗电流差异较小;然而,当温度升高至 15 K,并在 -4 V 的较大偏压下

图5 (a)3.2 K下不同UR宽度器件的暗电流曲线;(b)3.2 K下 $25 \mu\text{m}$ UR宽度的PIN型和常规型BIB探测器的暗电流;不同温度下(c)UR宽度 $10 \mu\text{m}$ 和(d)UR宽度 $25 \mu\text{m}$ 的暗电流曲线Fig. 5 (a) Dark current curves of devices with different UR widths at 3.2 K; (b) dark current of PIN-type and conventional BIB detectors with a $25 \mu\text{m}$ UR width at 3.2 K; dark current curves at different temperatures for (c) $10 \mu\text{m}$ UR width and (d) $25 \mu\text{m}$ UR width

时,器件的暗电流开始呈现明显的上升趋势。

通过分析器件的能带结构,可以解释其在低温下暗电流曲线的变化,如图7所示。在极低温条件下,仅有少量施主杂质和受主杂质发生电离,进入导带和价带,此时称为“低温弱电离”状态^[17]。探测器的TR区域以离子注入掺杂的杂质为主,但同时存在少量补偿杂质,如图7(a)所示。以TRP为例,多数载流子杂质(施主浓度 N_d)和少数载流子杂质(受主浓度 N_a)均存在。由于施主能级远高于受主能级,即使在低温条件下,施主上的电子仍能离化并被受主俘获,形成离化施主(D^+)和离化受主(a^-)。在热平衡条件下,根据电中性条件可得: $D^+ = a^-$ 。由于受主杂质浓度较低,相邻受主之间的间距较大,电子波函数无法交叠,也无法通过势垒贯穿,因此

受主俘获的电子被局限在受主周围。然而,施主杂质浓度较高,相邻施主之间的间距较小,电子可通过波函数交叠或隧穿效应在施主之间跃迁,从而形成杂质能带^[18-22]。

如图7(b)所示,当CRB施加正向偏压时(对应图5中的正偏情况),外加电场驱动TRB中的离化受主(A^-)向正电极移动,在靠近UR的TR中,仅剩离化补偿杂质施主(d^+)和未电离的受主B,从而形成一个 d^+ 空间电荷区。同样,在TRP内形成了一个由离化补偿杂质受主(a^-)和未电离的施主P组成的空间电荷区^[9, 10, 23-26]。尽管器件处于低温弱电离区,但TRB中的受主杂质以及TRP中的施主杂质仍有部分电离,这是探测器暗电流产生的原因,并且该暗电流主要是由两个TR中的多数载流子参与输运。

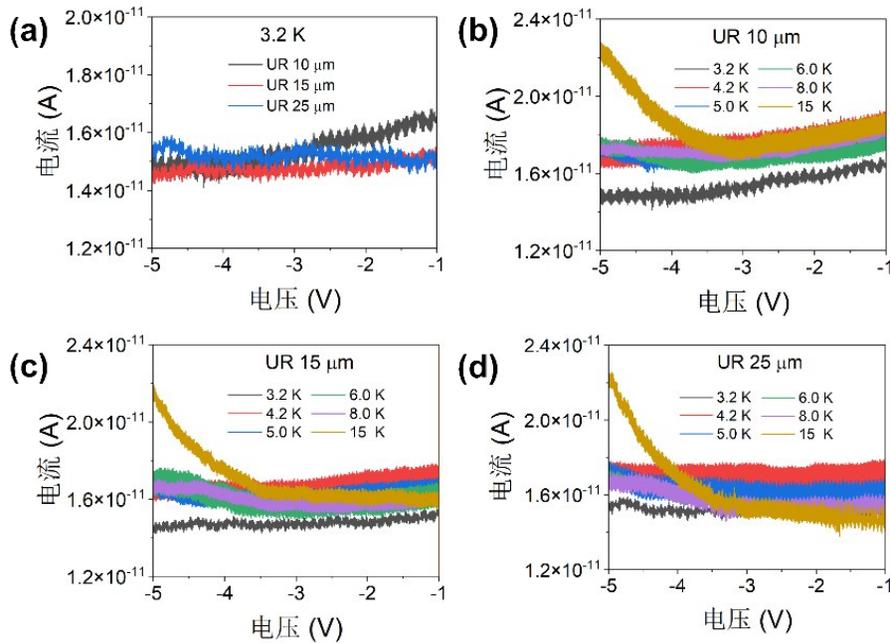


图6 在反偏电压-1~5 V条件下的暗电流特性:(a)3.2 K下,不同UR宽度器件的暗电流曲线;(b)、(c)和(d)分别为UR宽度为10 μm、15 μm和25 μm的器件在不同温度下的暗电流曲线

Fig. 6 Dark current characteristics under reverse bias voltages from -1 V to -5 V: (a) dark current curves of devices with different UR widths at 3.2 K; (b), (c), and (d) dark current curves of devices with UR widths of 10 μm, 15 μm, and 25 μm, respectively, at different temperatures

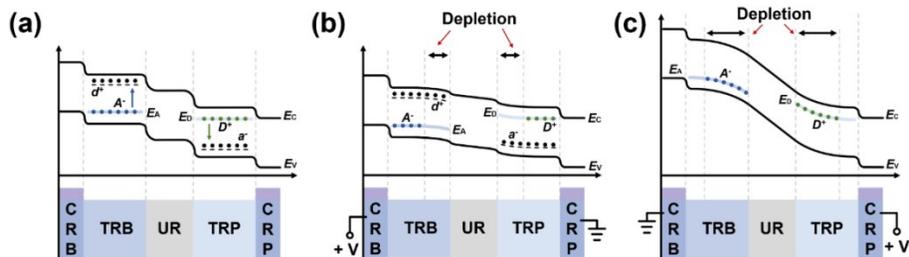


图7 器件能带结构:(a)未加偏置电压;(b)CRB加偏压;(c)CRP加偏压

Fig. 7 The energy band structure of the device: (a) without bias voltage; (b) bias applied to CRB; (c) bias applied to CRP

当温度升高时,杂质电离逐渐增强,暗电流随之增大(图5(c)和5(d)所示)。然而,由于CR区域达到简并掺杂水平($1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$),在CR和TR交界处形成界面势垒^[22, 27, 28],有效阻碍了载流子的运输,因此即便在50 K温度下,暗电流的变化仍不够明显。

当CRP施加正向偏压时(对应图5中的反偏情况),以TRP为例,施主杂质带中的电子从中性施主跃迁到相邻离子施主,并在外加电场的作用下进入CRP区域,被电极收集。同时,TRP内留下的 D^+ 电荷会向CRB方向移动。由于杂质带在UR处的不连续性, D^+ 电荷被阻挡,并在UR与TRP边界处形成由 D^+ 组成的空间电荷区。同理,在TRB与UR的边界处形成由 A^- 组成的空间电荷区,这导致TR区域内形成内建电场。反偏情况下的暗电流主要由少数载流子的漂移运动贡献。由于低温条件下本征激发行较弱,反偏暗电流始终维持在极低水平。即使温度升高,暗电流变化也非常有限(图6所示)。相比之下,常规型BIB探测器仅含单一掺杂元素,其正反偏均为多数载流子运输,因此不表现出明显的整流特性,如图5(b)所示。

为表征探测器在不同温度下的光响应特性,测试了UR宽度为10 μm 的样品在1000 K黑体辐射下的响应电流,如图8所示。图8(a)、8(b)和8(c)分别展示了探测器在6 K、15 K及50 K下的暗电流、室温背景电流和1000 K黑体辐射下的光响应曲线。可以看到,在反向偏置下,探测器对黑体辐射表现出明显的响应特性。值得注意的是,实验中黑体辐射需经过低温恒温器上的HDPE光学窗口后才能入射到器件表面,表明探测器的响应主要来自甚长波红外以外的辐射。为进一步探讨黑体响应随样品温度的变化规律,提取了图8(a)、8(b)和8(c)中黑体辐射电流的0~3 V部分,如图8(d)所示。随着温度升高,探测器的黑体响应电流逐渐减弱。这是由于在6 K条件下,处于低温弱电离状态的样品,在TRP和TPB的空间电荷区内分别含有未电离的施主杂质P和受主杂质B。当红外辐射入射到探测器时,光子能量高于杂质电离激活能的部分会被吸收,产生光生载流子(电子和电离施主)。这些光生载流子在空间电荷区的电场驱动下能够高效迁移,形成光电流。而TRP的中性区内产生的光生载流子,缺乏电场的驱动作用,不能被高效地分开,会很快复合掉,对光电流的贡献小^[11-13]。同样,TRB中的受主杂质B也可在光照下产生空穴和电离受主,这些空

穴在电场作用下被CRB电极收集。所以探测器的空间电荷区可以看作实际有效的探测区域。当探测器反向偏压增大时,其内部的空间电荷区宽度会扩大,从而增加有效探测区域,使光响应电流进一步增强(如图8(d)所示)。

然而,当温度升高时,样品内杂质的热激发增强。例如,在TRP中,更多施主杂质的电子被激发到导带中,导致空间电荷区内的 D^+ 电荷密度增加,但空间电荷区宽度随之减小。因此,高温下的有效探测区域缩小^[15],光响应电流随之下降,对于TRB内也是如此。

为了更精确地测量探测器的黑体响应电流,使用SR830锁相放大器、SR570前置电流放大器及斩波器提取样品的微弱光信号,并计算了UR宽度为10 μm 的器件在不同温度下的黑体响应率和探测率随偏压的变化关系,如图9(a)和9(b)所示。探测器的响应率是指输出电信号与入射辐射能量的比值。黑体响应测试中的响应率 R_{bb} 可以表示为^[29]:

$$R_{\text{bb}} = \frac{I_{\text{bb}}}{P_s} \quad (1)$$

其中, I_{bb} 为响应电流,由实验测得。 P_s 为黑体辐射功率,可由下式算得:

$$P_s = \frac{\sigma(T_b^4 - T_d^4)A_b A_d}{2\sqrt{2}\pi L^2} \quad (2)$$

其中, σ 为斯特藩常数,取值 $5.67 \times 10^{-12} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。 T_b 为黑体温度, T_d 为环境温度, A_b 为黑体出射孔面积, A_d 为探测器吸收区面积, L 为黑体到探测器距离。在本次实验中, T_b 等于1000 K, T_d 选用了四个值,分别是7 K、15 K、30 K和50 K, A_b 等于0.1963 cm^2 , A_d 等于0.032 mm^2 , L 等于20 cm。计算后的样品黑体响应率如图7(a)所示,器件的黑体探测率(不考虑增益噪声)可由下式计算:

$$D^* = \frac{R_{\text{bb}}}{\sqrt{2qI_{\text{dark}}\Delta f}} \sqrt{A_d \Delta f} \quad (3)$$

其中, q 为电子电量,取值 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, Δf 为信号带宽, I_{dark} 为器件的暗电流。器件的热噪声可由Johnson-Nyquist计算:

$$i_n = \sqrt{\frac{4k_B T}{R}} \quad (4)$$

其中, k_B 是玻尔兹曼常数,取值 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, T 是电阻的绝对温度(单位:K), R 是电阻值(单位: Ω)。计算结果表明,在3.2 K和50 K条件下,器件在反向偏压时的热噪声分别约为 $4 \times 10^{-17} \text{ A/Hz}^{-1/2}$ 和 $2 \times 10^{-16} \text{ A/Hz}^{-1/2}$,而正向偏压下的热噪声基本低于 $1 \times$

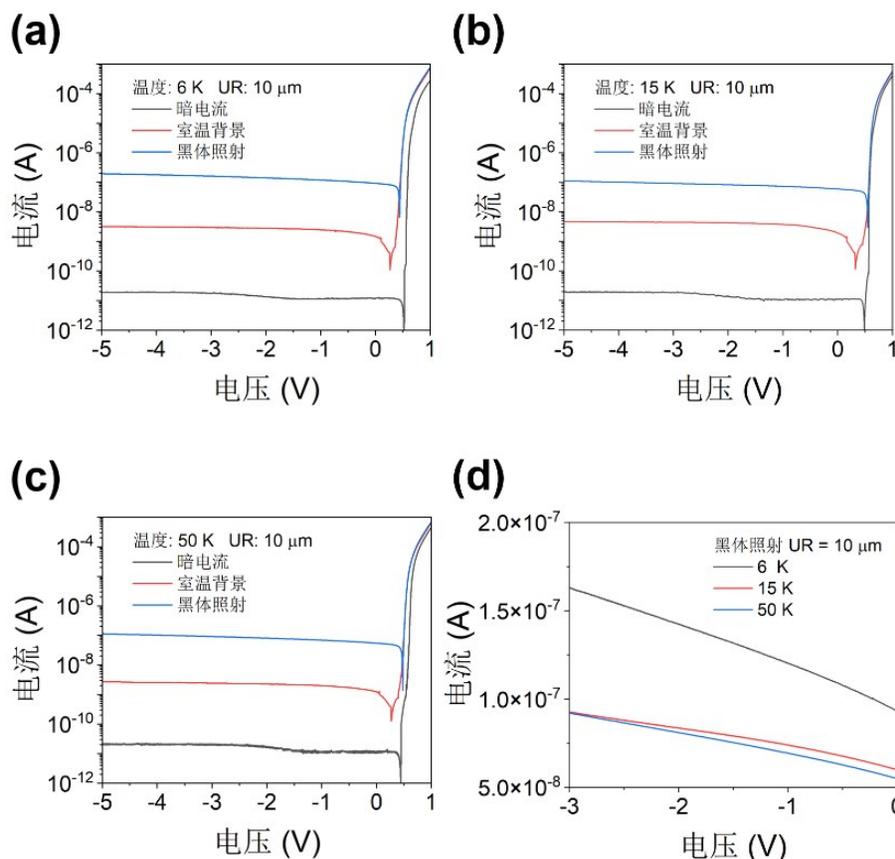


图8 1000 K黑体辐射下,UR宽度为10 μm 的样品,在(a)6 K、(b)15 K、(c)50 K温度下的响应电流;(d)为取(a)、(b)和(c)中黑体辐射电流0 ~ -3 V部分

Fig. 8 The response current of the sample with a 10 μm UR width under 1000 K blackbody radiation at (a) 6 K, (b) 15 K and (c) 50 K; (d) the blackbody radiation current from 0 V to -3 V extracted from (a), (b), and (c)

10^{-12} A/Hz $^{-1/2}$ 。由于探测器在实际工作时处于低背景辐射环境中,且计算所得的热噪声相较于暗电流噪声可以忽略不计,因此此处采用低背景辐射下的暗电流进行计算。实验结果表明,由于样品较低的噪声水平,探测器的黑体探测率在宽偏压范围内(0~-5 V)维持在 6×10^{12} cm \cdot Hz $^{1/2}\cdot$ W $^{-1}$ 的较高值。

从图9中可以看出,探测器在6 K和15 K时的

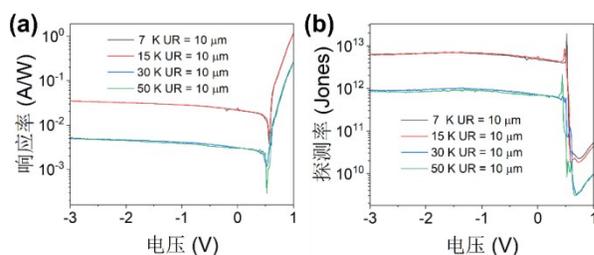


图9 UR宽度为10 μm 的器件在不同温度下的(a)黑体响应率和(b)黑体探测率随偏压的变化关系

Fig. 9 The (a) blackbody responsivity and (b) blackbody detectivity as a function of the bias voltage for the device with a 10 μm UR width at different temperatures

黑体响应率和探测率几乎保持一致,表明在反偏工作模式下,器件的工作温度可以提升至15 K,而探测性能变化不大。然而,当温度升高至30 K后,黑体响应率和探测率显著下降,表明在这一温度区间内,器件性能受到了多方面因素的综合影响。首先,温度升高对光生载流子的吸收和收集效率产生了显著影响。随着温度升高,载流子复合速率显著增加,尤其是非辐射复合过程愈发显著。非辐射复合不仅降低了有效载流子的数量,还缩短了光生载流子的寿命,导致其在探测器中的有效收集率下降,从而降低了响应率。

其次,随着温度的升高,器件不再处于低温热电离区,这导致杂质能级的热电离增强,进而增加了 D^+ 电荷和 A^- 电荷的数量。因为在反偏条件下,空间电荷区主要由离化施主和离化受主组成,而在正偏条件下,则由离化的补偿杂质组成。当 D^+ 电荷和 A^- 电荷数量增加,器件在正反偏下的空间电荷区宽度都会显著减小,这直接导致了有效光吸收区域的

面积减小,从而减少了可以被收集的光生载流子的数量,最终导致探测器的黑体探测率下降。

表 1 不同 BIB 探测器性能对比

Table 1 Performance comparison of different BIB detectors

衬底	掺杂杂质	响应度/ (A/W)	黑体探测率/ ($\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$)	参考文献
Ge	B & P	1.16	6×10^{12}	本论文
	B	21.46	4.34×10^{14}	[13]
	P	0.92	1.3×10^{13}	[21]
	S	1.6	2.1×10^{11}	[24]
Si	As	3.7	5.2×10^{13}	[12]
	P	1.4	5.6×10^{12}	[19]

3 结论

本文制备了平面型 PIN 结构的 BIB 探测器,通过光刻和离子注入技术来制作探测区和电极接触区。通过能带结构分析了样品暗电流机理,并讨论了样品的黑体响应电流随温度的变化规律及原因,提出探测器在低温弱电离区的工作原理。探测器在反偏工作模式下,具有优异的低温光响应性能,其黑体探测率在很宽的电压范围(0~5 V)内能够保持在 $6 \times 10^{12} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ 的较高水平,归因于其极低的噪声水平。同时,器件的工作温度相较传统的 Ge 基 BIB 探测器得到了显著提升,可稳定提升至 15 K,这一结果为 Ge 基 BIB 远红外探测器在更宽温区范围内的应用提供了重要参考。

References

[1] Gualtieri R. Multi-mode TES bolometer optimization for the LSPE-SWIPE instrument [J]. *Journal of Low Temperature Physics*, 2016, 184(3-4): 527-533.

[2] Shishido H, Miyajima S, Narukami Y, et al. Neutron detection using a current biased kinetic inductance detector [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(23): 1945.

[3] Rabanus D, Graf U U, Philipp M, et al. Phase locking of a 1.5 Terahertz quantum cascade laser and use as a local oscillator in a heterodyne HEB receiver [J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1159-1168.

[4] Fujii G, Ukibe M, Ohkubo M. Improvement of soft x-ray detection performance in superconducting-tunnel-junction array detectors with close-packed arrangement by three-dimensional structure [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2015, 28(10): 104005.

[5] Deng K, Guo J, Zhang K, et al. All-silicon broadband infrared photodetectors with in-plane photon trapping structures [J]. *Advanced Materials*, 2025: 2419382.

[6] Xiao Y, Deng K, Zhang K, et al. On-chip room-temperature operated short-wavelength-infrared Si: S photodetector

with a vertical junction [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(49): 2409354.

[7] Guo J, Zhang T, Zhang K, et al. Sharp interface blocked impurity band very long-wavelength infrared photodetector with high-temperature epitaxy [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2024, 45(6): 952-955.

[8] Stetson S B, Reynolds D B, Stapelbroek M G, et al. Design and performance of blocked-impurity-band detector focal plane arrays [C]. *Infrared Detectors, Sensors, and Focal Plane Arrays*. SPIE, 1986, 686: 48-65.

[9] Huffman J E, Crouse A G, Halleck B L, et al. Si: Sb blocked impurity band detectors for infrared astronomy [J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, 72(1): 273-275.

[10] Petroff M, Stapelbroek M G. Blocked impurity band detectors: US Patent, 4568960A, 1986.

[11] Liao K S, Li Z F, Wang C, et al. Si: P blocked impurity band detectors for far infrared detection [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35(1): 37-41. (廖开升,李志锋,王超,等.用于远红外探测的 Si: P 阻挡杂质带红外探测器研制[J].*红外与毫米波学报*), 2016, 35(1): 37-41.

[12] Wang C, Li N, Dai N, et al. Ion-implanted Si: As blocked impurity band detectors for VLWIR detection [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2020, 39(30): 290-294. (王超,李宁,戴宁,等.离子注入型硅掺砷阻挡杂质带长波红外探测器的研究[J].*红外与毫米波学报*), 2020, 39(30): 290-294.

[13] Pan C Y, Mou H, Yao X M, et al. High performance Ge: B blocked impurity band detector developed using near-surface processing techniques [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, 41(2): 389-394. (潘昌翊,牟浩,姚晓梅,等.近表面加工技术制备的高性能 Ge: B 阻挡杂质带探测器[J].*红外与毫米波学报*), 2022, 41(2): 389-394.

[14] Sizov F. Terahertz radiation detectors: the state-of-the-art [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2018, 33(12): 123001.

[15] Zhu H, Zhu J, Hu W, et al. Temperature-sensitive mechanism for silicon blocked-impurity-band photodetectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(19): 191104.

[16] Beeman J W, Goyal S, Reichertz L A, et al. Ion-implanted Ge: B far-infrared blocked-impurity-band detectors [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2007, 51(1): 60-65.

[17] Grundmann M. *The physics of semiconductors* [M]. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2006.

[18] Zhu H, Weng Z P, Zhu J Q, et al. Surface plasmon enhanced Si based BIB terahertz detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(5): 053505.

[19] Chen J, Li G H, Chen B C, et al. Uniformly broadband far-infrared response from the photocarrier tunneling of Mesa Si: P blocked-impurity-band detector [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2021, 68(2): 560-564.

[20] Zhu H, Wang C, Wang P, et al. Optimized Si-based blocked impurity band detector under alternative operational mode [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, 66(9): 3891-3895.

- [21] Zhu J Q, Zhu H, Xu H L, et al. Impact of the structural parameters on the photoresponse of terahertz blocked-impurity-band detectors with planar structure [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2020, 10(4): 358-362.
- [22] Zhu H, Weng Z, Zhu J, et al. Comparison of photoresponse of Si based BIB THz detectors [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2017, 64(3): 1094-1099.
- [23] Zhu H, Xu J, Zhu J, et al. The effect of infrared plasmon on the performance of Si-based THz detectors [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, 28: 839-844.
- [24] Zhu J, Xu H, Li K, et al. Ge-based triple-band infrared photodetector [J]. *Applied Physics Express*, 2018, 11(11): 114102.
- [25] Zhu J, Zhu H, Xu H, et al. Ge-based mid-infrared blocked-impurity-band photodetectors [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 92: 13-17.
- [26] Kim M D, Hahn S R, Lee Y H. Extension of long wavelength response by modulation doping in extrinsic germanium infrared detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 1985, 46(4): 403-405.
- [27] Liao K S, Li N, Wang C, et al. Extended mode in blocked impurity band detectors for terahertz radiation detection [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(14): 143501.
- [28] Pan C, Yin Z, Song Z, et al. Dark-current-blocking mechanism in BIB far-infrared detectors by interfacial barriers [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2021, 68(6): 2804-2809.
- [29] Rogalski A. *Infrared detectors* [M]. New York: CRC Press, 2011.