

锗基 p-i-n 结构阻挡杂质带红外探测器的温度影响机制

陈天业^{1,2,5}, 刘赤县^{1,2,5*}, 王泽欣⁶, 胡清智⁶, 潘昌翊^{1,2,4}, 凌静威¹, 刘晓艳^{2,4},
朱家旗^{2,4}, 邓惠勇^{1,3*}, 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. 中国科学院杭州高等研究院物理与光电工程学院, 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: BIB(阻挡杂质带)探测器在红外天文空间探测等领域具有重要应用价值, 然而关于其温度依赖机制的研究仍较为有限。文章采用近表面处理技术, 制备了一种基于高纯锗材料的平面 p-i-n 结构 BIB 红外探测器, 在低温条件下表现出优异的电学与光电响应性能。3.3 K 时反偏电流低至 15 pA, 在 15 K 以下保持良好的响应性能, 黑体探测率高达 $3.5 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, 但随着温度升高降低。采用包含光激发、热激发与碰撞电离过程的电流模型模拟结果与实验数据, 揭示温度升高引起耗尽区显著收缩降低载流子收集效率为主要作用机制, 为 BIB 探测器在低温红外探测中的结构设计与性能优化提供了理论支撑和实验依据。

关键词: BIB 探测器; p-i-n 结构; 低温红外探测

中图分类号: O43

文献标识码: A

Temperature-Dependent Mechanism of Ge-Based p-i-n Blocked Impurity Band Infrared Detectors

CHEN Tian-ye^{1,2,5}, LIU Chi-xian^{1,2,5*}, WANG Ze-xin⁶, HU Qing-zhi⁶, PAN Chang-yi^{1,2,4}, LING Jing-wei¹, LIU Xiao-yan^{2,4}, ZHU Jia-qi^{2,4}, DENG Hui-yong^{1,3*}, 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, 200241, Shanghai, China;

4. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Hangzhou University of Technology, 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: Blocked Impurity Band (BIB) detectors have significant application potential in fields such as infrared astronomical space observation. However, studies on their temperature-dependent mechanisms remain limited. In this work, a planar p-i-n structured BIB infrared detector based on high-purity germanium was fabricated using a near-surface processing technique. The device exhibited excellent electrical and photoresponse performance under cryogenic

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 National Key R&D Program of China (No. 2023YFA1608701), National Natural Science Foundation of China (Nos. 62274168, 11933006 and U2141240), and Hangzhou Leading Innovation and Entrepreneurship Team (No. TD2020002).

作者简介(Biography): 陈天业(2000-)男, 江苏扬州, 硕士研究生, 主要研究领域为 Ge 基阻挡杂质带红外探测器和高纯锗探测器。E-mail: chen-ty2022@shanghaitech. edu. cn.

* 通讯作者 (Corresponding author): (*Corresponding author): E-mail: liuchixian2@shanghaitech. edu. cn; hydeng@lps. ecnu. edu. cn; ndai@mail. sitp. ac. cn

conditions. At 3.3 K, the reverse bias current was as low as 15 pA, and good response was maintained below 15 K. The blackbody detectivity reached up to $3.5 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, but decreased with increasing temperature. A current model incorporating photoexcitation, thermal excitation, and impact ionization processes was employed to simulate the experimental results. The analysis revealed that the primary mechanism for performance degradation at elevated temperatures is the significant shrinkage of the depletion region, which reduces carrier collection efficiency. This study provides both theoretical and experimental support for the structural design and performance optimization of BIB detectors for low-temperature infrared detection.

Key words: BIB detector, p-i-n structure, low temperature infrared detection

PACS:

引言

自 1977 年 Petroff 和 Stapelbroek 首次提出阻挡杂质带(Blocked Impurity Band, BIB)光电探测器以来^[1-3],该类器件因其高灵敏度、快速响应、低暗电流以及优异的抗辐射性能,已在天文观测、深空探测等低温远红外应用领域获得广泛关注与应用^[4-10]。与传统的非本征探测器相比,BIB探测器在高度掺杂的吸收层与低掺杂或本征的电极之间引入一层阻挡层,有效抑制了由杂质带中的热激发或跳跃机制引起的漏电流,同时保持对远红外光子的高吸收效率,实现了高灵敏度与低噪声性能的兼顾。

传统的 BIB 探测器主要以 Si: As、Si: Sb 等材料体系为主,适用于 3~30 μm 波段的中远红外探测。为满足更宽谱段、更高性能和更低温应用的需求,近年来研究者将目光投向了锗(Ge)基材料体系。高纯锗因其更浅的杂质能级、更高的迁移率以及更优的低温载流子行为,成为开发新一代 BIB 探测器的重要候选。然而,由于锗相较硅具有更窄的带隙(约 0.66 eV),BIB 探测器在工作过程中对温度变化更加敏感。实验表明,随着温度升高,硅基 BIB 探测器的非本征光响应会迅速衰减,并在约 20 K 时几乎完全消失。这种对低温条件的强依赖性极大限制了 BIB 探测器在更广泛应用场景中的实用性。因此,深入理解其响应性能对温度的依赖机制,进而指导器件结构优化与材料设计,对于提升其工作温区及应用灵活性具有重要意义。

早在 1987 年,Szmulowicz 等人便通过建立碰撞电离模型研究了 Si 基 BIB 探测器的探测率^[11],并于 1988 年提出:只要热激发产生的载流子数量远小于掺杂浓度(N_D),BIB 探测器的响应率将不受显著影响^[12]。L Colace 等人(2008 年)系统研究了 Ge-on-Si p-i-n 光电二极管在不同温度下的暗电流与响应率变化,指出高温下暗电流上升主要源于空间电荷区的缺陷辅助载流子产生,其显著增加了复合与暗电流^[13]。Wang 等则从温度对载流子输运特性的影

响入手,尝试解释 GaAs 基 BIB 探测器暗电流随温度的变化行为^[14]。Pan 等(2022 年)通过实验证实,锗基 Ge: B BIB 探测器在极低温下存在明显的场致击穿现象,并指出当温度升高时,场辅助热电离过程(即 Poole - Frenkel 效应)将导致暗电流急剧增加^[15]。此外,Zhu 等人应用碰撞电离模型研究了 Si 基 BIB 探测器的光响应机制,提出高温下耗尽区载流子收集效率下降是造成响应率劣化的关键因素^[16]。

为深入研究 BIB 探测器的温度依赖机制,本研究设计并制备了一种新型平面型 p-i-n 结构器件,并进行了电学与光学性能测试。通过运用电离碰撞模型对该结构中的载流子传输过程进行分析,有效揭示了温度变化对器件性能的影响规律。研究结果验证了模型的适用性与合理性,为低温红外探测器的结构优化与性能提升提供了理论基础和实验支持。

1 器件结构

样品的结构示意图如图 1(a)所示。该探测器采用高纯度锗材料(电阻率约 $50 \Omega \cdot \text{cm}$)制备,整体结构由阻挡区(UR)、双吸收区(TRB 和 TRP)、双电极区(CRB 和 CRP)以及金(Au)电极组成。通过离子注入工艺,在 TRB 和 TRP 区域分别实现硼(B)和磷(P)元素掺杂;在 CRP 和 CRB 区域进一步实施高浓度简并掺杂,以确保电极与器件之间形成优良的欧姆接触。整体器件呈 p-i-n 结构。图 1(b)展示了器件的光学显微镜图像。样品中吸收区(TRP 和 TRB)的宽度均为 20 μm ,CRP 和 CRB 区域的宽度为 40 μm ,长度统一为 800 μm 。为研究阻挡区(UR)宽度对器件性能的影响,本文选取了阻挡层宽度分别为 10 μm 、15 μm 和 25 μm 的样品进行对比分析。

图 1. (a)样品结构图; (b) 样品的光学显微镜显微图

像

Figure 1. (a) Sample structure diagram; (b) Optical microscope micrograph of the sample

图 2 显示了器件的工艺流程。首先,在锗衬底上通过光刻定义 TR 和 CR 区域图形,采用厚度约为 $3\ \mu\text{m}$ 的光刻胶作为掩膜层。随后进行多步离子注入,以实现均匀掺杂。TRB 和 TRP 区的掺杂浓度约为 $1 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$,掺杂深度分别为约 $1.1\ \mu\text{m}$ 和 $0.7\ \mu\text{m}$ 。CRP 和 CRB 区域采用两次高剂量离子注入,掺杂浓度提升至约 $1 \times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$,实现常温下简并掺杂。中间的 UR 区域保持本征状态,作为器件的电荷阻挡层,杂质浓度约为 $5 \times 10^{13}\ \text{cm}^{-3}$ 。离子注入后,器件均经过快速热退火(RTA)处理以修复晶格损伤:磷掺杂区在 $600\ ^\circ\text{C}$ 下退火 60 秒,硼掺杂区在 $450\ ^\circ\text{C}$ 下退火 60 秒^[17]。退火完成后,采用等离子增强化学气相沉积(PECVD)在器件表面沉积约 200 nm 厚的氮化硅(Si_3N_4)钝化层。随后使用反应离子刻蚀(RIE)技术去除 CRP 和 CRB 区域上方的钝化层,并通过电子束蒸发(e-beam evaporation)在裸露区域沉积约 100 nm 厚的金层,形成电极。

为表征器件电学性质,将其封装在闭循环液氮低温恒温器(OptistatAC-V)。该系统配备温度控制器,可调节温度范围为 3.2 K 至 300 K,透射窗口选用高透过率的 HDPE 材质以适配远红外波段($> 15\ \mu\text{m}$)。I-V 特性通过半导体参数分析仪(Keithley 6517B)进行测量,红外辐射源为 IR-301 黑体,配合锁相放大器(SR830)、机械斩波器和前置电流放大器(SR570)使用。通过斩波-锁相技术,有效抑制环境辐射引入的噪声干扰。

2. 结果讨论

在无光照条件下,使用铝箔覆盖恒温器入射窗片后,对阻挡区(UR)长度为 $10\ \mu\text{m}$ 的器件在不同温度下的暗电流 I-V 特性进行测试,结果如图 5(a) 所示。与常规的 BIB 器件相比,p-i-n 型器件展现出更为明显的整流特性:在反向偏压下,其暗电流显著低于正向偏压,并整体表现出更低的暗电流水平。暗电流随温度升高逐渐升高。在 3.3 K 温度下,反向电流截止于 $1.5 \times 10^{-11}\ \text{A}$;即使在 50 K 下,反偏电流仍能维持在 $2.2 \times 10^{-11}\ \text{A}$ 。器件产生整流特性的原因可能源于正向偏压和反向偏压下暗电流主导的载流子类型不同。正向偏压下漂移电流主要由 P 区的空穴和 N 区的电子组成,均为多数载流子,暗电流较大。反向偏压下,漂移电流则主要由 P 区的电子和 N 区的空穴构成,为少数载流子,暗电流较小。

进一步考察了阻挡区宽度对器件性能的影响。在 3.3 K 条件下,测试了 UR 区宽度分别为 $10\ \mu\text{m}$ 、 $15\ \mu\text{m}$ 和 $25\ \mu\text{m}$ 的样品,比较其暗电流变化趋势,结果如图 5(b) 所示。结果表明,尽管不同宽度的 UR 区在低温下均表现出较低的暗电流,但阻挡区的宽度变化对器件整体性能影响较小。相较之下,温度变化对暗电流的影响更为显著。

为研究器件的光电响应特性,我们引入黑体响应测试。使用 1000 K 的高温黑体作为测试光源,选取阻挡区宽度为 $10\ \mu\text{m}$ 的器件进行测试。测试结果如图 6(a) 所示,在 3.3 K 时,无光照、背景热辐射和黑体辐照下的 I-V 曲线存在明显差异,表明器件对红外辐射具有良好的响应能力。图 6(b) 展示了

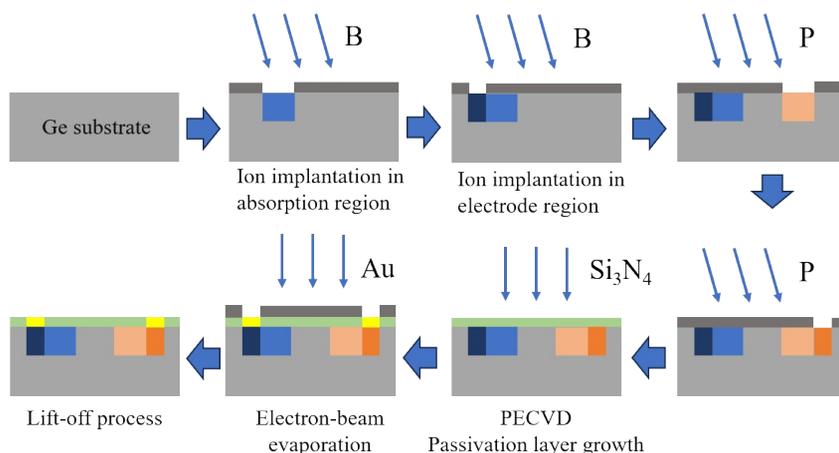


图 2 器件工艺流程图

Figure 2 Device Process Flow Chart

不同工作温度下, 黑体照射引起的光电流变化。结果表明, 当温度低于 15 K 时, 器件产生的光电流较高; 而随着温度升高至 15 K 及以上, 响应信号迅速衰减, 显示出温度对光电响应性能的显著抑制作用。图 6(c) 给出了器件在不同温度下, 黑体探测率 D^* 随偏压变化的曲

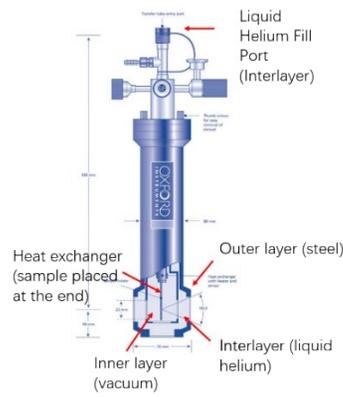


图 3 低温恒温器 (OptistatAC-V) 结构
Figure 3 Structure of cryostat (OptistatAC-V)

表 1 p-i-n 平面型 BIB 器件和其他平面型 BIB 器件暗电流对比

Table 1 Comparison of dark current between p-i-n planar BIB devices and other planar BIB devices

Substrate	Doping impurities	Absorption area (μm^2)	Blocking area (μm^2)	Dark current
Ge	B & P	2*20 *800	10 *800	1.5×10^{-11} A
	B ^[26]	50 *1000	10 *1000	1×10^{-10} A
	P ^[15]	40*550	13*550	6×10^{-9} A
	S ^[27]	20*400	5*400	3×10^{-6} A
	Ga ^[28]	75*150	25*150	1×10^{-10} A
Si	As	-	-	1×10^{-11} A

线。黑体探测率根据文献^[20]中的公式计算:

$$D^* = \frac{R_{bb}}{\sqrt{2qI_d \Delta f}} \sqrt{A_d \Delta f}, \quad (1)$$

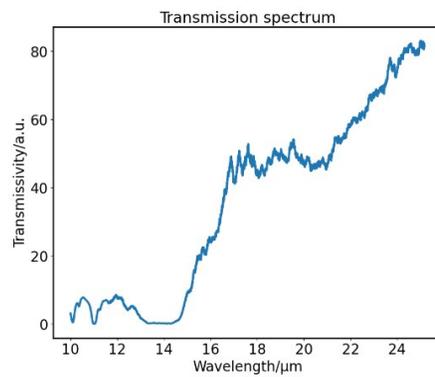
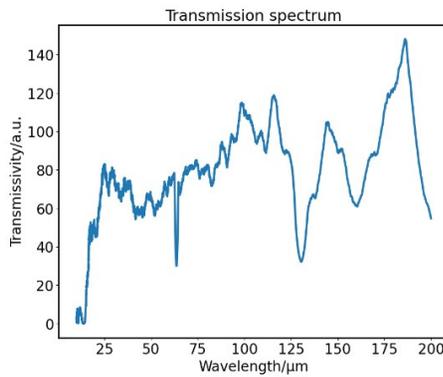


图 4 HDPE 窗口透射谱

Figure 4 HDPE window Transmission Spectrum

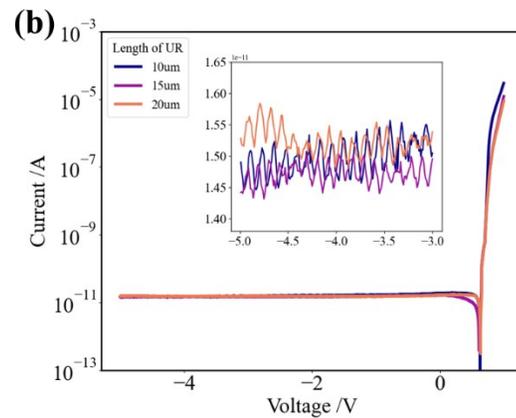
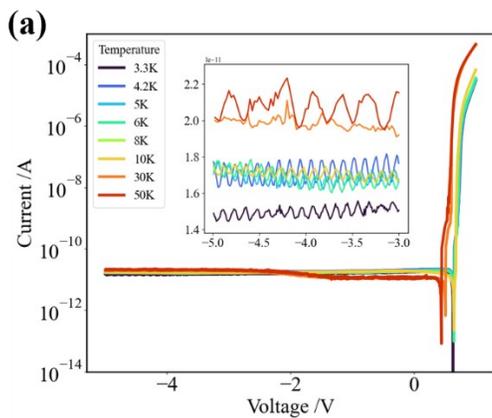


图 5 暗电流特性(a) 不同温度下阻挡层宽度 10 μm 器件的 IV 曲线; (b) 3.3 K 下不同阻挡层宽度器件的 IV 曲线

Figure 5 Dark current characteristics (a) IV curves of devices with a barrier layer width of 10 μm at different temperatures; (b) IV curves of devices with different barrier layer widths at 3.3 K

其中 q 为电子电荷量, $A_d = 0.032 \text{ mm}^2$ 为有效的光敏区面积, Δf 为等效带宽, I_d 为实验测得暗电流, R_{bb} 为黑体响应率, 计算公式为^[21]:

$$R_{bb} = \frac{2\sqrt{2}\pi L^2 I_{pc}}{\sigma(T_b^4 - T_d^4)A_b A_d}, \quad (2)$$

其中, I_{pc} 是测量所得光电流, 黑体温度 $T_b = 1000 \text{ K}$, 环境温度 $T_d = 300 \text{ K}$, 斯特藩-玻尔兹曼常数 $\sigma = 5.67 \times 10^{-12} \text{ W}/(\text{cm}^2 \text{K}^4)$, 以及黑体出射孔径面积 $A_b = 19.63 \text{ mm}^2$, 有效的光敏区面积 $A_d = 0.032 \text{ mm}^2$, 探测器到黑体的距离 $L = 20 \text{ cm}$ 。计算结果表明, D^* 的变化趋势与光电流一致: 在 3.3 K 至 15 K 温度范围内, 器件的黑体响应率基本保持稳定; 当温度超过 15 K 后, 响应性能迅速下降。这进一步验证了高温对器件性能的明显抑制作用。值得注意的是, 在 15 K 以下, 器件在 0 V 至 -5 V 偏压范围内的黑体探测率保持在约 $3.5 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, 显示出良好的低温工作性

能。接下来, 从能带结构角度出发, 探讨温度对器件性能的影响机制。

图(7)a 展示了低温无光照条件下 p-i-n 型结构 BIB 探测器的能带示意图。首先分析 N 区的情况: 在 TRP 区域, 由于高浓度的 N 型掺杂, 在靠近导带的位置形成了杂质带。在无光照的情况下, 次要受主被主要施主杂质补偿, 部分电子从杂质带跃迁至受主能级, 形成均匀分布的电离施主(D^+)和电离受主(A^-)分布。由于杂质带中掺杂浓度较高, 杂质原子之间的波函数发生重叠, 由于跳跃机制(hopping conduction), 电离施主(D^+)在杂质带中具备一定的迁移能力。在外加偏压作用下, 这些带正电的电离施主(D^+)会向阴极方向移动, 并最终在电极处被扫出。然而, 由于偏置电场下的阻挡层限制了空穴从外部进入 P 区, 空穴无法持续补充, 导致该区域逐渐演变为耗尽区。这个耗尽区主要由不可移动的电离受主(A^-)组成, 整体呈现出净负电荷分

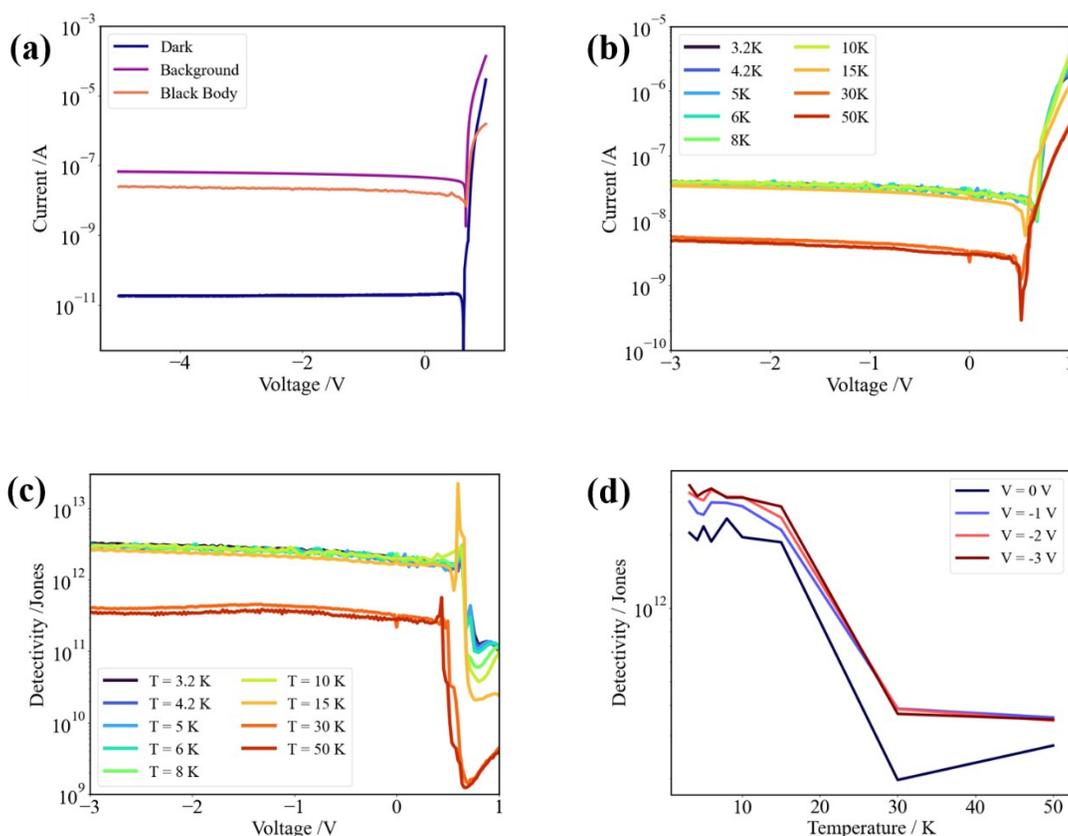


图6 黑体响应特性(a)无光照、背景热辐射和黑体辐照下的 I-V 曲线(b)不同温度下黑体响应 IV 曲线(c)不同温度下探测率 D^* (d)不同偏压下探测率随温度变化

Figure 6 Blackbody response characteristics (a) I-V curves under no illumination, background thermal radiation, and blackbody irradiation (b) Blackbody response IV curves at different temperatures (c) Detection rate D^* at different temperatures (d) Detection rate variation with temperature under different biases

布^[18-19]。同理,在P区,由于杂质带中掺杂浓度较高,电离受主能够在杂质带中迁移。在外加偏压作用下,这些带负电的电离受主会向阳极方向移动,并最终在靠近阻挡区的位置被耗尽,形成由不可移动的电离施主(D^+)构成的净空间电荷区^[18-19]。

综上所述,TRB与TRP两个区域分别形成了带有净负电荷和净正电荷的耗尽区。在这两个耗尽区之间,由于电荷不均衡分布而建立了一个稳定的内建电场。当有光照条件时,在吸收区受光子激发的电子和空穴被电场分离由此产生光电流。

然而,随着温度升高,部分杂质供体发生热激发,电子被激发到导带,这将影响耗尽区的电荷密度^[16],如图(8)所示。以N区为例,当杂质带中的供

体原子被热激发后,会向导带释放一个自由电子,同时杂质带中留下一个空穴。该空穴与电离的施主离子(D^+)类似,在电场作用下被持续扫出,并且由于阻挡层的存在,空穴无法补充。但由于导带中增加了被激发的自由电子,使得耗尽区的净负电荷量增多。同理,在P区,热激发产生的价带空穴增多,使耗尽区的净正电荷量相应增加。因此,耗尽区内净电荷的变化,实质上对应于热激发进入导带或价带的电子或空穴所带的电量。

通过解式(3)的超越方程可得到N区费米能级随温度变化情况^[22],

其中 $N_c = 1.98 \times 10^{15} \cdot T^{3/2} \text{ cm}^{-3}$, $N_v = 9.6 \times 10^{14} \cdot T^{3/2} \text{ cm}^{-3}$ 分别为导带价带态密度^[23], $E_g = 0.742 -$

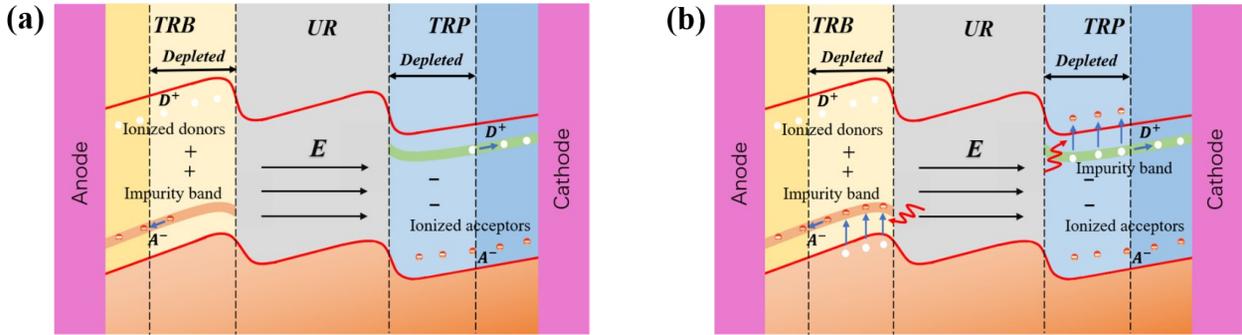


图7 器件能带结构图(a)低温无光照时能带结构(b)光照时能带结构

Figure 7 Band structure diagram of the device (a) Band structure under low temperature and no light exposure (b) Band structure under light exposure

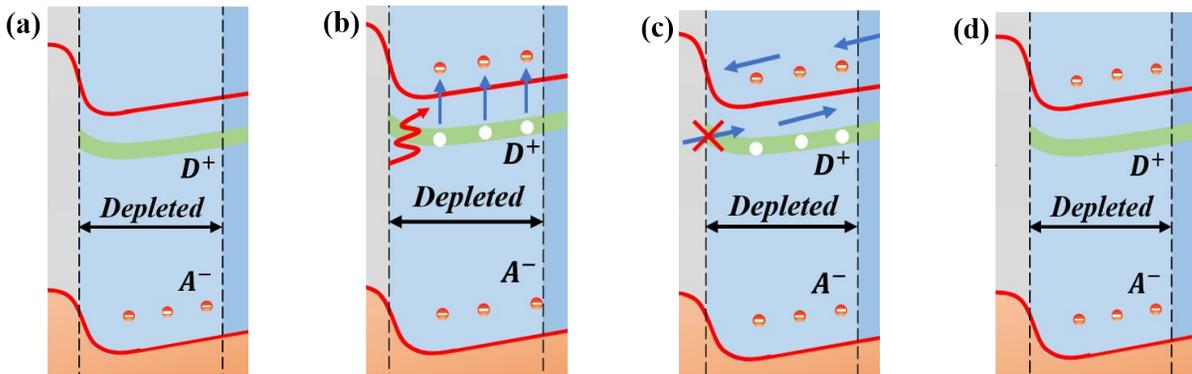


图8 热激发条件下器件N区耗尽区内电荷行为示意图(a)低温下器件平衡状态(b)热激发产生电子-空穴对(c)电子迁移出耗尽区并被持续补充,空穴被电场扫出后难以补充(d)达到新平衡后,耗尽区导带中积累负电荷

Figure 8 Schematic diagram of charge behavior in the depletion region of device N under thermal excitation conditions (a) Device equilibrium state at low temperature (b) Electron hole pairs generated by thermal excitation (c) Electrons migrate out of the depletion region and are continuously replenished, while holes are difficult to replenish after being swept out by the electric field (d) After reaching a new equilibrium, negative charges accumulate in the conduction band of the depletion region

$$N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right) = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right) + \frac{N_D}{1 + 2\exp\left(-\frac{E_D - E_F}{kT}\right)} \quad (3)$$

$$n = \frac{N_c}{1 + \exp\left(-\frac{E_D - E_F}{kT}\right)} \quad (4)$$

$4.8 \times 10^{-4} \cdot T^2 / (T+235)$ eV 为 Ge 的带隙^[23], $E_c - E_D = 0.013$ eV 为施主能级距离导带距离。将得到的 E_F 带入式(4), 可以计算出导带中总的电子数(包括杂质能级激发以及价带激发)。图9(a)为计算所得热激发载流子浓度随温度的变化曲线, 可见热激发载流子在 15K 左右达到次要受主(施主)杂质浓度的数量级。由高斯定理

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0} \begin{cases} -\frac{q(N_{NA} + n)}{\epsilon \epsilon_0} \\ \frac{q(N_{PD} + p)}{\epsilon \epsilon_0} & -w_p \leq x \leq 0, \\ 0 \end{cases} \quad (5)$$

以及边界条件

$$\int_0^L \mathbf{E} \, dl = U, \quad (6)$$

可以计算器件的内建电场。其中 N 区吸收区电荷密度 $\rho = q(N_{NA} + n)$, N_{NA} 是 N 区次要受主杂质浓度, n 为热激活电子浓度, P 区吸收区电荷密度 $\rho = q(N_{PD} + p)$, N_{PD} 是 P 区次要施主杂质浓度, p 为热激活空穴浓度, U 为正负电极间电压差, $N_{NA} = N_{PD} = 3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 。图9(b)展示了不同温度下的内建电

场分布。尽管内建电场在空间上的积分恒等于电势差 U , 但随着温度升高, 由于 P 区和 N 区耗尽区中的电荷密度增加, 电场强度随空间位置上升更为迅速, 导致整体耗尽区的宽度减小, 如图9(c)。中间的阻挡区因几乎不含杂质原子, 在光激发下不产生载流子, 因此不能有效参与载流子的收集。实际能参与光生载流子收集的区域主要是 N 区和 P 区内的耗尽区 w_p 和 w_n 区域。然而在高温下, 这两个区域的宽度明显收窄, 从而显著降低了载流子的收集效率, 最终导致器件响应率下降^[16]。

为了计算不同温度下的电流密度, 首先建立耗尽区内的电流连续性方程。该方程描述了电子和空穴电流密度在空间中的变化, 并考虑了碰撞电离以及光激发和热激发所产生的载流子^[12]:

$$\begin{cases} -\frac{dJ_p(x)}{dx} + \xi(x)(J - J_p(x)) + q(g_{op}(x) + g_{th}(x)) = 0 \\ \frac{dJ_n(x)}{dx} + \xi(x)J_n(x) + q(g_{op}(x) + g_{th}(x)) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中, J, J_n, J_p 分别表示总电流密度、电子电流密度和空穴电流密度; $\xi(x)$ 是电子的碰撞电离系数; g_{op} 和 g_{th} 分别表示光激发和热激发所产生的载流子生

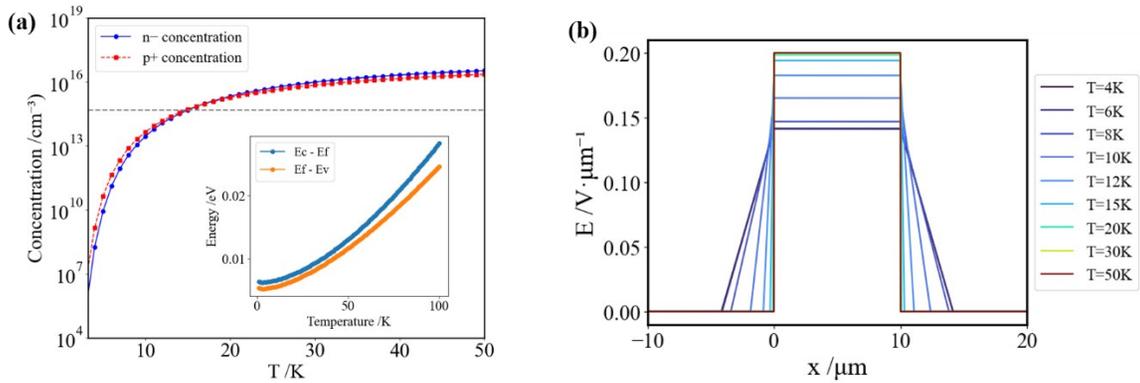


图9 不同温度下(a)n区和p区热激发载流子密度,附图分别为两个区域中费米能级距离导带和价带能量差(b)器件电场图, $-10 \sim 0 \mu\text{m}$ 为 TRB, $0 \sim 10 \mu\text{m}$ 为 UR, $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 为 TRP

Figure 9 (a) Thermally generated carrier densities in the n-region and p-region at different temperatures. Insets show the energy differences between the Fermi level and the conduction band (for n-region) or valence band (for p-region). (b) Electric field distribution in the device, where $-10 \sim 0 \mu\text{m}$ corresponds to the TRB, $0 \sim 10 \mu\text{m}$ to the UR, and $10 \sim 20 \mu\text{m}$ to the TRP region.

成率。光生载流子生成率 g_{op} 考虑了材料的吸收系数、表面反射率和背面反射率,其表达式为^[12]:

$$g_{op} = \alpha \phi_s (1 - R), \quad (8)$$

热激发生成率表达式为^[12]:

$$g_{th} = N_{pD} B_D N_c \exp(-\frac{E_D - E_F}{kT}) / g_D, \quad (9)$$

其中 α, R 分别为吸收系数、表面反射率。 B_D, N_c, g_D 分别为施主激发几率系数,导带有效态密度,供体能级的基态简并度。碰撞电离系数定义为^[12]:

$$\xi(x) = N_{pD} \sigma_I \exp(-E_I/E(x)), \quad (10)$$

其中 σ_I 是碰撞电离截面, E_I 是碰撞电离阈值电场, $E(x)$ 是局域电场强度。对电流连续性方程进行求解后,得到总电流密度的解析表达式:

$$\text{其中乘法因子 } M(x) = \exp(\int_{-w_p}^x \xi(x') dx'), J_p(-w_p)$$

和 $J_n(w_l + w_n)$ 分别代表 $-w_p$ 处的空穴电流和 $w_l + w_n$ 出的电子电流。由于电子在 $w_l + w_n$ 处于初始加速的阶段,其电流可近似为零,同理 $J_p(-w_p)$ 也可近似为零。总电流密度表达式简化为 J

$$J = q \int_{-w_p}^{w_l + w_n} (g_{op} + g_{th}) M(x) dx, \quad (12)$$

在设定好相关参数后,可模拟出电流随温度变化的趋势。如图 10 所示,在低温(10 K 以下)范围内,电流密度基本保持稳定。在此温度区间内,热激发载流子的数量极少,远少于次要杂质,使得器件的耗尽区宽度维持在较大的水平。此时,载流子的收集效率主要受到复合距离的限制(约几微米),因此电流变化不明显。当温度升高至 10 K 以上时,耗尽区宽度迅速减小。尽管电场强度有所增强,但其对电流的提升作用不足以抵消由于收集效率下降带来的影响,导致电流密度整体呈下降趋势。进一步升温至 40 K 以上后,器件中热激发效应显著增

强,热激发产生的载流子数量迅速增加,并在数量上超过光生载流子,重新主导器件的载流过程,从而导致电流出现回升。

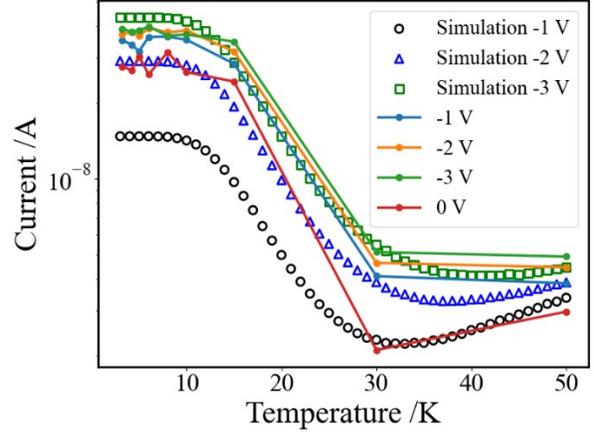


图 10 计算电流和实验测得电流对比图

Figure 10 Comparison between calculated current and experimentally measured current

从模拟结果来看,在较高偏置电压下,模拟曲线与实验数据表现出良好的一致性;而在低电压条件下,由于电场强度不足以有效驱动电离过程,电离碰撞模型在描述载流子产生率方面存在一定局限性,进而导致模拟结果与实验数据之间出现偏差。考虑到尽管公式(12)中未显式引入电压,而是通过作为电场强度和分布函数的增益项 M 间接反映偏置电压的影响,该模型仍能够较好地呈现电流随电压变化的整体趋势。

3 结论

本文系统研究了一种基于高纯锗材料的 p-i-n 结构阻挡杂质带(BIB)远红外探测器的制备工艺、电学与光学性能以及其温度敏感机理。通过离子注入与快速热退火技术,成功制备出具备双吸收区

$$J = M(-w_p) J_p(-w_p) + M(w_l + w_n) J_n(w_l + w_n) + q \int_{-w_p}^{w_l + w_n} g(x) M(x) dx, \quad (11)$$

表 2 模拟时部分参数值

Table 2 Values of some parameters in simulation

Parameter	Value	Parameter	Value
ϵ_0	8.85×10^{-12} F/m	B_D	$9 \times 10^{-19} / T^{3/2}$ cm ³ ·s ⁻¹ [25]
ϵ	16	g_D	2
R	0.30	E_I	$5V \cdot \mu\text{m}^{-1}$
ϕ_s	2×10^{13} ph·cm ⁻² ·s ⁻¹	σ_I	1.2×10^{-13}
N_c	$1.98 \times 10^{15} \cdot T^{3/2}$ cm ⁻³ [23]	α	250 [25]

与双电极区的平面型高性能 BIB 器件。在低温条件下, 器件展现出优异的整流特性与极低的暗电流水平, 3.3 K 时反偏电流低至 1.5×10^{-11} A, 黑体探测率高达 $3.5 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。进一步通过实验与理论分析, 揭示了温度对器件响应性能的影响机制。结果表明, 在 3 - 10 K 范围内, 器件响应率稳定, 但温度继续升高将导致耗尽区宽度急剧减小, 载流子收集效率下降, 进而显著抑制器件响应。基于电流连续性方程建立了包含光激发、热激发与碰撞电离过程的电流模型, 数值模拟结果与实验数据一致, 验证了所提出的温度敏感机制的合理性。该研究为 BIB 探测器在低温红外探测领域的结构优化与性能提升提供了理论基础与参考。

参考文献

- [1] Petroff M D , Stapelbroek M G .Blocked impurity band detectors: US19800199881 [P].US4568960A [2025-06-24]. DOI:US4568960 A.
- [2] Stetson S B , Reynolds D B , Stapelbroek M G , et al.Design And Performance Of Blocked-Impurity-Band Detector Focal Plane Arrays [J].Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1986, 686: 48-65. DOI: 10.1117/12.936525.
- [3] Gaalema S D .Radiation detector.1985[2025-06-24].DOI: US4507674 A.
- [4] Cleve J E V , Herter T L , Butturini R , et al.Evaluation of Si: As and Si: Sb blocked-impurity-band detectors for SIRTf and WIRE [J].Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1995, 2553: 502-513.DOI: 10.1117/12.221380.
- [5] Hogue H H , Guptill M L , Reynolds D , et al.Space mid-IR detectors from DRS [J].Proc Spie, 2003.DOI: 10.1117/12.461584.
- [6] Hogue H H , Guptill M T , Monson J C , et al.Far-infrared blocked impurity band detector development [J].Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2007, 6678: 7.DOI: 10.1117/12.735123.
- [7] Haegel N M .BIB detector development for the far infrared: from Ge to GaAs [J].International Society for Optics and Photonics, 2003.DOI: 10.1117/12.479623.
- [8] Hogue H H , Mlynczak M G , Abedin M N , et al.Far-infrared detector development for space-based Earth observation [J].Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2008, 7082: 70820E-70820E-8. DOI: 10.1117/12.797078.
- [9] Watson D M , Guptill M T , Huffman J E , et al.Extrinsic germanium blocked-impurity-band detector arrays [J].Journal of Applied Physics, 1993, 74(6): 4199-4206.DOI: 10.1063/1.354424.
- [10] Hogue H H , Guptill M L , Reynolds D , et al.SPIE Proceedings [SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation - Waikoloa, HI (Thursday 22 August 2002)] IR Space Telescopes and Instruments - [J]. 2003, 4850: 880-889.DOI: 10.1117/12.461584.
- [11] Szmulowicz F , Madarasz F L .Blocked impurity band detectors—an analytical model: Figures of merit [J].Journal of Applied Physics, 1987, 62(6) : 2533-2540. DOI: 10.1063/1.339466.
- [12] Szmulowicz F , Madarasz F L , Diller J .Temperature dependence of the figures of merit for blocked impurity band detectors [J].Journal of Applied Physics, 1988, 63(11) : 5583-5588. DOI: 10.1063/1.340335.
- [13] Colace L , Balbi M , Soriano V , et al. Temperature-Dependence of Ge on Si p-i-n Photodetectors [J]. Journal of lightwave technology, 2008, 26(14) : 2211-2214. DOI: 10.1109/JLT.2008.917080
- [14] Wang X , Chen Y , Chen X , et al. Temperature-dependent spectral response mechanism in GaAs-based blocked-impurity-band (BIB) far-infrared detectors [J]. Optical and Quantum Electronics, 2020, 52(1). DOI: 10.1007/s11082-019-2150-z.
- [15] 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]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(2).
- [16] Zhu H , Zhu J , Hu W , et al. Temperature-sensitive mechanism for silicon blocked-impurity-band photodetectors [J]. Applied physics letters, 2021(19) : 119. DOI: 10.1063/5.0065468.
- [17] Habiba U E , Tian-Ye C , Chi-Xian L , et al. Ion implantation process and lattice damage mechanism of boron doped crystalline germanium [J]. 红外与毫米波学报, 2024, 43(6) : 749-754.
- [18] 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. DOI: 10.1063/1.352127.
- [19] Hadek V , Farhoomand J , Beichman C A , et al. Extension of long wavelength response by modulation doping in extrinsic germanium infrared detectors [J]. Applied Physics Letters, 1985, 46(4) : 403-405. DOI: 10.1063/1.95593.
- [20] Sclar N . Properties of doped silicon and Germanium infrared detectors [J]. Progress in Quantum Electronics, 1984, 9(3) : 149 - 257. DOI: 10.1016/0079-6727(84)90001-6.
- [21] Rogalski A . Infrared detectors [M]. 2010.
- [22] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学. 第4版 [M]. 国防工业出版社, 2010.
- [23] Ioffe Institute. Band structure and carrier concentration-Germanium [EB/OL]. <https://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/Ge/bandstr.html>
- [24] Ioffe Institute. Electrical Properties of Germanium [EB/OL]. <https://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/Ge/electric.html>
- [25] Dargys A , Kundrotas J . Handbook on physical properties of Ge, Si, GaAs and InP [J]. 1994.
- [26] Zhu J , Zhu H , Xu H , 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, PP(99) : 1-1. DOI: 10.1109/TTHZ.2020.2968238.
- [27] Zhu J , Xu H , Li K , et al. Ge-based triple-band infrared photodetector [J]. Appl. Phys. Express, 2018, 11(11) :

-
- 114102.1-114102.4.DOI:10.7567/APEX.11.114102.
- [28] 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. DOI:10.1016/j.infrared.2006.12.001.
- [29] Wang C, Li N, DAI N, et al. Ion-implanted Si: As blocked impurity band detectors for VLWIR detection [J]. J. Infrared Millim. Waves, 2020, 39(3): 290-294.]