

用于远红外探测的 Si:P 阻挡杂质带红外探测器研制

廖开升, 李志锋, 王超, 李梁, 周孝好, 李宁*, 戴宁

(中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

摘要:提出了全外延技术方案制备阻挡杂质带薄膜,避免了离子注入制备背电极层影响外延薄膜质量的技术难点.基于硅器件工艺设计制作了 Si:P 阻挡杂质带红外探测器.测量了器件的光电流响应谱和暗电流特性曲线,指出了叠加在光电流响应谱上的尖锐杂质峰对应阻挡层中磷原子的杂质跃迁.研究了器件在低温下小偏压范围内的暗电流起源.通过对计算结果分析,排除了该区域暗电流起源于热激发电导和跳跃式电导的可能,指出暗电流来自器件对冷屏的光电响应.器件工作温度 5 K,工作偏压 1.6 V 时,响应波段覆盖 2.5 ~ 40 μm ,峰值波长 28.8 μm ,峰值响应率 20.1 A/W,峰值探测率 $3.7 \times 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ (背景光子通量低于 $10^{13} \text{ ph/cm}^2 \cdot \text{s}$).

关键词:阻挡杂质带;暗电流;远红外;太赫兹

中图分类号:TN36 **文献标识码:**A

Si:P blocked impurity band detectors for far infrared detection

LIAO Kai-Sheng, LI Zhi-Feng, WANG Chao, LI Liang, ZHOU Xiao-Hao, LI Ning*, DAI Ning

(National Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Blocked impurity band detectors are of interest for various astronomy applications such as the Infrared Astronomical Satellite and Cosmic Background Explorer. The fabrication details and characterization of Si:P blocked impurity band detectors have been reported. The bottom contact was epitaxially grown instead of utilizing ion-implantation to improve the quality of epitaxial stack. The photocurrent spectra and dark current of the detectors have been measured. The spectral response extends from 2.5 μm to 40 μm . Several additional sharp peaks superimposed on the broadband response are designated to associate with impurity transitions of phosphorus in the blocking layer. The origin of dark current at small bias has been studied at low temperature. It was found that the shield of cryostat is the source of the background infrared light which hits the detectors to produced the dominant dark current at this regime. The detectors attain a peak responsivity of 20.1 A/W (at 28.8) and peak detectivity of $3.7 \times 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ (below a flux of $10^{13} \text{ ph/cm}^2 \cdot \text{s}$), which exhibits highly competitive figure of merits.

Key words: blocked impurity band, dark current, far infrared, terahertz

PACS: 85.60.Gz, 61.72.-y, 61.72.-y, 73.20.Hb

引言

阻挡杂质带(blocked impurity band, BIB)红外探测器在天文光子和成像探测领域都有重要应用,

具有覆盖波段宽、灵敏度高、响应速度快以及抗辐射性能高等优点,是红外天文应用中探测波长大于 5 微米的首选红外探测器^[1-6]. BIB 探测器利用电子吸收光子从杂质带跃迁到导带实现探测,由于杂质电

收稿日期:2015-02-06,修回日期:2015-10-08

Received date: 2015-02-06, revised date: 2015-10-08

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2011CB922004),国家自然科学基金(61290304,61376053)和上海技术物理研究所知识创新项目(Q-DX-64)资助的课题

Foundation items: National Program on Key Basic Research Project of China (2011CB922004), National Natural Science Foundation of China (61290304 and 61376053) and SITP KIP(Q-DX-64)

作者简介(Biography):廖开升(1987-),男,四川内江人,博士研究生,主要研究领域为阻挡杂质带红外探测器. E-mail: kaisheng@mail.sitp.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: ningli@mail.sitp.ac.cn

离能较小,因此能对远红外和太赫兹波段的低能光子响应. BIB 探测器是在非本征红外探测器的基础上发展而来的,非本征和本征红外探测器(探测原理基于带间跃迁,如 HgCdTe、InSb 探测器)的主要差别是前者吸收系数较低^[7],仅 $1 \sim 10 \text{ cm}^{-1}$,后者约 $10^3 \sim 10^4 \text{ cm}^{-1}$. 为了克服上述缺点,非本征探测器需要高掺杂浓度来改善吸收性能,然而高掺杂浓度引入的杂质带电导增大了器件的暗电流,因此其最大掺杂浓度受器件可接受的暗电流限制. BIB 探测器在结构上引入了一个本征阻挡层来阻断杂质带内暗电流的传导,使之能够有更高的掺杂浓度^[8]. BIB 探测器阻挡层的引入大大降低了器件的暗电流,也因此其掺杂浓度比对应本征探测器高约 1~2 个数量级,量子效率得到显著提升. 此外,由于 BIB 探测器中吸收层的高掺杂,杂质能级宽化形成杂质带及禁带宽度变窄,进一步减小了杂质电离能,因而 BIB 探测器可实现更长波长的红外探测^[3].

BIB 探测器根据主材料和掺杂杂质的不同,可获得不同的光谱响应. 如 Si:Sb BIB 探测器覆盖 $5 \sim 40 \mu\text{m}$ ^[6],应变 Ge:Ga 覆盖 $70 \sim 200 \mu\text{m}$ ^[9],GaAs:Te 覆盖 $100 \sim 300 \mu\text{m}$ ^[10]. 考虑到硅容易获得大直径高纯度单晶、硅器件工艺相对成熟、对后期读出电路集成兼容有利,以及硅掺磷(Si:P)器件材料相对容易实现的优点,本工作采用全外延技术方案生长了 Si:P BIB 器件材料,然后通过硅器件工艺制作了 Si:P BIB 探测器,给出了器件的光电特性测试结果,并研究了器件光电流谱的多峰结构和低温区小偏压范围内的暗电流起源.

1 材料生长和器件工艺

传统的 BIB 材料生长中,简并掺杂的背电极层通过离子注入实现^[5,8],然而高能量大剂量的离子注入会损伤晶格衬底,引入大量的缺陷. 尽管后期可通过快速退火工艺修复损伤晶格,但不易做到完全恢复,为此我们提出了背电极层、吸收层和阻挡层均采用外延生长的全外延技术方案. 该方案着重解决了背电极层通过离子注入掺杂时对外延衬底造成损伤影响外延质量的技术难点. 器件的材料生长是通过化学气相外延技术实现的,背电极层和吸收层掺杂杂质选择为磷(P),由气源磷烷引入. 首先在晶向为 $\langle 100 \rangle$ 的高纯硅衬底上生长 500 nm 厚掺杂浓度为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的背电极层,然后生长 $15 \mu\text{m}$ 厚掺杂浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的吸收层,最后生长 $5 \mu\text{m}$ 厚的未掺杂的阻挡层.

受材料生长均匀性和控制精度所限,各外延层的最终厚度和掺杂浓度由二次离子质谱表征,测试结果如图 1 所示. 在阻挡层外延过程中,由吸收层外扩散至阻挡层的掺杂杂质和腔体内生长吸收层的微量残留磷烷,使得阻挡层的电阻率只有 $37.9 \Omega \cdot \text{cm}$,掺杂浓度约 $1.2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$.

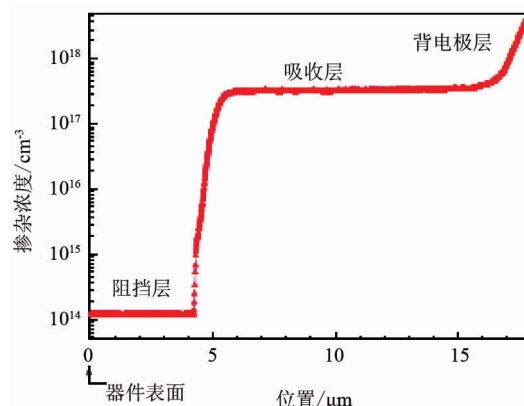


图 1 BIB 器件外延层中磷掺杂浓度随器件深度的变化曲线

Fig. 1 Phosphorus dopant concentration of epitaxial layer at different depth from device surface

在生长好的外延片上用等离子体增强化学气相外延技术沉积 200 nm 的氮化硅(SiN_x)层作为离子注入掩蔽层. 在氮化硅上利用标准光刻工艺和湿法腐蚀开离子注入孔,然后离子注入磷形成简并掺杂的前电极注入层,经 950°C 快速退火 30 s 修复注入损伤和实现掺杂离子激活. 在离子注入窗口层上再沉积 200 nm 的氮化硅充当背电极腐蚀掩蔽层和钝化层. 开背电极孔并用湿法腐蚀至背电极层,腐蚀深度约 $21 \mu\text{m}$,腐蚀槽呈 V 型源于硅中腐蚀速度的各向异性. 开前电极孔并电子束蒸镀 600 nm 厚的 Al 作为电极,经 450°C 炉管退火 30 min 形成欧姆接触. 图 2(a) 所示为器件剖面结构示意图,制备好的器件如图 2(b) 所示,其光敏元面积为 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$. 最后将解离的小芯片通过低温胶固定至铜热沉上,并用金丝球焊引出电极至印刷电路板管脚以便测试.

2 器件测试与分析

将封装好的器件安装在氦气闭循环制冷杜瓦中,器件工作温度可通过温控仪调节,在阻挡层一侧电极加正向偏置. 使用基于 Nicolet 6700 傅立叶光谱仪的光电流谱测试系统对器件分别进行中红外和远红外波段的光电流谱测试,并分别扣除这两个波

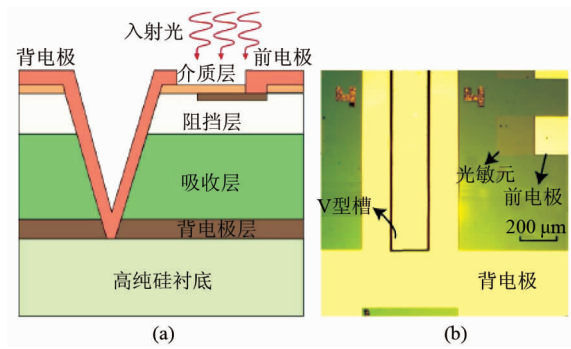


图 2 (a) BIB 器件结构示意图;(b)完成器件显微照片
Fig. 2 (a) Schematic view of device structure for a BIB detector; (b) Microscope view of finished BIB detectors

段的背景谱,最后拼接即得器件的相对光电流响应谱.绝对光电流响应谱,是通过测量 800 K 黑体响应来校准相对光电流谱获得的.图 3 所示为器件在 5 K,偏压为 1.2 V 和 1.6 V 时经黑体定标后的光电流响应谱. BIB 探测器响应波段宽,受硅材料的声子吸收带、傅立叶光谱仪的非理想响应函数及阻挡层中磷原子的杂质跃迁等因素干扰,使得光电流谱的峰值波长和 g 因子不易确定.为此我们基于类氢原子模型计算了 BIB 探测器的理论光电流响应谱^[11],以虚线形式示于图 3 中,可以看到计算的响应光谱和实测响应光谱的主体峰是基本相符的.器件响应波段覆盖 2.5 ~ 40 μm ,峰值波长 28.8 μm ,1.6 V 处峰值响应率 20.1 A/W,峰值量子效率(含增益) 0.95. 10 ~ 20 μm 为硅材料的声子吸收带(硅外延片的透射谱见图 3 插入图),其间的鼓起对应该范围内声子吸收引起的热电响应^[7, 12].图 3 中叠加在主体响应峰上的、和尖锐峰对应阻挡层中磷原子的杂质跃迁^[13],其对应杂质跃迁指认列于表 1 中.响应谱上其它细微特征来自于 BIB 器件响应函数与傅立叶光谱仪的非理想响应函数之比.

表 1 阻挡层中磷原子的杂质谱峰指认^[13]

Table 1 Designation of the impurity transition of phosphorus in blocking layer^[13]

序号	峰位(实测)/ μm	峰位(理论)/ μm	跃迁指认
α	36.5	36.4	1S \rightarrow 2P ₀
β	31.7	31.6	1S \rightarrow 2P $_{\pm}$
γ	29.2	29.2	1S \rightarrow 3P $_{\pm}$

暗电流的测试是在氦气闭循环制冷杜瓦中进行的,为了尽可能地降低背景辐射,除了把杜瓦自身的冷屏完全包裹住,还额外为器件增加了一层定制的冷屏安装在冷指上.图 4(a)展示了 BIB 器件工作温

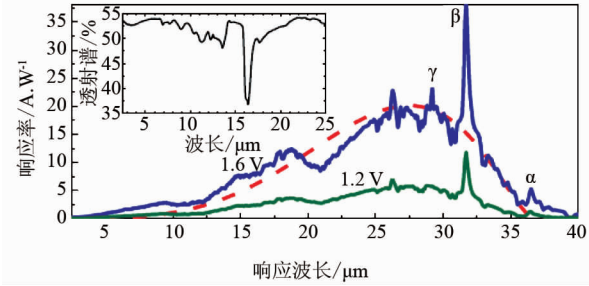


图 3 Si:P BIB 探测器工作温度 5 K, 偏压为 1.2 V 和 1.6 V 时的光电流响应谱.虚线所示为计算的光电流响应谱.插入图为硅外延片的透射谱

Fig. 3 Photocurrent spectrum biased at 1.2 V and 1.6 V (solid) and the calculated one (dashed) of Si:P BIB detectors at the temperature of 5 K. The inset shows the transmission spectrum of the epitaxial silicon sample

度为 5 K 和 10 K 时暗电流测试结果.由图可以看到,由于阻挡层的引入,暗电流 I - V 曲线表现出类二极管的不对称性,正偏下暗电流得到良好抑制,因此 n 型 BIB 器件通常选择在正偏下工作.为了研究 BIB 器件工作偏压内暗电流的物理起源,我们绘制了 0.2 V 偏压下的暗电流 Arrhenius 曲线,以蓝色方块示于图 4(b)中.由图可知,BIB 器件的暗电流电导机制主要分为两个区域.高温区(K)暗电流主要受热激发主导^[3, 14],激活能约 36 meV;低温区(K)暗电流起源根据我们的调研尚未有统一定论^[6, 14, 15].文献[14]指出由于阻挡层并非理想的本征层,该部分暗电流源于杂质带电导器件的跳跃式电导(hopping conduction).而文献[6]则指出该部分的暗电流同冷屏背景辐射有紧密关系,但没有给出进一步分析.另外也有文献报道^[15]该部分暗电流同表面钝化工艺相关.为此我们计算了低温区内热激发电流和跳跃式电流(激活能取 8 meV^[14])与温度的关系,计算结果示于图 4(b)中.可以看到,这两类电流均低于在该温度范围内的实测暗电流.因此低温区小偏压下的暗电流起源于其它机制.

考虑到 BIB 器件是一类极高灵敏度的探测器,将冷屏视作黑体,我们认为低温区暗电流与 BIB 器件对冷屏产生光电响应有关.由此引起的暗电流可以写作:

$$I = \phi_s R_{bb} \quad (1)$$

其中, ϕ_s 为黑体入射到光敏元上的能量, R_{bb} 为器件黑体响应率.由 BIB 器件原理及变温黑体响应率测试结果知,低温下一定温度(16 K)范围内,黑体响应率与温度变化无关.由于冷屏安装在冷指上,对器件加热时将连同冷屏一起加热,冷屏温度与器件工

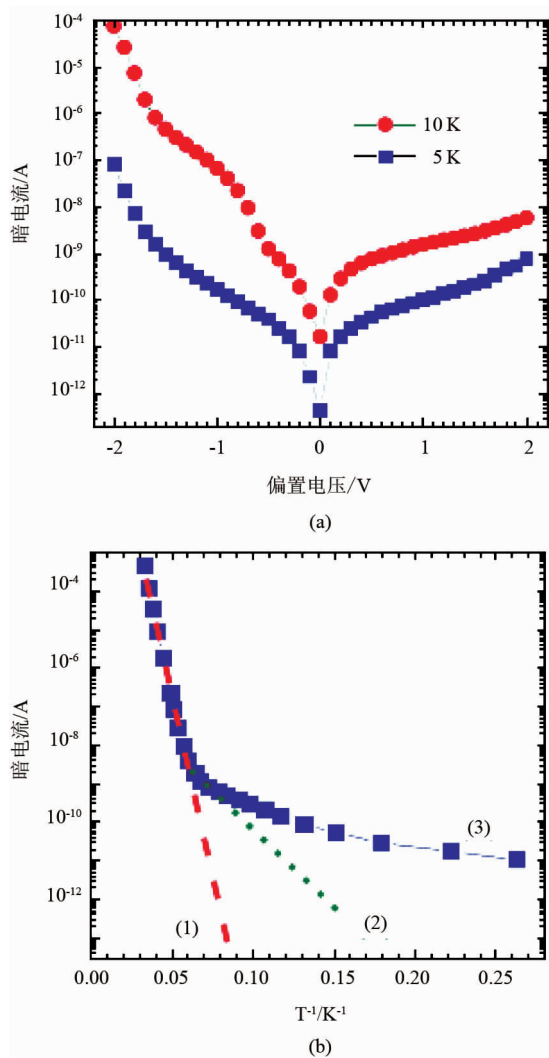


图4 (a) 工作温度 5 K 和 10 K 时的暗电流 I - V 曲线; (b) 器件在 0.2 V 处的计算的(1)热激发电流和(2)跳跃式电流以及(3)实测暗电流与温度倒数的依赖关系
Fig. 4 (a) Current-voltage curves under dark condition at temperature of 5 K and 10 K; (b) Dependence of the calculated (1) thermally activated current, (2) hopping current and (3) the measured dark current on the inverse temperature at the bias of 0.2 V

作温度呈正相关. 由斯特藩-玻尔兹曼定律^[7], 黑体辐射度同温度的四次方成正比, 因此该部分暗电流与温度的依赖关系可写为:

$$I \propto T^4 \quad (2)$$

式中, T 为工作温度. 取低温区 ($T < 16$ K) 0.2 V 处的变温暗电流绘制 $I - T^4$ 关系曲线, 示于图 5(a) 中. 从图中可以看到, BIB 器件在低温区的暗电流与温度的四次方呈良好的线性关系, 与式(2)相符. 这就半定量地证明了我们先前的判断, 低温区的暗电流受冷屏激发产生.

从上面的证明知器件暗电流由背景辐射光子激

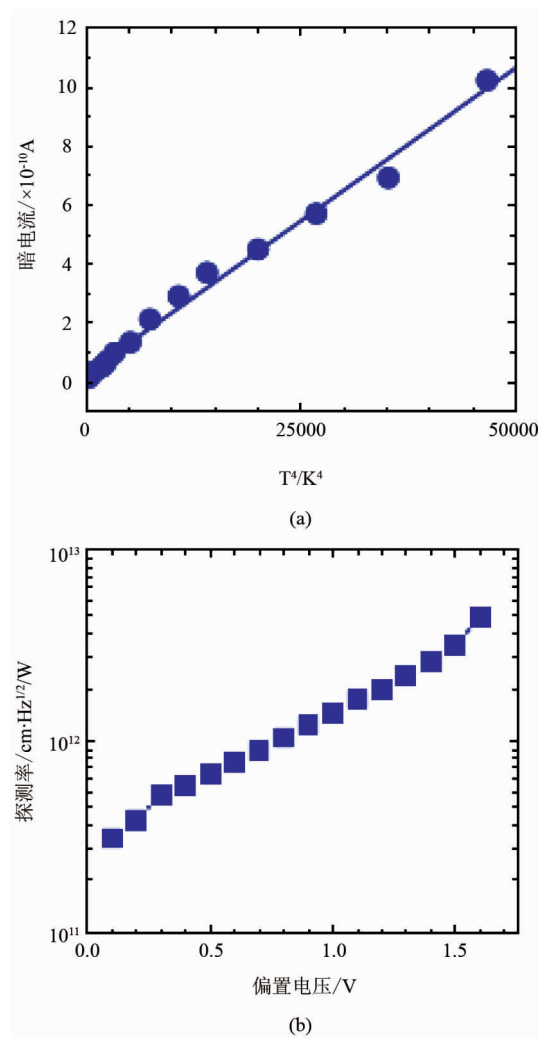


图5 (a) 暗电流与 T^4 的依赖关系; (b) 探测率随工作偏压的变化特性

Fig. 5 (a) Dark current in dependent of T^4 biased at 0.2V; (b) A plot of detectivity vs. applied bias for test BIB detectors

发产生, 为此 BIB 器件的背景限探测率可由下式估算^[16]:

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

其中, R_{bb} , I_{dark} , A 和 Δf 分别为器件的黑体响应率, 暗电流, 光敏元面积和信号带宽. 器件的探测率结果如图 5(b) 所示. 探测率随偏置电压升高而不断增大, 当达到某一偏置电压点(1.7 V)时, 暗电流的急剧增大, 噪声增加, 探测率开始下降. 1.6 V 处, 器件的黑体探测率约 $3.1 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$, 峰值探测率 $3.7 \times 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ (背景光子通量低于 $10^{13} \text{ ph}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$), 这与此前国际上报道的 Si:Sb BIB 探测器性能相当^[6].

3 结论

采用全外延方案制备了具有高外延质量的 Si:P 阻挡杂质带薄膜. 该方案避免了离子注入制备背电极层影响器件外延薄膜质量的技术难点, 具有制造成本低和工艺相对简单的优点. 研究发现, 由于吸收层中掺杂杂质的外扩散作用和腔室污染等原因, 阻挡层不可能是理想本征的, 实际阻挡层掺杂浓度约在 10^{14} cm^{-3} 量级. 为此建议实际确定阻挡层厚度时, 应略高于器件物理模型中将阻挡层视为本征层得到的厚度, 阻挡层的具体厚度因根据实际能生长的阻挡层纯度做相应调整. 基于硅器件工艺制作了 Si:P BIB 探测器, 研究了器件的光电流响应谱和暗电流特性. 指认了叠加在光电流响应谱上的尖锐杂质峰对应阻挡层中磷原子的杂质跃迁. 研究表明, 暗电流测试时 BIB 器件对冷屏温度十分敏感, 低温下小偏压范围内暗电流源自器件对冷屏的光电响应. 器件工作温度 5 K, 偏压 1.6 V 时, 响应波段覆盖 $2.5 \mu\text{m} \sim 40 \mu\text{m}$, 峰值波长 $28.8 \mu\text{m}$, 峰值探测率 $3.7 \times 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ (背景光子通量低于 $10^{13} \text{ ph/cm}^2 \cdot \text{s}$). 器件目前最高工作温度 16 K, 高于此温度, 热激发电流占主导, 暗电流急剧上升, 噪声增大, 探测率下降. 为了进一步提高器件性能, 可考虑结合减反膜、微腔或二维光子晶体等结构增强器件吸收能力.

References

- [1] Rogalski A. Semiconductor detectors and focal plane arrays for far-infrared imaging [J]. *Opto-Electronics Review*, 2013, **21**(4): 406–426.
- [2] Liao K S, Liu X H, Huang L, et al. Blocked impurity band infrared detectors for astronomy [J]. *Sci. Sin-Phys. Mech. Astron.* (廖开升, 刘希辉, 黄亮, 等. 天文用阻挡杂质带红外探测器 中国科学: 物理学 力学 天文学), 2014, **44**(4): 360–367.
- [3] 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).
- [4] Rauter P, Fromherz T, Winnerl S, et al. Terahertz Si: B blocked-impurity-band detectors defined by nonepitaxial methods [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(26): 261104.
- [5] Zhu H, Zhang B P, Wang M, et al. Influence of high dose As ion implantation on electrical properties of high resistivity silicon [J]. *Acta Phys. Sin.* (朱贺, 张兵坡, 王森, 等. 高剂量 As 离子注入对高阻 Si 电学特性的影响, *物理学报*), 2014, **63**(13): 136803–136803.
- [6] 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.
- [7] Tang D Y, Mi Z Y. *Optoelectronic Detectors* [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Press (汤定元, 糜正瑜. *光电器件概论*. 上海: 上海科学技术文献出版社), 1989. 298–384.
- [8] Petroff M D, Stapelbroek M G. US Patent No. 4,568,960 (4 Feb. 1986), 1986, 6.
- [9] Bandaru J, Beeman J W, Haller E E. Far-infrared absorption in Sb-doped Ge epilayers near the metal—insulator transition [J]. *Applied physics letters*, 2002, **80**(19): 3536–3538.
- [10] Cardozo B L, Haller E E, Reichertz L A, et al. Far-infrared absorption in GaAs: Te liquid phase epitaxial films [J]. *Applied physics letters*, 2003, **83**(19): 3990–3992.
- [11] Chaudhuri S. Optical-transition cross sections involving impurities in semiconductors [J]. *Physical Review B*, 1982, **26**(12): 6593–6602.
- [12] Shen X C. *The Spectrum and Optical Property of Semiconductor* [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press (沈学础. *半导体光谱和光学性质*. 北京: 科学出版社), 2002. pp198–263.
- [13] Sclar N. Properties of doped silicon and germanium infrared detectors [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 1984, **9**(3): 149–257.
- [14] Aronzon B, Kovalev D Y, Kozlov A, et al. Current-voltage characteristics of Si: B blocked impurity-band structures under conditions of hopping-transport-limited photoresponse [J]. *Semiconductors*, 1998, **32**(2): 174–180.
- [15] Emeksuzyan V, Kamaev G, Feofanov G, et al. Fabrication of blocked impurity-band structures on gallium-doped silicon by plasma hydrogenation [J]. *Semiconductors*, 1997, **31**(3): 255–260.
- [16] Liu X H, Zhou X H, Li N, et al. Effects of bias and temperature on the intersubband absorption in very long wavelength GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, **115**(12): 124503.