

文章编号: 2095-4980(2018)03-0383-05

新型台面型 GaAs 基 BIB 探测器的背景电流测试与分析

尚竞成^{1,2}, 王晓东^{*2}, 王兵兵², 陈雨璐², 潘鸣²

(1.杭州电子科技大学 电子信息学院, 浙江 杭州 310018; 2.中国电子科技集团公司 第五十研究所, 上海 200331)

摘要:制备了响应在太赫兹波段的台面型砷化镓(GaAs)基阻挡杂质带(BIB)探测器,并进行了背景电流的测试分析。采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)工艺进行外延层生长,能更有效地控制吸收层的掺杂浓度,提高阻挡层的纯度。另外,搭建了 GaAs 基 BIB 探测器的低温测试系统,在 3.4 K 测试温度下,对器件施加-5~5 V 偏压,测得 300 K 背景响应电流在 10^{-2} ~ 10^{-6} A 量级。在低电流区,电流随偏压增加的速率相对较快;在高电流区,电流随偏压增加的速率变得相对平缓。且对于相同偏压绝对值,正偏压工作模式下的背景响应电流比负偏压工作模式下的背景电流高。基于测试结果,重点分析了 GaAs 基 BIB 探测器的光电输运机理。

关键词:砷化镓;阻挡杂质带探测器;外延工艺;背景响应电流;暗电流;太赫兹探测

中图分类号:TN324⁺.1

文献标志码:A

doi:10.11805/TKYDA201803.0383

Background current testing and analysis of a novel mesa-type GaAs-based BIB detector

SHANG Jingcheng^{1,2}, WANG Xiaodong^{*2}, WANG Bingbing², CHEN Yulu², PAN Ming²

(1.College of Electronic Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang 310018, China;

2.The 50th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 200331, China)

Abstract: Novel mesa-type GaAs-based Blocked-Impurity-Band(BIB) detectors that can respond to the terahertz frequency have been fabricated. The key fabrication technology and the device structure are introduced in detail. Metal-Organic Chemical Vapor Deposition(MOCVD) is utilized to grow the absorption layer and the barrier layer. Low temperature testing system has been constructed and the characteristics of background response current have been investigated. At a test temperature of 3.4 K, after applying voltages scanning from -5 V to 5 V to the device, the response current has magnitude from 10^{-2} A to 10^{-6} A under 300 K background environment. In low current region, the slope of the current is relatively large. In high current area, however, the slope of the current becomes relatively small. According to the testing results, the photoelectric transport mechanisms of GaAs-based BIB detector are analyzed.

Keywords: GaAs; Blocked-Impurity-Band detector; epitaxial process; background current; dark current; terahertz detection

阻挡杂质带(BIB)探测器是太赫兹探测器^[1-4]中的重要一员,具有覆盖波段宽、灵敏度高、暗电流低等优点。与碲镉汞焦平面阵列器件^[5-6]相比,BIB探测器的优势在于其光谱响应范围可以从远红外波段扩展到太赫兹波段。另外,传统光电导受制于暗电流,不能通过提高吸收层掺杂浓度的方式来提高光电导的吸收系数;而BIB探测器却很好地解决了这一矛盾,这是因为BIB探测器在吸收层上通过外延技术生长了一层很薄的高纯阻挡层,且其中掺杂浓度远低于吸收层,使得杂质能带在阻挡层处不连续,从而有效降低了暗电流。BIB探测器原型首先是由Prtroff和Stapelbroek在Rockwell国际科学中心提出的^[7]。随着器件结构和材料研究的进步,BIB探测器的敏感波段已经从红外波段扩展到太赫兹波段,探测范围可以覆盖到1~15 THz^[8-9]。目前,广泛应用于空间探测和成像是Si基BIB探测器,其中硅掺砷(Si:As)覆盖波段在5~20 μm ^[10],硅掺锑(Si:Sb)覆盖波段在20~40 μm ^[11]。此

收稿日期: 2017-07-03; 修回日期: 2017-09-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61404120)

*通信作者: 王晓东 email:wxd06296@163.com

外, Ge 基 BIB 探测器的覆盖波段在 70~200 μm , 其截止波长远超过 Si 基探测器^[12-13]。GaAs 基 BIB 探测器可进一步延伸截止波段至 300 μm 以上^[14], 这使其在太赫兹探测中具有更广泛的应用前景。本文介绍的 GaAs 基台面型 BIB 是相对于平面型 BIB 而言, 平面型 BIB 的吸收层是通过离子注入实现的, 掺杂浓度不均匀且掺杂深度太浅是其主要缺陷, 而台面型 BIB 的吸收层是通过外延生长技术获取, 可以很好地控制掺杂浓度和深度, 因此台面型 BIB 在太赫兹探测方面具有更好的应用前景。

本文首先介绍了一种新型的台面型 GaAs 基 BIB 太赫兹探测器的制备方法。材料生长采用金属有机化合物气相淀积(MOCVD)技术, 在高导 GaAs 基片上外延生长吸收层和阻挡层。在电极制备中, 对 GaAs 深刻蚀、电子束蒸发等技术进行了深入研究。最后, 对器件进行了背景响应电流测试, 并对结果进行了分析。

1 器件结构与制备

研究采用正照式 GaAs 基台面型 BIB 结构, 如图 1 所示, 从下向上依次由高导 GaAs 衬底、太赫兹吸收层、阻挡层和金属电极层 4 层组成。高导 GaAs 衬底主要是掺杂 Si 离子, 掺杂浓度为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 厚度约为 450 μm ; 太赫兹吸收层掺杂 Te 离子, 太赫兹辐射主要是在这一层被吸收, 进而激发杂质带电子到导带形成光生载流子, 光生载流子在外加电场作用下形成电流信号。吸收层的掺杂浓度和厚度是影响太赫兹辐射吸收的 2 个关键因素, 研究中对这 2 个关键因素进行了细致优化。阻挡层在外延生长过程中非故意掺杂了 Te 离子, 掺杂浓度的理论设计值为 10^{13} cm^{-3} 量级, 比吸收层掺杂浓度(10^{15} cm^{-3})低 2 个数量级, 正是由于电极层和吸收层之间阻挡层的存在, GaAs 基 BIB 探测器才能有效降低暗电流。制备过程中, 采用 Si 离子注入工艺形成重掺杂电极层; 采用感应耦合等离子刻蚀工艺对砷化镓进行刻蚀; 采用电子束蒸发工艺及后续剥离工艺形成正负电极。如图 2 所示, 蒸镀的电极结构为 AuGe-Ni-Au-Ni-Au, 厚度分别为 50 nm-30 nm-150 nm-20 nm-200 nm。

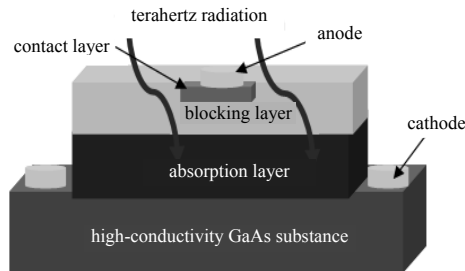


Fig.1 Structural diagram of the mesa-type GaAs-based BIB detector

图 1 台面型 GaAs 基 BIB 结构图

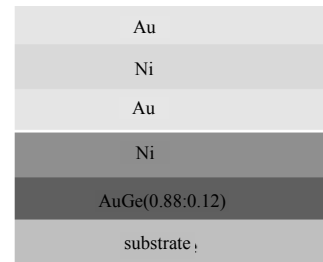


Fig.2 Electrodes (anode and cathode) structure

图 2 欧姆电极结构

电极制备工艺流程图如图 3 所示: 1) 基片清洗; 2) 蒸镀光刻标记; 3) 离子注入; 4) GaAs 深刻蚀; 5) 蒸镀正负电极; 6) 封装。流程中, 在步骤 3)离子注入和步骤 5)蒸镀电极之后要进行高温退火, 以激活注入离子并修复注入损伤, 以便为欧姆电极制作创造条件。

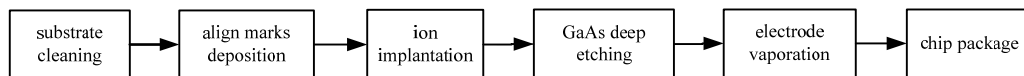


Fig.3 Flow chart of preparation process

图 3 制备工艺流程图

2 测试分析

背景响应电流测试系统示意图如图 4 所示, 它主要由液氮制冷设备、Keithley 238 电流电压输出源、温控设备、低温保持器、高密度聚乙烯滤波片、杜瓦组成。采用该系统分别对面积 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ (D1) 和 $750 \mu\text{m} \times 750 \mu\text{m}$ (D2) 的光敏元进行 300 K 背景响应电流测试。测得背景响应电流的伏安特性曲线如图 5 所示。对于 GaAs 基 BIB 探测器, 由于吸收层掺杂浓度达到 10^{15} cm^{-3} 量级, 常温下杂质带电子将全部激发到导带, 无法对入射的太赫兹辐射产生响应, 因此需要将探测器温度降到 4 K 以下, 大部分载流子在杂质带发生冻析后, 探测器才能正常工作。首先, 对杜瓦进行抽真空直至内部压强低于

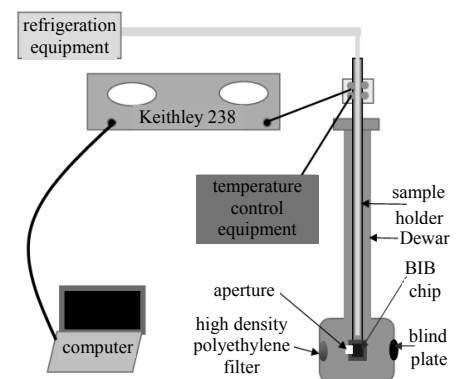


Fig.4 Diagram of background current testing system

图 4 背景电流测试系统示意图

5×10^{-4} Pa, 然后通过液氮制冷设备对杜瓦进行降温。温控设备实时监控低温保持器的温度。通过 Keithley 238 对 GaAs 基 BIB 探测器施加 $-5 \sim 5$ V 的偏压, 采用控制软件扫描测试偏压, 测量并采集不同偏压下探测器对 300 K 背景的背景响应电流值。为确保进入杜瓦的背景辐射在太赫兹波段, 在杜瓦窗口处放置一个 3 mm 厚的高密度聚乙烯滤波片。由图 5 可知, 对于不同的光敏元面积, 背景响应电流随光敏元面积的增大而增大。具体地, 在对数坐标系下, D1 的响应电流比 D2 的响应电流大一个数量级。将背景响应电流与光敏元面积相除可得到背景响应电流密度, 如图 6 所示, 探测器 2 个光敏元的电流密度曲线基本重合, 由此可以推断制备的 GaAs 基 BIB 探测器光敏元的均匀性良好。

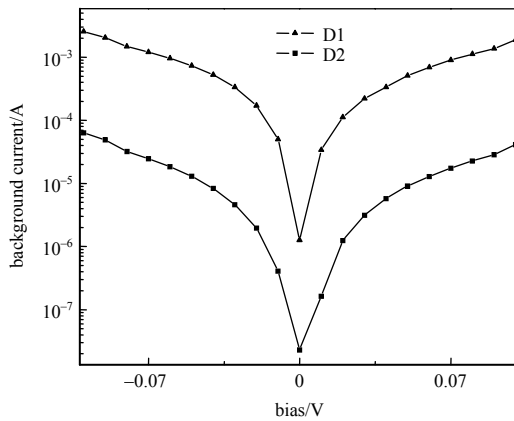


Fig.5 $I-U$ characteristics curves of background current
图 5 光敏元 D1 和 D2 的背景电流伏安特性

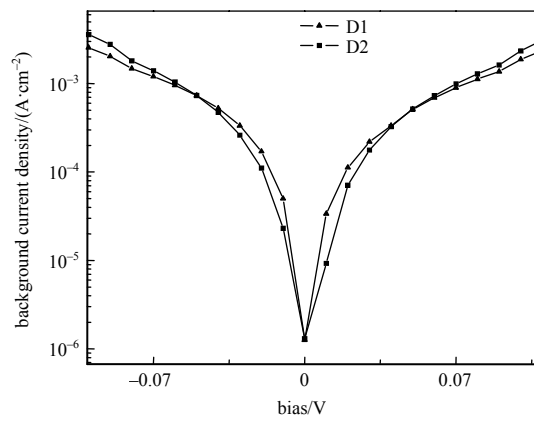


Fig.6 Background current density as a function of bias
图 6 光敏元 D1 和 D2 的背景电流密度

背景电流(即背景响应电流)是指在 3.5 K 温度下, 采用恒流源测量单元 BIB 探测器在 300 K 室温背景辐射下的电流响应。可用于衡量 GaAs 基 BIB 探测器的响应能力。在低温、正偏压及 300 K 背景辐照下, 探测器背景电流的伏安特性曲线如图 7 所示。对响应电流取以 10 为底的对数, 然后将对数处理的结果做线性拟合, 如图 8 所示。由图可知: 1) 在 $0 \sim 0.1$ V 范围内的低偏压区, $\lg(I_{BG})$ 随偏压的增大而增加, 拟合直线的斜率为 28.34, 如拟合公式(1)所示, 这是因为在低偏压区, GaAs 基 BIB 探测器背景电流以产生复合电流和漂移扩散电流为主导; 2) 偏压在 $0.1 \sim 0.2$ V 范围内的过渡区, 拟合直线的斜率逐渐减小, 当偏压增加至 0.2 V, 斜率基本达到极小值 0.88, 如拟合公式(2)所示; 3) 在 $0.2 \sim 0.7$ V 的高偏压区, 拟合直线的斜率保持极小值不变。如图 9 所示, 对背景电流在对数坐标系下进行非线性拟合, 如拟合公式(3)所示, 类似地, 偏压在 $0 \sim 0.1$ V 范围内, 电流随偏压的增大迅速上升, 随偏压继续增大, 背景响应电流上升速度趋于平缓。

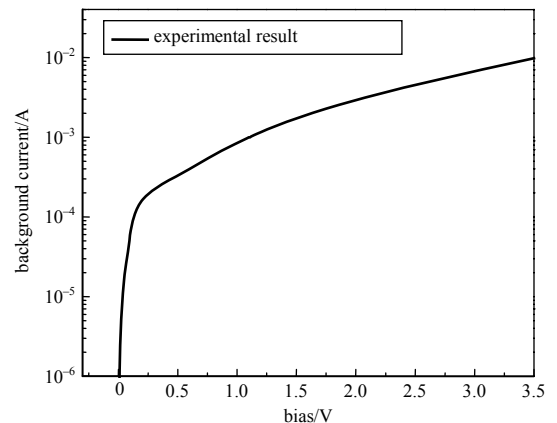


Fig.7 Background current as a function of positive bias under low temperature, and 300 K background radiation
图 7 低温、正偏压及 300 K 背景辐照下探测器背景电流的伏安特性曲线

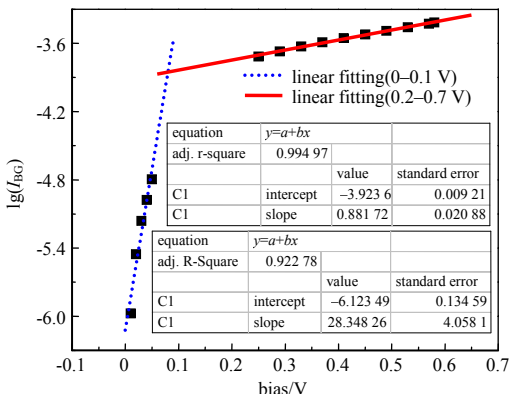


Fig.8 Linear fitting result of $\lg(I_{BG})$ as a function of bias
图 8 背景响应电流取 10 为底的对数后的线性拟合结果

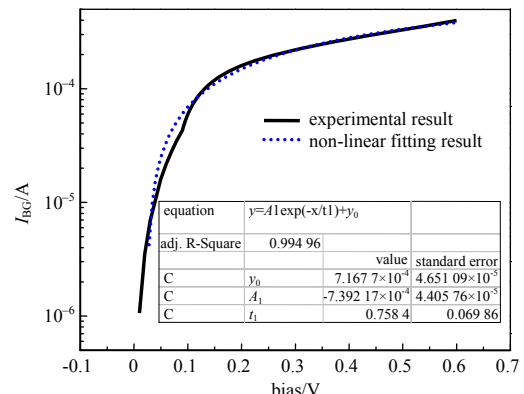


Fig.9 Non-linear fitting result of $I_{BG}(u)$ in the log scale
图 9 背景响应电流在对数坐标下的非线性拟合结果

$$\lg(I_{BG(0-0.1V)}) = -6.12 + 28.34u \tag{1}$$

$$\lg(I_{BG(0.2-0.7V)}) = -3.92 + 0.88u \tag{2}$$

式中： I_{BG} 为探测器背景响应电流； u 为施加的外部偏压。

$$I_{BG} = -0.00074 \exp(-u / 0.7584) + 0.00071 \tag{3}$$

线性坐标下背景电流的伏安特性曲线如图 10 所示，由图可知，在 300 K 背景辐照下，随着偏压增加，产生的背景响应电流可达 10^{-2} A 数量级，远大于暗电流。此外，对于相同偏压绝对值，正偏压下的背景响应电流大于负偏压下的背景电流。为解释该物理效应，研究了 GaAs 基 BIB 探测器的能带结构图，其中正偏压工作模式下的能带结构如图 11(a)所示。由图 11(a)可知，在吸收层内部分区域电离施主电荷 D^+ 被耗尽，形成耗尽区，该区域内由于电离受主 A^- 的存在表现出负电性。在外加辐射下，杂质带 E_i 中的束缚电子被激发到导带，形成光生载流子(包括：导带上的光生电子和杂质带上的光生空位)。由于导带 E_c 在整个吸收层与阻挡层所在的区域内都是连续的，激发的光生载流子可以在电场加速下，迅速被电极收集，从而形成信号电流。此外，由图 11(a) 还可知，吸收层内部分区域为中性区，该区域内导带无任何弯曲，由公式(4)的泊松方程可知，该区域内的电场强度接近 0，被激发电子很容易被 D^+ 电荷俘获，因此无法产生信号电流。综上，背景响应电流的大小主要取决于耗尽区宽度，由泊松方程(4)可得耗尽区宽度值，如公式(5)所示。GaAs 基 BIB 探测器在负偏压工作模式下的能带结构如图 11(b)所示，由图 11(b)可知，较薄的阻挡层分担了大部分外加偏压，使得施加到吸收层的外加偏压相对很小，从而导致负偏压工作模式下的耗尽区宽度小于正偏压工作模式下的情况。因此，正偏压工作模式下的背景响应电流大于负偏压工作模式下的背景电流。

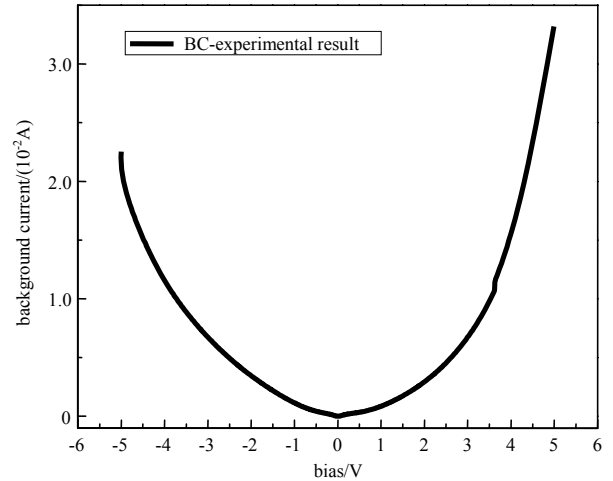


Fig.10 Background current as a function of bias in the linear scale
图 10 线性坐标下背景响应电流的伏安特性曲线

电场强度与能带之间的关系函数为：

$$\xi = \frac{1}{qN_A} \frac{dE_c}{dx} = \frac{1}{qN_A} \frac{dE_v}{dx} = \frac{1}{qN_A} \frac{dE_i}{dx} \tag{4}$$

耗尽层宽度函数为：

$$W = \sqrt{[2\varepsilon\varepsilon_0 u / eN_A] + b^2} - b \tag{5}$$

式中： ξ 为电场强度； E_c 为导带； E_v 为价带； E_i 为杂质带； ε 为相对介电常数； ε_0 为自由空间介电常数； e 为电子电荷； N_A 为受主浓度； b 为阻挡层厚度。

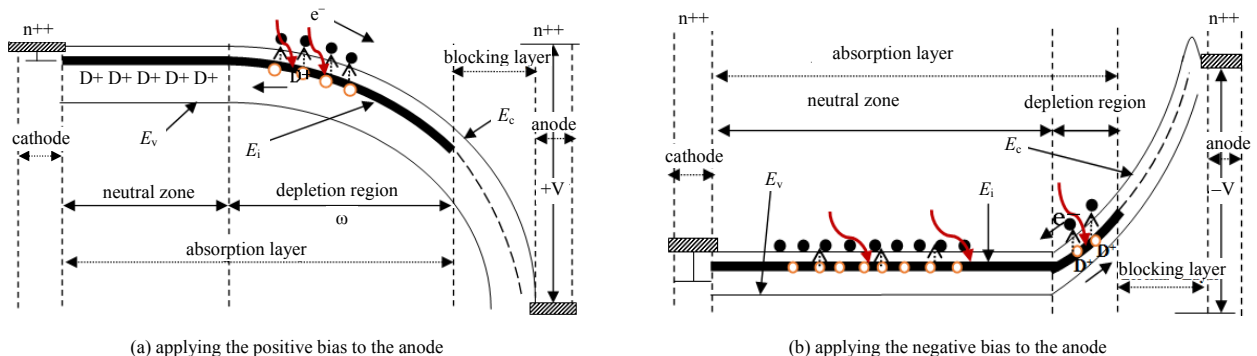


Fig.11 Energy-band diagrams of a BIB structure
图 11 正负偏压工作模式下 BIB 结构的能带图

3 结论

本文介绍了台面型 GaAs 基 BIB 探测器的结构和制备工艺，并对不同光敏元面积的 GaAs 基 BIB 探测器进行了背景电流测试。在 300 K 室温背景辐射下，背景响应电流在 10^{-2} 到 10^{-6} 量级。在低电流区，电流随偏压增加

的速率相对较快;在高电流区,电流随偏压增加的速率变得相对平缓。而且对于相同偏压绝对值,正偏压工作模式下的背景响应电流比负偏压工作模式下的背景电流高。为了进一步提高器件性能,需要进一步改善 GaAs 基 BIB 结构的外延工艺。

参考文献:

- [1] HU W D,WANG L,CHEN X S,et al. Room-temperature plasmonic resonant absorption for grating-gate GaN HEMTs in far infrared terahertz domain[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2013,45(7):713-720.
- [2] GUO N,HU W D,CHEN X S,et al. Enhanced plasmonic resonant excitation in a grating gated field-effect transistor with supplemental gates[J]. *Optics Express*, 2013,21(2):1606-1614.
- [3] LI W,HUANG Z,WANG J,et al. Thermal crosstalk simulation and measurement of linear terahertz detector arrays[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015(73):73-77.
- [4] FRANKE C,WALTHER M,HELM M,et al. Two-photon quantum well infrared photodetectors below 6 THz[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014(70):30-33.
- [5] QIU W C,HU W D. Laser beam induced current microscopy and photocurrent mapping for junction characterization of infrared photodetectors[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015,58(2):1-13.
- [6] HU W D,CHEN X S,YE Z H,et al. Dependence of ion-implant-induced LBIC novel characteristic on excitation intensity for long-wavelength HgCdTe-based photovoltaic infrared detector pixel arrays[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013,19(5):1-7.
- [7] PETROFF M D,STAPELBROEK M G. Blocked impurity band detectors: US4568960[P]. 1986-02-04.
- [8] WANG X,WANG B,HOU L,et al. Design consideration of GaAs-based blocked-impurity-band detector with the absorbing layer formed by ion implantation[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2015,47(6):1347-1355.
- [9] 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):143501-143501-5.
- [10] ANDO K J,HOFFMAN A W,LOVE P J,et al. Development of Si:as impurity band conduction(IBC) detectors for mid-infrared applications[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2003(5074):648-657.
- [11] TEZCAN D S,MUNCK K D,MERKEN P,et al. Development of a Si:as blocked impurity band detector for far IR detection[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2007,6660:66600R-66600R-12.
- [12] HAEGEL N M. BIB detector development for the far infrared:from Ge to GaAs[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2003(4999):182-194.
- [13] HANAOKA M,KANEDA H,OYABU S,et al. Development of blocked-impurity-band-type Ge detectors fabricated with the surface-activated wafer bonding method for far-infrared astronomy[J]. *Journal of Low Temperature Physics*, 2016,184(1):225-230.
- [14] REICHERTZ L A,BEEMAN J W,CARDOZO B L,et al. Development of a GaAs-based BIB detector for sub-mm wavelengths[C]// *Millimeter and Submillimeter Detectors and Instrumentation for Astronomy III*. [S.l.]:SPIE, 2006(6275):62751S-1-62751S-8.

作者简介:



尚竞成(1990-),男,山东省莱芜市人,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹探测及工艺技术.email:990179158@qq.com.

王晓东(1986-),男,上海市人,博士,高级工程师,主要研究方向为太赫兹及红外探测技术.

王兵兵(1986-),男,上海市人,工程师,主要研究方向为探测芯片工艺技术.

陈雨璐(1990-),女,上海市人,博士,工程师,主要研究方向为太赫兹及红外探测技术.

潘 鸣(1958-),男,上海市人,博士,研究员,主要研究方向为太赫兹及红外探测系统.