

# 硅基阻挡杂质带太赫兹探测器及其成像研究

王兵兵<sup>1,2,3</sup>, 王晓东<sup>3</sup>, 陈雨璐<sup>3</sup>, 张传胜<sup>3</sup>, 臧元章<sup>3</sup>, 潘 鸣<sup>3</sup>, 曹俊诚<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所中国科学院太赫兹固态技术重点实验室, 上海 200050;  
2. 中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049; 3. 中国电子科技集团公司第五十研究所, 上海 200331)

**摘 要:** 太赫兹探测及成像技术是推动太赫兹科学技术发展的基础和关键. 为了实现高灵敏太赫兹探测及成像, 设计了一种台面型硅基阻挡杂质带太赫兹探测器, 详细介绍了其结构及探测机理, 描述了其制备工艺流程, 并搭建了黑体响应测试系统. 结果表明, 4.2K 温度条件下, 3.8V 工作偏压时, 探测器峰值响应率可达 55A/W, 响应频段覆盖 6.7~60THz. 此外, 搭建了一套二维扫描成像系统, 实现了高分辨率被动成像. 实验结果表明, 成像系统空间分辨率可达 400 $\mu\text{m}$ 、温度分辨率约为 7.5mK.

**关键词:** 阻挡杂质带; 太赫兹探测器; 峰值响应率; 扫描成像; 分辨率

**中图分类号:** O471.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2021)09-1867-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20190791

## Study on the Silicon Based Blocked-Impurity-Band Terahertz Detector and Its Application for Imaging

WANG Bing-bing<sup>1,2,3</sup>, WANG Xiao-dong<sup>3</sup>, CHEN Yu-lu<sup>3</sup>, ZHANG Chuan-sheng<sup>3</sup>,  
ZANG Yuan-zang<sup>3</sup>, PAN Ming<sup>3</sup>, CAO Jun-cheng<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Terahertz Solid State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Shanghai 200050, China;  
2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. The 50th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 200331, China)

**Abstract:** Terahertz detection and imaging technology are the foundation and key to promote terahertz technology development. In order to realize high sensitivity terahertz detection and imaging, a mesa-type silicon-based blocked-impurity-band (BIB) terahertz detector is designed. The structure and detection mechanism of the detector are introduced in detail. The preparation processes are presented briefly. A series of its photoelectric performances are investigated. A blackbody responsivity test system is built. The results show that at 4.2K temperature and 3.8V bias, its peak responsivity reaches 55A/W, and the response spectrum covers the frequency range from 6.7~60THz. In addition, a scan imaging system is set, and the high-resolution passive imaging is achieved. The imaging result shows that the spatial resolution and the temperature resolution of the imaging system can reach about 400 $\mu\text{m}$  and 7.5mK, respectively.

**Key words:** blocked impurity band; terahertz detector; peak responsivity; scanning imaging; resolution

## 1 引言

太赫兹探测技术与成像应用是太赫兹科学技术研究的焦点内容之一, 在诸如天文观测、空间遥感、无损检测、安全检查等领域具有巨大应用潜力<sup>[1-3]</sup>. 目前, 主流太赫兹探测器可分为相干探测器和非相干探测器. 相干探测器使用外差探测方式, 可以同时测量信号的幅度和相位, 将探测信号下变频转换到几个 GHz 范围

内, 然后使用低噪放大器进行放大并检测, 其性能受放大器性能限制. 非相干探测器, 也可称为直接探测器, 只对信号幅度进行测量, 通常测量范围很宽. 太赫兹探测器也可分为制冷型和非制冷型两大类. 其中, 非制冷型太赫兹探测器主要包括肖特基二极管 (Schottky Barrier Diode, SBD)<sup>[4,5]</sup>、高莱探测器 (Golay Cell)、场效应晶体管 (Field Effect Transistor, FET)<sup>[6,7]</sup> 等, 其无需制

收稿日期: 2019-07-10; 修回日期: 2021-03-03; 责任编辑: 梅志强

基金项目: 国家自然科学基金 (No.61705201, No.61927813, No.61975225); 国家重点研发计划 (No.2017YFA0701005); 上海市科学技术委员会 (No.18590780100)

冷、使用方便,但灵敏度不够高.制冷型太赫兹探测器主要有测辐射热计(bolometer)<sup>[8]</sup>、太赫兹量子阱探测器(Quantum Well Photodetector, QWP)<sup>[9]</sup>、超导-绝缘体-超导体(Superconductor-Insulator-Superconductor, SIS)混频器、阻挡杂质带(Blocked-Impurity-Band, BIB)探测器<sup>[10]</sup>等.制冷型太赫兹探测器灵敏度较高,易大规模集成,需要严格的低温条件.

Petroff 和 Stapelbroek 构想出阻挡杂质带结构,并制备出首个硅基阻挡杂质带探测器<sup>[11]</sup>.阻挡杂质带探测器一般由衬底、吸收层和阻挡层构成,工作在 20K 以下的低温环境中,具有灵敏度高、暗电流低、响应谱段宽、抗辐射性能强、阵列规模大等优点,在天文观测、大气监测、空间遥感等领域具有重要应用<sup>[12-16]</sup>,并已成功搭载宇宙背景探险者(Cosmic Background Explorer, COBE)<sup>[17]</sup>、红外空间天文台(Infrared Space Observatory, ISO)<sup>[18]</sup>、斯皮策空间望远镜(Spitzer Space Telescope, SST)<sup>[19]</sup>等系列天文卫星.阻挡杂质带结构是在非本征光电导结构上增加了一层本征阻挡层所形成的.与本征光电导相比,非本征光电导可通过调整所掺杂质的种类和浓度来调节探测器响应谱段、吸收率及响应率,通过掺入适当的势能级杂质,可将响应波长拓展至太赫兹波段.随着掺杂浓度的提高,杂质原子相互间越靠近,导致杂质原子之间波函数发生交叠,半导体禁带中孤立的杂质能级逐渐扩展成了杂质能带,杂质能带中的电子通过在杂质原子之间的共有化运动参与导电<sup>[20]</sup>.因此,非本征光电导也面临着暗电流及噪声过大的问题,限制了器件响应率及灵敏度的进一步提高.阻挡杂质带结构能够有效地解决这一问题.在重掺杂的太赫兹吸收层上设置一薄层本征阻挡层,因本征阻挡层中无杂质能带,因此阻断了杂质带导电对暗电流的贡献.这样,阻挡杂质带器件吸收层的掺杂浓度就可以高于普通非本征光电导器件,同时又能保持较低的暗电流,从而使其具有更高的响应率和探测灵敏度.在国内,硅基阻挡杂质带太赫兹探测器研究还处于起步阶段,无论是在外延材料、制备工艺以及成像应用等方面,仍待进一步研究.

本文采用化学气相沉积(Chemical Vapor Deposition, CVD)工艺生长台面型 BIB 器件结构,相对于通过离子注入形成的平面型结构(注入深度只能达到 2 $\mu\text{m}$ 以内),该结构具有足够的吸收层厚度(外延厚度达到 45 $\mu\text{m}$ )可达到对太赫兹辐射的完全吸收,同时避免了离子注入造成的晶格损伤,有利于降低暗电流及器件噪声.理想阻挡层是本征的,一般情况下厚度介于 3~6 $\mu\text{m}$ 之间<sup>[13]</sup>,但在材料外延生长过程中,往往不可避免的引入了其它有害杂质,导致阻挡层效果下降.为了进一步抑制暗电流,我们设置了厚度更大的阻挡层(阻

层厚度达到 10 $\mu\text{m}$ ),该结构具有更高的响应率以及更低的噪声.此外,采用工艺成熟的 Si 材料,通过掺杂磷元素,可实现 10~7.5THz 范围内辐射的高灵敏探测.相对于 Ge 及 GaAs 材料体系 BIB 探测器,其响应更集中在高频太赫兹波段,更有利于高分辨探测成像.本文设计及制备了高性能的单元探测器,并搭建了二维扫描系统,实现了在地面实验室环境下电烙铁头的高分辨被动成像,空间分辨率达到 400 $\mu\text{m}$ ,温度分辨率为 7.5mK.

## 2 硅掺磷阻挡杂质带太赫兹探测器

阻挡杂质带探测器能带结构如图 1 所示.入射的 THz 辐射穿过阻挡层被吸收层吸收,杂质带中的电子吸收辐射跃迁至导带形成光生载流子,在外加偏压作用下,通过弯曲的导带被正电极收集,实现光信号到电信号的转化.本文设计了一种硅掺磷阻挡杂质带太赫兹探测器,器件部分建模参数如表 1 所示.

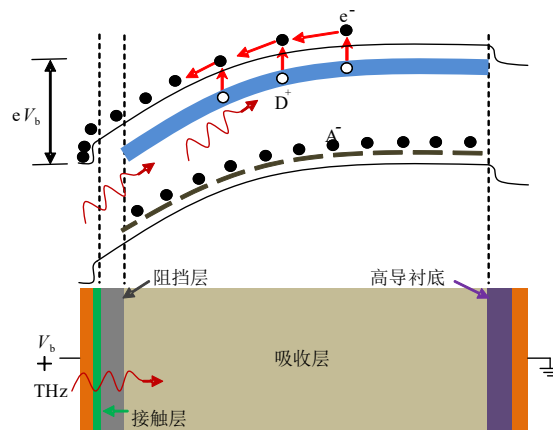


图 1 N型阻挡杂质带太赫兹探测器在外加偏压下能带结构示意图

表 1 硅掺磷阻挡杂质带太赫兹探测器建模参数表

| 参量            | 参数值                                     |
|---------------|---|
| 吸收层厚度         | 45 $\mu\text{m}$                        |
| 吸收层 P 掺杂浓度    | $\sim 10^{16}\text{cm}^{-3}$            |
| 吸收层受主杂质浓度     | $< 1 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$      |
| 阻挡层厚度         | 10 $\mu\text{m}$                        |
| 阻挡层施主杂质浓度     | $< 1 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$      |
| 阻挡层受主杂质浓度     | $< 1 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$      |
| 阻挡层与吸收层间过渡区厚度 | $< 2\mu\text{m}$                        |
| 光敏元大小         | 400 $\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$ |
| 工作温度          | 4.2K                                    |
| 工作偏压          | -4V ~ 4V                                |

硅掺磷阻挡杂质带太赫兹探测器结构设计如图 2 所示.在 $\langle 100 \rangle$ 晶向的高导 Si 衬底上依次设置了重掺杂的硅掺磷吸收层、本征 Si 阻挡层、电极接触层及钝化

层,其中正电极设置在接触层上,负电极设置在高导Si衬底上.

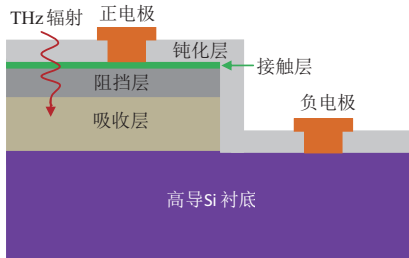


图2 硅掺磷阻挡杂质带太赫兹探测器结构示意图

硅掺磷阻挡杂质带太赫兹探测器制备工艺流程如图3所示. 在高导Si衬底上,首先通过化学气相沉积依次外延生长硅掺磷吸收层及高纯Si阻挡层;接着通过P离子注入及快速热退火形成电极接触层;然后深硅刻蚀至高导硅衬底形成台面结构;通过等离子体增强化学气相沉积(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)工艺沉积SiO<sub>2</sub>钝化层;通过反应离子刻蚀(Reactive Ion Etching, RIE)工艺开正、负电极孔;然后通过电子束蒸发工艺生长正、负电极,并通过电极退火形成良好欧姆接触;再通过电子束蒸发工艺加厚电极;最后通过划片、贴片、金丝球焊等工艺进行器件封装,完成器件制备.

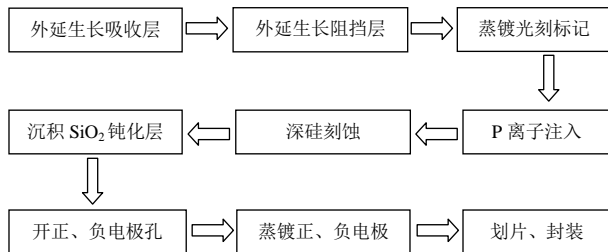


图3 硅掺磷阻挡杂质带太赫兹探测器制备流程图

为了获得器件光电性能参数,利用低温恒温器、Keithley2635B 数字源表、SR570 低噪电流放大器、SR830 锁相放大器、标准黑体、斩波器、示波器、Vertex80V 傅里叶光谱仪等仪器设备搭建了低温测试系统,对研制的硅掺磷阻挡杂质带太赫兹探测器进行了暗电流、黑体响应率、光谱响应等光电性能测试.

其中,黑体响应率测试系统如图4所示. 测试时将硅掺磷阻挡杂质带太赫兹探测器固定在低温保持器的样品架上,通过液氮制冷系统将探测器降到4.2K的工作温度,SR570低噪电流放大器施加工作偏压并将响应电流放大成电压信号输出,并由SR830锁相放大器读出.

黑体响应率 $R_{bb}$ 计算公式为,

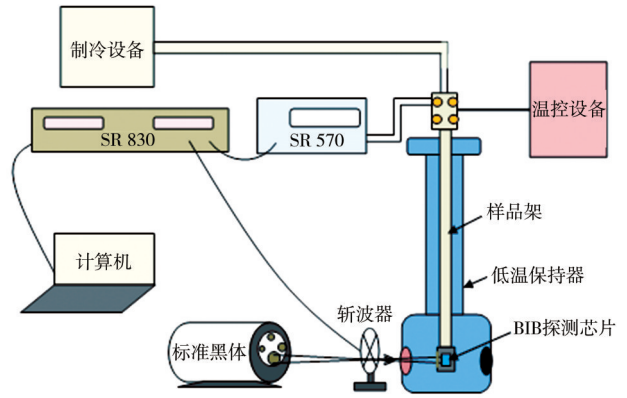


图4 黑体响应率测试系统示意图

$$R_{bb} = \frac{I_{PC}}{\frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4) \times A_b \times A_d}{2\sqrt{2} \pi L^2}} \quad (1)$$

其中 $I_{PC}$ 为响应电流, $\sigma$ 为斯特潘-波尔兹曼常数, $\pi$ 为圆周率, $A_b$ 为黑体辐射面积, $A_d$ 为器件光敏面积, $L$ 为器件与黑体距离, $T_2$ 为黑体温度, $T_1$ 为实验室温度. 测量时,黑体温度设置为800K,利用如图4所示测试系统,测得 $I_{PC}$ 并带入式(1),可计算得到 $R_{bb}$ .

峰值响应率 $R(\lambda_p)$ 和光谱 $G$ 因子可分别表达为,

$$R(\lambda_p) = \frac{R_{bb}}{G} \quad (2)$$

$$G = \frac{R_{bb}}{R(\lambda_p)} = \frac{\int_0^\infty R_i'(\lambda) [M(\lambda, T_2) - M(\lambda, T_1)] d\lambda}{\sigma(T_2^4 - T_1^4)} \quad (3)$$

其中, $R_i'(\lambda)$ 为归一化相对响应光谱, $R(\lambda_p)$ 为峰值响应率, $M(\lambda, T)$ 是温度为 $T$ 的黑体在波长 $\lambda$ 附近的辐出度,具有如下形式:

$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad (4)$$

式中, $h$ 为普朗克常数, $c$ 为光速, $k$ 为玻尔兹曼常数. 利用Vertex 80V 傅里叶光谱仪测得硅掺磷阻挡杂质带太赫兹探测器归一化相对响应光谱 $R_i'(\lambda)$ ,带入式(2)~(4),计算得到峰值响应率 $R(\lambda_p)$ 随偏压变化关系如图5所示. 对于相同 $|V_b|$ 值,正偏压下的响应率高于负偏压的结果,3.8V工作偏压下,探测器峰值响应率达到55A/W.

硅掺磷阻挡杂质带太赫兹探测器归一化相对响应光谱如图6所示. 测试结果表明,探测器响应光谱覆盖5~45 $\mu\text{m}$ (6.7~60THz)范围. 峰值波长 $\lambda_p$ 位于28.6 $\mu\text{m}$ .

此外,利用Keithley 2635B 数字源表测得硅掺磷阻挡杂质带太赫兹探测器暗电流 $I_{dark}$ 如图7所示. 测试结果表明,正偏压下探测器暗电流明显低于负偏压下结果,表现出明显的暗电流抑制作用. 这种非对称性是由

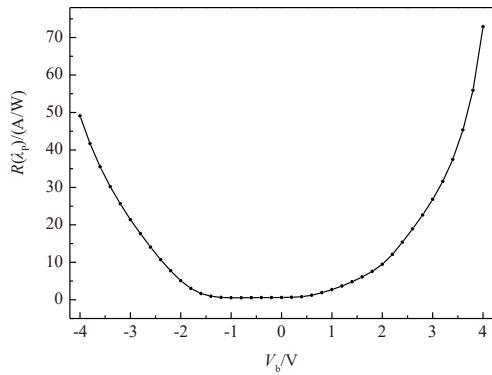


图5 硅掺磷阻挡杂质带太赫兹探测器响应率测量结果

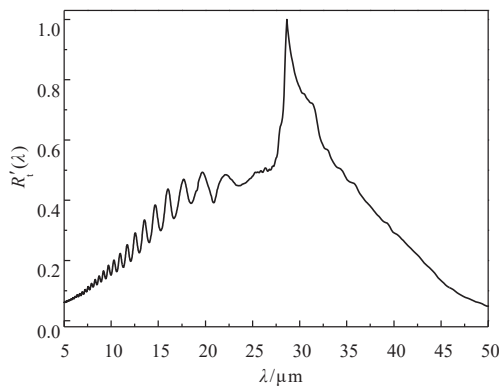


图6 硅掺磷阻挡杂质带太赫兹探测器归一化相对响应光谱

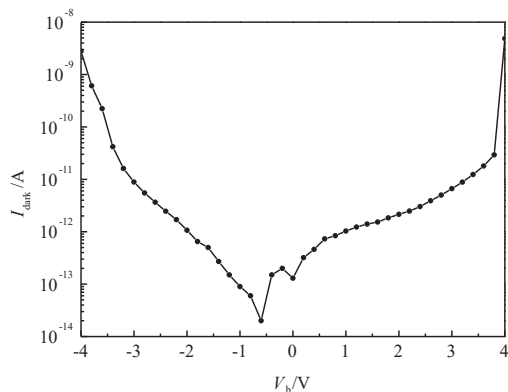


图7 硅掺磷阻挡杂质带太赫兹探测器暗电流测量结果

于器件自身结构引起的. 3.8V 偏压下, 探测器暗电流大小为  $2.9 \times 10^{-11} \text{A}$ , 当偏压超过 3.8V 时, 暗电流表现出明显击穿特性.

由于 BIB 探测器具备阻挡层结构, 有效地抑制了暗电流及噪声. 硅掺磷阻挡杂质带太赫兹探测器峰值探测率  $D^*(\lambda_p)$  可用下式来估算,

$$D^*(\lambda_p) = \frac{R(\lambda_p)}{\sqrt{2qI_{\text{dark}}\Delta f}} \sqrt{A_d\Delta f} \quad (5)$$

其中,  $q$  为电子电荷,  $\Delta f$  为测试带宽, 把  $R(\lambda_p)$  和  $I_{\text{dark}}$  带入式 (5), 可计算出  $D^*(\lambda_p)$  随偏压变化关系如图 8 所

示. 3.8V 偏压下,  $D^*(\lambda_p)$  为  $9.1 \times 10^{13} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ . 当偏压超过 3.8V 时, 由于暗电流激增, 导致  $D^*(\lambda_p)$  急剧下降.

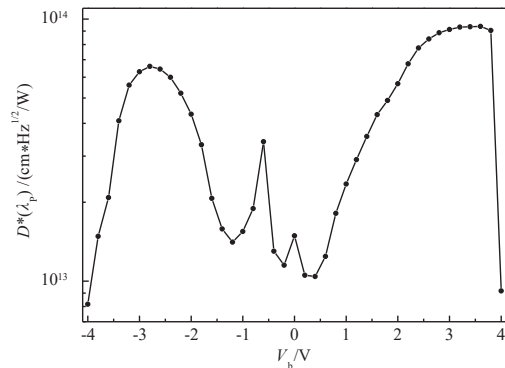


图8 硅掺磷阻挡杂质带太赫兹探测器峰值探测率  $D^*(\lambda_p)$  随偏压变化关系

### 3 成像实验

太赫兹独特的性质使得其在天文、遥感、材料、生物、化学、医学等诸多领域有着广泛的应用前景. 其中太赫兹探测成像是其相关研究领域中最为基础的一部分. 为了探究所研制的硅掺磷阻挡杂质带太赫兹探测器成像性能, 我们搭建了一套二维扫描被动成像系统, 其光路如图 9 所示, 相关参数如表 2 所示.

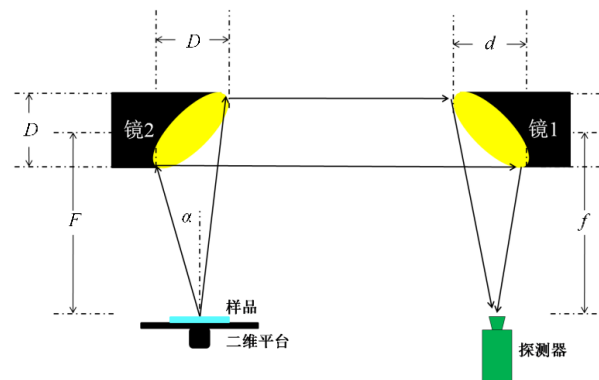


图9 二维扫描成像系统示意图

表2 扫描成像系统参数表

| 系统参量         | 参数值          |
|--------------|--------------|
| 入瞳大小 $D_s$   | 50.8mm       |
| 系统焦距 $F_s$   | 152.4mm      |
| 镜1口径 $d$     | 76.2mm       |
| 镜1焦距 $f$     | 152.4mm      |
| 镜2口径 $D$     | 50.8mm       |
| 镜2焦距 $F$     | 76.2mm       |
| 半锥角 $\alpha$ | $18.4^\circ$ |

根据瑞利判据, 光学系统的分辨率极限为衍射艾里斑半径, 大小为:

$$R = \frac{1.22\lambda}{D_s} F_s = 109.8\text{mm} \quad (6)$$

其中,  $\lambda$  为工作波长, 取  $30\mu\text{m}$ ;  $D_s$  为入瞳口径, 大小为  $50.8\text{mm}$ ;  $F_s$  为系统焦距, 大小为  $152.4\text{mm}$ . 由(6)式得到光学系统分辨率极限为  $109.8\mu\text{m}$ , 小于像元尺寸  $400\mu\text{m}$ , 光学系统空间分辨率与探测器不匹配, 受探测器尺寸限制, 因此成像系统的空间分辨率为  $400\mu\text{m}$ .

基于如图9所示的成像系统, 利用硅掺磷阻挡杂质带太赫兹探测器, 在  $4.2\text{K}$  工作温度及  $3.8\text{V}$  工作偏压下, 对烙铁头成像, 结果如图10所示. 利用红外热像仪测得烙铁头温度  $T_3$  和实验室背景温度  $T_1$  分别约为  $373.15\text{K}$  和  $298.15\text{K}$ . 用示波器观察到系统成像信噪比  $\text{SNR}$  约为  $10000$ , 因此可计算出温度分辨率约为

$$\frac{T_3 - T_1}{\text{SNR}} = \frac{373.15\text{K} - 298.15\text{K}}{10000} = 7.5\text{mK} \quad (7)$$

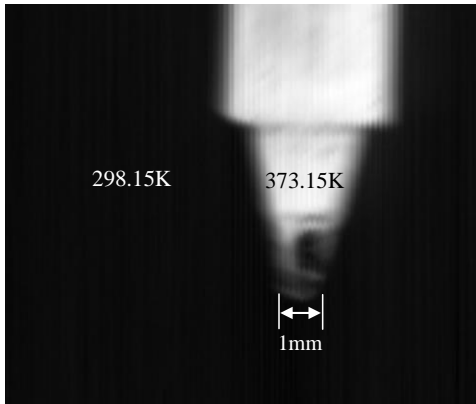


图10 373.15K烙铁头成像结果

## 4 结论

阻挡杂质带太赫兹探测器提供了一种有效的高灵敏的太赫兹探测手段. 为抑制暗电流, 本文设计了一种阻挡层厚度达到  $10\mu\text{m}$  的硅掺磷阻挡杂质带太赫兹探测器, 并通过一系列半导体加工工艺, 完成了器件制备, 实现了高灵敏太赫兹探测. 在  $4.2\text{K}$  工作温度及  $3.8\text{V}$  工作偏压下, 探测器峰值响应率  $R(\lambda_p)$  可达  $55\text{A/W}$ , 响应频段覆盖  $6.7\sim 60\text{THz}$ , 峰值探测率  $D^*(\lambda_p)$  达到  $9.1 \times 10^{13}\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ . 利用二维扫描系统, 实现了高分辨率被动成像, 空间分辨率达到  $400\mu\text{m}$ , 温度分辨率约为  $7.5\text{mK}$ , 演示验证了其良好的成像应用.

## 参考文献

- [1] Siegel P H. Terahertz technology [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 910 - 928.
- [2] 陈龙超, 范文慧. 高灵敏度低噪声太赫兹电光探测器研究[J]. 电子学报, 2012, 40(9): 1705 - 1709.

Chen L C, Fan W H. Study on high sensitivity and low noise electro-optic terahertz detector[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(9): 1705 - 1709.(in Chinese)

- [3] 廖复疆. 微型真空电子器件和太赫兹辐射源技术进展[J]. 电子学报, 2003, 31(9): 1361 - 1364.  
Liao F J. Micro-vacuum electron devices and terahertz vacuum sources[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(9): 1361 - 1364.(in Chinese)
- [4] Manohara H M, Wong E W, Schlecht E, et al. Carbon nanotube Schottky diodes using Ti-Schottky and Pt-Ohmic contacts for high frequency applications[J]. Nano Letters, 2005, 5(7): 1469 - 1474.
- [5] 姚常飞, 周明, 罗运生, 等. 基于肖特基势垒二极管的太赫兹固态倍频源和检测器研制[J]. 电子学报, 2013, 41(3): 438 - 443.  
Yao C F, Zhou M, Luo Y S, et al. Development of terahertz frequency solid state multiply sources and sensors with Schottky barrier diodes[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(3): 438 - 443.(in Chinese)
- [6] Glaab D, Boppel S, Lisauskas A, et al. Terahertz heterodyne detection with silicon field-effect transistors[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(4): 042106.
- [7] Tauk R, Teppe F, Boubanga S, et al. Plasma wave detection of terahertz radiation by silicon field effects transistors: Responsivity and noise equivalent power[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(25): 253511.
- [8] Nakagawa Y, Yoshinaga H. Characteristics of high-sensitivity Ge bolometer[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1970, 9(1): 125 - 131.
- [9] Gu L L, Guo X G, Fu Z L, et al. Optical-phonon-mediated photocurrent in terahertz quantum-well photodetectors[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(11): 111107.
- [10] Sakon I, Ikeda Y, Fujishiro N, et al. Conceptual design for the mid-infrared medium-resolution Echelle spectrometer (MIRMES) on the SPICA Mission[A]. Space Telescopes and Instrumentation 2010: Optical, Infrared, and Millimeter Wave[C]. San Diego, California, USA: SPIE, 2010. 77310Q-1 - 77310Q-10.
- [11] Petroff M D, Stapelbroek M G. Blocked impurity band detectors[S]. US Patent:4568960,1986-02-04.
- [12] Wang X D, Wang B B, Chen Y L, et al. Spectral response characteristics of novel ion-implanted planar GaAs blocked-impurity-band detectors in the terahertz domain [J]. Optical and Quantum Electronics, 2016, 48(11): 1 - 10.
- [13] 廖开升, 刘希辉, 黄亮, 等. 天文用阻挡杂质带红外探测

- 器[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44(4): 360 – 367.
- Liao K S, Liu X H, Huang L, et al. Blocked impurity band infrared detector for astronomy[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2014, 44(4): 360 – 367.(in Chinese)
- [14] Haegel N M. BIB detector development for the far infrared: From Ge to GaAs[A]. Quantum Sensing: Evolution and Revolution from Past to Future [C]. San Jose, CA, USA: SPIE, 2003. 182 – 194.
- [15] Ando K J, Hoffman A W, Love P J, et al. Development of Si: As impurity band conduction (IBC) detectors for mid-infrared applications[A]. Infrared Technology and Applications[C]. Orlando, Florida, USA: SPIE, 2003. 648 – 657.
- [16] Reichertz L A, Cardozo B L, Beeman J W, et al. First results on GaAs blocked impurity band (BIB) structures for far-infrared detector arrays[A]. Infrared Spaceborne Remote Sensing[C]. San Diego, California, USA: SPIE, 2005. 58830Q-1 – 58830Q-8.
- [17] Gulkis S, Lubin P M, Meyer S S, et al. The cosmic background explorer[J]. Scientific American, 1990, 262(1): 132 – 139.
- [18] Wolf J, Wiest L, Groezinger U, et al. Si: As blocked-impurity-band detectors for ISO's photometer[A]. Infrared Spaceborne Remote Sensing III[C]. San Diego, CA, USA: SPIE, 1995. 482 – 488.
- [19] Werner M W. The spitzer space telescope mission[J]. Advances in Space Research, 2005, 36(6): 1048 – 1049.
- [20] 刘恩科. 半导体物理学[M]. 7版. 北京: 电子工业出版社, 2016.

#### 作者简介



**王兵兵** 男, 1985年生, 安徽颍上人. 高级工程师, 主要从事太赫兹半导体器件、探测及成像应用等研究工作.  
E-mail: wbb0308201@163.com



**曹俊诚(通信作者)** 男, 1967年出生, 江西万年人. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所研究员、博士生导师, 长期从事太赫兹 (THz) 半导体器件及其通信与成像应用等研究工作.  
E-mail: jccao@mail.sim.ac.cn