

文章编号: 2095-4980(2025)01-0040-04

基于 InP/InGaAs 肖特基二极管的高灵敏太赫兹探测器

周静涛, 金智*, 苏永波, 史敬元, 丁武昌, 张大勇, 杨枫, 刘桐

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要: InP/InGaAs 肖特基二极管(SBDs)探测器因其高电子迁移率和低势垒材料特性, 具有非常高的电压响应灵敏度, 广泛用于高灵敏太赫兹波探测技术中。为进一步降低器件寄生效应, 提升其高频性能, 本文提出一种无衬底单台面 T 型结新型结构的肖特基器件, 器件的截止频率为 9.5 THz。基于新型结构的 InP/InGaAs 肖特基器件技术, 研制了 220~330 GHz、30~500 GHz、400~600 GHz 和 500~750 GHz 等多频段的太赫兹探测器模块。其中 220~330 GHz 频段太赫兹检测器模块与美国 VDI 公司的同频段检测器模块相比, 检测灵敏度等指标相近。该器件在太赫兹安检成像应用中具有很好的应用前景。

关键词: 太赫兹检测器; 肖特基二极管(SBDs); T 型结; 无衬底单台面

中图分类号: TN717

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024398

High sensitivity terahertz detectors based on the InP/InGaAs Schottky Barrier Diodes

ZHOU Jingtao, JIN Zhi*, SU Yongbo, SHI Jingyuan, DING Wuchang, ZHANG Dayong, YANG Feng, LIU Tong
(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: InP/InGaAs Schottky Barrier Diodes(SBDs) detectors, due to their high electron mobility and low barrier material characteristics, have a very high voltage response sensitivity and are widely used in highly sensitive terahertz wave detection technology. To further reduce device parasitic effects and enhance its high-frequency performance, a novel structure of substrate-free single-mesa T-junction Schottky device is proposed, with a cutoff frequency of 9.5 THz. Based on the novel structure of InP/InGaAs Schottky device technology, terahertz detector modules for multiple frequency bands such as 220~330 GHz, 30~500 GHz, 400~600 GHz, and 500~750 GHz have been developed. Compared with the detectors of the same frequency band from VDI Company in the United States, the detection sensitivity and other indicators are similar, indicating that the device has a promising application prospect in terahertz security imaging.

Keywords: terahertz detector; Schottky Barrier Diodes(SBDs); T-junction; substrate-free single-mesa

未来通信系统向着更高传输速率、更大传输容量的方向不断发展。由于毫米波和太赫兹波频段频谱资源非常丰富, 已成为下一代通信系统中最具应用前景的技术之一^[1-2]。太赫兹系统包括太赫兹波产生、传输和探测, 其中太赫兹探测是重要的一环, 无论是在太赫兹通信的收发模块前端, 还是太赫兹成像系统的接收端, 都需要太赫兹探测器高灵敏、大带宽地工作。发展比较成功的太赫兹探测器主要有以下几类: 超导-绝缘-超导器件(Superconducting Insulation Superconducting, SIS)、热电子辐射器件(Hot Electron Bolometer, HEB)、Golay-cell 器件和肖特基二极管(SBDs)。SBDs 是太赫兹探测中一类重要的基础器件, 广泛用于太赫兹探测^[3-4]、混频^[5-6]以及倍频电路^[7-8]中, 具有以下优点: a) 可工作在室温。与 SIS 和 HEB 器件相比, 省去了复杂昂贵的低温制冷系统^[9-10], 在成本上具有非常大的优势。b) 响应速度快。为多数载流子器件, 不存在载流子恢复时间的限制。与其他器件相比, 响应速率高几个数量级。c) SBD 器件基于第二代化合物半导体技术, 其标准化工艺水平近年来得到迅速发展, 目前电路的集成规模发展到相当的水平, 可实现一定规模的阵列集成。

收稿日期: 2024-08-22; 修回日期: 2024-10-10

*通信作者: 金智 email:jinzhi@ime.ac.cn

与 GaAs 和 Si 材料的肖特基二极管相比，InP/InGaAs 肖特基二极管的势垒非常低，开启电压仅 0.12 V，非常适合构建零偏置太赫兹探测电路。基于本研究团队在 InP/InGaAs 肖特基器件技术领域多年的研究成果，本文提出一种无衬底单台面 T 型结新型结构的肖特基器件。其中 220~330 GHz 频段太赫兹检测器模块与美国 VDI 公司的同频段检测器模块相比，检测灵敏度等指标相近。该器件在太赫兹安检成像中具有很好的应用前景。

1 InP/InGaAs 太赫兹肖特基器件

图 1 为 InP/InGaAs 肖特基器件的外延结构示意图，主要包括 3 层：最上层为 100 nm 的 Si 掺杂的 N 型 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ，掺杂浓度为 1×10^{17} ；中间层为 1.5 μm Si 重掺杂的 N 型 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ，掺杂浓度为 1×10^{19} ；最下层为半绝缘 InP 衬底。图 2 为平面型 InP/InGaAs 肖特基二极管空气桥结构，金属 Pt 与 N 型 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 半导体形成肖特基结。

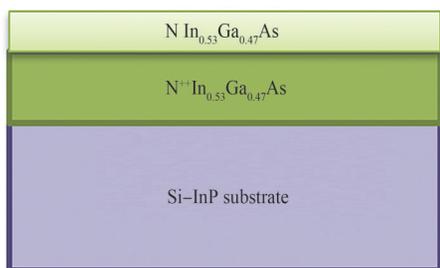


Fig.1 Diagram of the epitaxial structure of InP/InGaAs terahertz Schottky devices
图 1 InP/InGaAs 太赫兹肖特基器件外延结构图

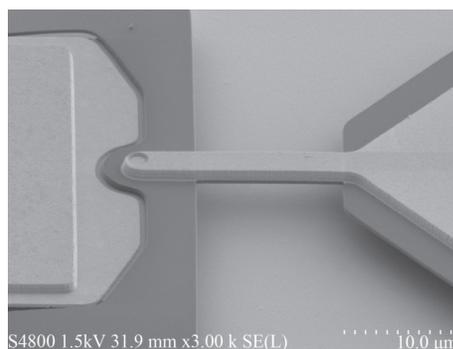


Fig.2 Diagram of InP/InGaAs terahertz Schottky device air bridge structure
图 2 InP/InGaAs 太赫兹肖特基器件空气桥结构

为进一步降低器件的高频寄生效应，本文提出了一种无衬底单台面 T 型结新型结构的肖特基器件。图 3 为 T 型肖特基结构，肖特基直径为 400 nm，顶层金属直径为 1 μm 。与传统的肖特基结相比，该结构实现了同等工艺难度下，通过结构创新，降低了器件的零偏结电容，从而提高了器件的截止频率。该结构采用 T 型栅工艺的多层光刻胶曝光技术实现。

在此基础上，利用苯并环丁烯(BCB)介质的平坦化性能以及低介电常数特性，制作了无衬底单台面 T 型结肖特基器件，如图 4 所示。其中图 4(a)为该器件的结构示意图；图 4(b)为该器件的显微镜照片；图 4(c)为该器件的扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscopy, SEM)照片。从图中可以看到，InP 衬底已被完全去掉，只保留了阴极 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 台面，进一步降低了高频寄生电容。

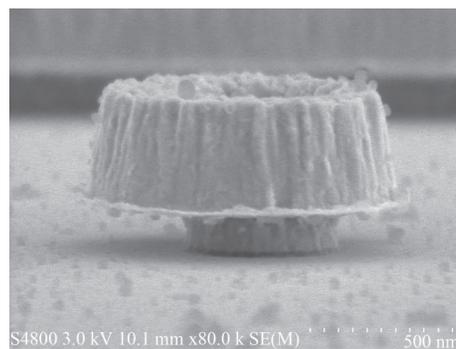
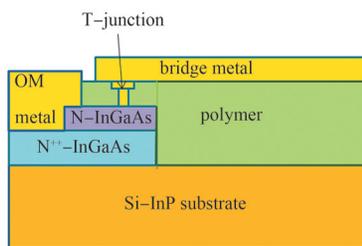
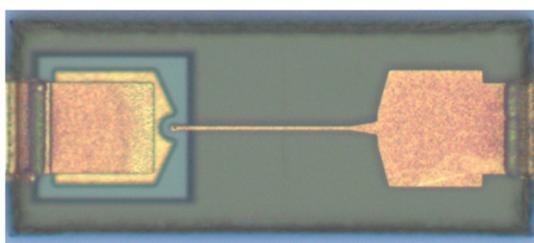


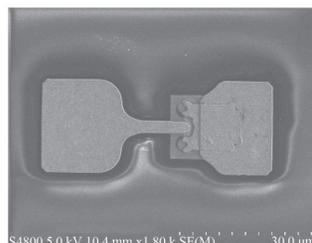
Fig.3 Diagram of T-type Schottky junction
图 3 T 型肖特基结



(a) diagram of substrate-free single-mesa T-junction Schottky device



(b) microscope photograph of substrate-free single-mesa T-junction Schottky device



(c) SEM photograph of substrate-free single-mesa T-junction Schottky device

Fig.4 Diagram of substrate-free single-mesa T-junction Schottky device
图 4 无衬底单台面 T 型结肖特基器件

该器件最突出的优点是利用了 BCB 材料的平坦化特点以及低介电常数的优势，用介质桥替代了空气桥结构。首先在结构强度上，大大增强了器件的可靠性；同时采用单台面介质桥结构可最大限度地降低台面引起的高频寄生电容 C_{pp} 。因此，可大幅提升无衬底单台面 T 型结肖特基器件的截止频率。

表 1 为 InP/InGaAs 太赫兹肖特基器件的本征参数表, 其中 1 号器件为 T 型结肖特基器件, 2 号~5 号器件为传统肖特基结器件。与传统肖特基结金属呈圆柱形不同, T 型肖特基结金属由上下 2 个不同直径的圆柱体组成, 下面的小圆柱体与半导体材料界面接触形成金-半肖特基结触; 上面的大圆柱体则负责引线形成电极。当 T 型肖特基结的上圆柱体直径与传统肖特基直径均为 $1\ \mu\text{m}$ 时, 由于 T 型肖特基结器件的实际金-半肖特基结触面直径仅为 $0.3\ \mu\text{m}$, 寄生电容和结电容大幅降低, 总电容仅为 $0.15\ \text{fF}$ 。虽然由于尺寸缩小带来串联电阻有所增大, 但器件的截止频率从 $4.4\ \text{THz}$ 增加到 $9.5\ \text{THz}$ 。

表 1 InP/InGaAs 太赫兹肖特基器件本征参数表
Table 1 The intrinsic factors of InP/InGaAs Schottky diodes

NO.	type	anode diameter/ μm	series resistance/ Ω	junction capacitance/fF	cut-off frequency/THz
1	T-type	0.3	96.0	0.15	9.5
2	traditional	1.0	6.2	3.60	4.4
3	traditional	2.0	3.3	14.00	3.4
4	traditional	3.0	2.5	29.40	2.2
5	traditional	4.0	2.1	47.00	1.6

2 InP/InGaAs 肖特基高灵敏太赫兹探测器

基于新型结构的 InP/InGaAs 肖特基器件技术, 研制了 $220\sim 330\ \text{GHz}$ 、 $325\sim 500\ \text{GHz}$ 、 $400\sim 600\ \text{GHz}$ 和 $500\sim 750\ \text{GHz}$ 等^[11-13]多频段的太赫兹探测器模块, 如图 5 所示。太赫兹探测器模块表现出非常好的检波灵敏度和噪声等效功率性能, 其中 $500\sim 750\ \text{GHz}$ 太赫兹探测器的检波灵敏度达到 $800\sim 2\ 000\ \text{V/W}$, 噪声等效功率为 $14\ \text{pW/Hz}^{0.5}$ 。图 6 为主动式太赫兹成像系统, 包括以下部分: 太赫兹发射源、 45° 角分束器、硅透镜、太赫兹探测模块, 其中太赫兹模块为本文研制的 $220\sim 330\ \text{GHz}$ 太赫兹探测器模块。图 7 为该模块的太赫兹系统成像效果图, 从图 7 可清晰地看出目标物的整体轮廓, 与 VDI 同频段产品成像清晰度相近。

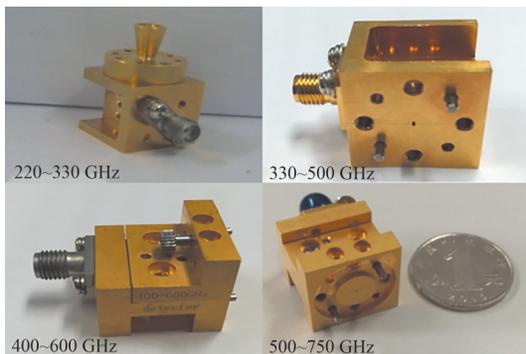


Fig.5 Multi-band terahertz detector modules
图 5 多频段的太赫兹检测器模块

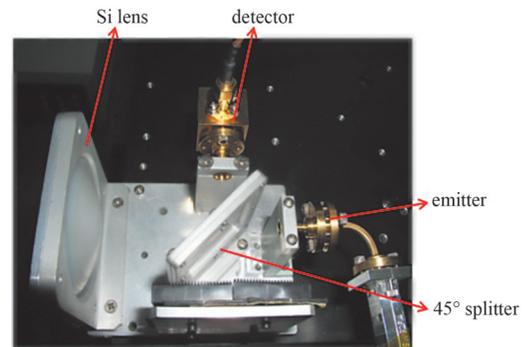
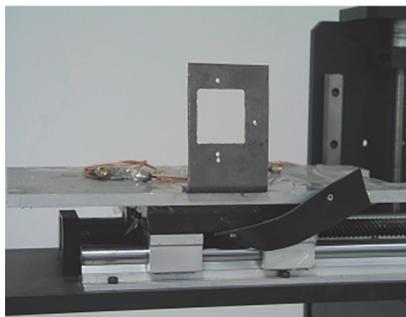
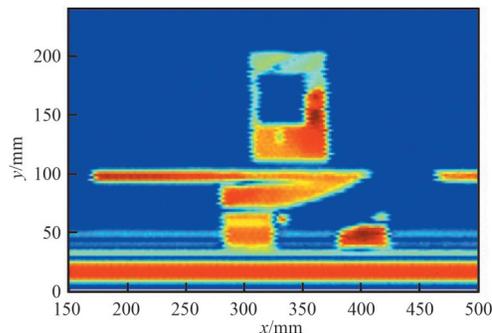


Fig.6 Active terahertz imaging system
图 6 主动式太赫兹成像系统



(a) photograph of terahertz imaging system targets



(b) photograph of terahertz imaging of the targets

Fig.7 Picture of an active terahertz imaging system
图 7 主动式太赫兹成像系统效果图

3 结论

本文提出了一种无衬底单台面 T 型结新型结构的肖特基器件，器件的截止频率为 9.5 THz。基于新型结构 InP/InGaAs 肖特基器件技术，研制了 220~330 GHz、325~500 GHz、400~600 GHz 和 500~750 GHz 等多频段的大赫兹检测器模块。其中 220~330 GHz 频段太赫兹检测器模块与美国 VDI 公司的同频段检测器模块相比，检测灵敏度等指标相近。该器件在太赫兹安检成像中具有很好的应用前景。

参考文献：

- [1] 洪伟,陈喆,周培根,等. 毫米波太赫兹集成电路与工艺[J]. 微波学报, 2023,39(5):1-18. (HONG Wei, CHEN Zhe, ZHOU Peigen, et al. Millimeter wave and terahertz integrated circuits and processes[J]. Journal of Microwaves, 2023,39(5):1-18.)
- [2] 马凯学,张蕾. 射频与毫米波功率放大器新进展[J]. 微波学报, 2023,39(5):92-98. (MA Kaixue, ZHANG Lei. New advances in RF and millimeter wave power amplifiers[J]. Journal of Microwaves, 2023,39(5):92-98.) doi:10.14183/j.cnki.1005-6122.202305011.
- [3] LIU L, HESLER J L, XU H Y, et al. A broadband quasi-optical terahertz detector utilizing a zero bias Schottky diode[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2010,20(9):504-506. doi:10.1109/LMWC.2010.2055553.
- [4] SEMENOV A, COJOCARI O, HÜBERS H W, et al. Application of zero-bias quasi-optical Schottky-diode detectors for monitoring short-pulse and weak terahertz radiation[J]. IEEE Electron Device Letters, 2010,31(7):674-676. doi:10.1109/LED.2010.2048192.
- [5] SILES J V, GRAJAL J, DI-CARLO A. Design of submillimeter Schottky mixers under flat-band conditions using an improved drift-diffusion model[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2009,19(3):167-169. doi:10.1109/LMWC.2009.2013741.
- [6] THOMAS B, MAESTRINI A, GILL J, et al. A broadband 835~900 GHz fundamental balanced mixer based on monolithic GaAs membrane Schottky diodes[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010(58):1917-1924. doi:10.1109/TMTT.2010.2050181.
- [7] CHATTOPADHYAY G. Technology, capabilities, and performance of low power terahertz sources[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011,1(1):33-53. doi:10.1109/TTHZ.2011.2159561.
- [8] LEE C, WARD J, LIN R, et al. A wafer-level diamond bonding process to improve power handling capability of submillimeter-wave Schottky diode frequency multipliers[C]// 2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Boston, MA, USA: IEEE, 2009:957-960. doi:10.1109/MWSYM.2009.5165857.
- [9] GRIFFITHS P R, HOMES C C. Instrumentation for far-infrared spectroscopy[EB/OL]. Handbook of Vibrational Spectroscopy (2006-08-15). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/0470027320.s0207>. doi:10.1002/0470027320.s0207.
- [10] SZE S M. Physics of semiconductor devices[M]. 2nd ed. New York: John-Wiley & Sons, 1981.
- [11] ZHOU Jingtao, GE Ji, YANG Chengyue, et al. Planar InP-based Schottky barrier diodes for terahertz applications[J]. Journal of Semiconductors, 2013,4(6):064003. doi:10.1088/1674-4926/34/6/064003.
- [12] LIU Xiaoyu, ZHANG Yong, XIA Dejiao, et al. A high-sensitivity terahertz detector based on a low-barrier Schottky diode[J]. Chinese Physics Letters, 2017,34(7):070701. doi:10.1088/0256-307X/34/7/070701.
- [13] REN Tianhao, ZHANG Yong, YAN Bo, et al. A high performance terahertz waveguide detector based on a low-barrier diode[J]. Chinese Physics Letters, 2016,33(6):060701. doi:10.1088/0256-307X/33/6/060701.

作者简介：

周静涛(1975-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹双端固态电子器件与集成技术研究 .email: zhoujingtao@ime.ac.cn.

金智(1970-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为太赫兹固态电子器件与集成技术.

苏永波(1983-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为太赫兹固态电子器件与集成技术.

史敬元(1979-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹固态电子器件与集成技术.

丁武昌(1981-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹固态电子器件与集成技术.

张大勇(1976-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹固态电子器件与集成技术.

杨枫(1990-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹固态电子器件.

刘桐(1995-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为太赫兹固态电子器件工艺.