

动态范围超过 75 dB 的 InGaAs/InAlAs 光电导太赫兹探测天线制备与表征

江情男^{1,2}, 谭智勇^{1,2*}, 万文坚^{1,2}, 符张龙¹, 夏宇³, 李敏³, 曹俊诚^{1,2*}

- (1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 集成电路材料全国重点实验室, 上海 200050;
2. 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049;
3. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 光电导天线是太赫兹频段非常重要的器件, 在太赫兹时域光谱技术中应用广泛。本文采用分子束外延生长方法制备 Be 掺杂 InGaAs/InAlAs 超晶格材料, 作为 1 550 nm 激光泵浦光电导太赫兹探测天线的光吸收材料, 制备的材料方块电阻大于 $10^6 \Omega/\text{sq}$ 、电子迁移率为 $216 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$; 采用湿法腐蚀和磁控溅射工艺分别制备探测天线有源区台面和电极结构, 并将天线芯片封装在 PCB 电路板上。采用国产 1 550 nm 飞秒泵浦激光器搭建探测天线测试系统, 对电极间隙分别为 40 μm 和 60 μm 的探测天线进行了表征; 测量结果表明, 60 μm 天线具有更宽的谱宽和功率动态范围, 分别达到 4.0 THz 和 77.0 dB。

关键词: 太赫兹; 光电导探测天线; 分子束外延; 时域光谱; 光纤飞秒激光
中图分类号: TN36 **文献标识码:** A

Fabrication and characterization of InGaAs/InAlAs photoconductive terahertz detection antenna with dynamic range exceeding 75 dB

JIANG Qing-Nan^{1,2}, TAN Zhi-Yong^{1,2*}, WAN Wen-Jian^{1,2}, FU Zhang-Long¹, XIA Yu³, LI Min³, CAO Jun-Cheng^{1,2*}

- (1. State Key Laboratory of Materials for Integrated Circuits, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;
2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The photoconductive antenna is a very important device in the terahertz region and is widely used in terahertz time-domain spectroscopy technology. This article uses the molecular beam epitaxy method to grow Be-doped InGaAs/InAlAs superlattice as light absorbing materials for 1550 nm laser pumped photoconductive antenna for terahertz detection. The prepared materials have a sheet resistance greater than $10^6 \Omega/\text{sq}$ and an electron mobility of $216 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$. The active mesa and electrode structure of the detection antenna are prepared using wet etching and magnetron sputtering processes, and the antenna chip is packaged on a PCB board. A detection antenna measurement system is built by employing a domestically produced 1550 nm femtosecond pump laser, and the detection antennas with electrode gaps of 40 μm and 60 μm are characterized. The measurement results indicate that the 60 μm antenna has a wider spectral width and power dynamic range, reaching 4.0 THz and 77.0 dB, respectively.

Key words: terahertz, photoconductive detection antenna, molecular beam epitaxy, time-domain spectroscopy, fiber

收稿日期: 2024-10-28, 修回日期: 2025-02-19

Received date: 2024-10-28, Revised date: 2025-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(61927813, 62435020, 61991432)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61927813, 62435020, 61991432)

作者简介(Biography): 江情男(1997-), 男, 江西鹰潭人, 博士生, 主要研究方向为太赫兹半导体器件制备; 江情男与谭智勇并列第一作者. E-mail: qnjiang@mail.sim.ac.cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: zytan@mail.sim.ac.cn, jccao@mail.sim.ac.cn

femtosecond laser

PACS:

引言

太赫兹时域光谱(Terahertz Time-Domain Spectroscopy, THz-TDS)技术^[1]是THz频段最为常用的光谱分析技术之一,可获得被测样品在光学、电子学和结构方面的信息,被广泛应用于物理学^[2]、材料科学^[3-5]、化学^[6]和生物医学^[7, 8]等领域。近年来,得益于光纤化系统的迅速发展,THz-TDS在无损检测^[9]、谱成像^[10-13]和安全检查^[14]等领域的应用规模正逐渐扩大。

光电导发射和探测天线是光纤化THz-TDS的两个重要部件,由于需要在1550 nm波长光纤飞秒激光泵浦下产生和探测THz时域脉冲,两个部件的制备需要用到禁带宽度与1550 nm波长光子能量匹配的材料,例如InGaAs材料。制备光电导天线的材料通常需要具备高暗态电阻、短载流子寿命以及较好的电子迁移率。为实现更短的载流子寿命,制备天线所用到的InGaAs材料需要在低于正常温度(Low temperature, LT)下生长,以获得较多的载流子缺陷,使电子可以快速复合,缩短载流子寿命;然而,在LT-InGaAs材料中,砷反位缺陷(As_{Ga})状态的能级位置较靠近于导带,这会将费米能级拉近到导带附近,从而容易发生热电离,在室温下表现出低暗电阻率,为了实现高暗电阻率,材料的制备过程需要引入InAlAs层作为势垒层,同时还需要对InGaAs层或InAlAs层进行p型掺杂,使原本n型的InGaAs材料变成弱n型的高阻态,被掺杂的InGaAs/InAlAs层中导带电子弛豫的主要机制是声子辅助电子捕获到砷反位缺陷,随后与空穴复合。更准确地说,电子捕获以砷反位缺陷部分为主,该缺陷由于p型掺杂而被正电离(As_{Ga}^+),从而降低了费米能级,并且p型掺杂使得电离反位缺陷浓度增加,导致电荷载流子捕获速度加快,使材料的载流子寿命低于1 ps,甚至更低^[15-18]。最后,为了使天线具备较高的转换效率,其材料还需要具备一定的载流子迁移率,尤其是制备发射天线的材料。然而,在优化上述材料的多个参数时,迁移率和电阻率是一对矛盾的参数,只能通过折中的办法来整体优化,以整体实现材料载流子寿命、暗态电阻率以及电子迁移率的最优化,因此上述材料的制备难度非常大。目前可实现上述外延材料的p型掺杂元素主要有三种,

铍(Be)掺杂^[19]、铁(Fe)掺杂^[20]和铑(Rh)掺杂^[21],由于Fe和Rh这两种元素源对应的源炉成本高昂,且容易污染其他III-V族材料体系的生长过程,所以Fe掺杂和Rh掺杂InGaAs材料的生长通常采用单独定制的分子束外延系统,极其少见。相比之下,Be掺杂是III-V族分子束外延生长系统中多种材料体系的常用p型掺杂源,对其掺杂浓度和生长温度的控制相对更为成熟,采用Be掺杂的光电导天线材料更容易实现规模化生产和应用。

光电导探测天线^[19]是THz-TDS最为重要的部件之一,相比光电导发射天线,光电导探测天线的研究较少。与发射天线不同^[22, 23],光电导探测天线更注重低暗电流或噪声电流,器件暗态电阻越高,其本底噪声越低,因此提高天线材料的电阻率(方块电阻)是一种降低探测天线暗电流或噪声的有效方法。此外,为了准确采样THz-TDS中的脉冲轨迹并实现宽带检测,超短载流子寿命至关重要^[24]。本文采用分子束外延生长系统和Be掺杂技术,通过优化材料生长条件,在半绝缘InP衬底上制备InGaAs/InAlAs超晶格外延层,采用高阻霍尔测试仪测得外延层材料的方块电阻和电子迁移率,采用湿法腐蚀和磁控溅射分别制备探测天线有源区台面及相应电极结构,在1550 nm光纤飞秒激光泵浦下,采用标准光电导发射天线表征探测天线的响应信号,然后对比分析两个探测天线的电学特性、工作谱宽和功率动态范围等,得到其最优的工作性能参数,最后从材料生长、工艺制备和芯片封装分别讨论了进一步提高探测天线性能的方法和手段。

1 探测天线制备

1.1 外延材料生长与表征

本文采用InGaAs/InAlAs超晶格作为THz光电导探测天线材料,采用分子束外延系统生长上述超晶格材料,衬底材料为半绝缘InP:Fe,衬底厚度350 μm 。光电导天线的有源层结构采用典型的12 nm势阱和8 nm势垒异质结构^[24-26],异质结构重复周期为100。上述有源层总厚度为2 μm ,可有效吸收入射的1550 nm泵浦激光^[27]。为避免生长过程中晶体生长质量下降,InGaAs层与InAlAs层均与InP衬底保持晶格匹配,对应的In组分分别为0.52和0.53。具体生长过程如下:首先在半绝缘InP衬底上生长

116 nm 的 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 缓冲层;然后低温生长 100 个周期的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 超晶格有源层,其中每个周期厚度为 20 nm,包括 12 nm 厚的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 层和 8 nm 厚的 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 层;最后在超晶格有源层上低温生长 8 nm 的 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 覆盖层。

本文在前期材料研究^[26]基础上进一步优化了上述超晶格有源层的外延生长,生长温度为 250 °C,生长时的 AsH_3 压力为 560 Torr。为了实现材料的高电阻率性能,生长过程中 Be 掺杂浓度为 $9.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,且 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 层和 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 层均进行 Be 掺杂。生长后对材料进行原位退火 60 min,退火温度为 500 °C。

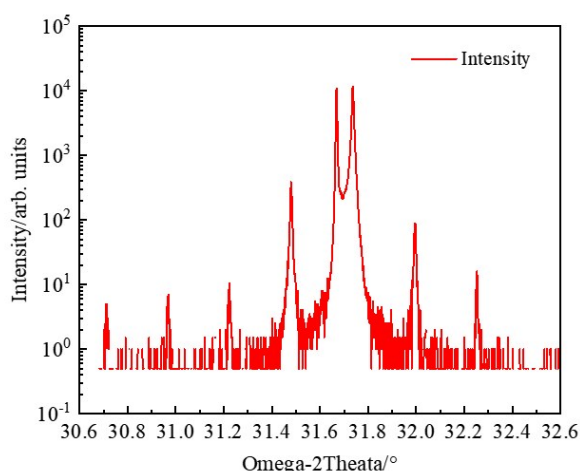


图1 光电导探测天线材料XRD测试结果

Fig. 1 XRD result of PCA detector material

采用基于布拉格衍射工作原理的X射线衍射(X-Ray Diffraction, XRD)仪对超晶格外延材料进行了表征(见图1),由图可知,材料的多级衍射峰峰值较强且非常尖锐、衍射峰半高宽小,表明生长的超晶格外延材料,晶体质量好,周期界面很平整。采用基于霍尔效应的高阻霍尔测试仪测得外延材料的方块电阻为 $2 \times 10^6 \Omega/\text{sq}$,电子迁移率 $\sim 200 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 。本文生长的超晶格材料具备较高的方块电阻和一定的电子迁移率,适合用于制备光电导探测天线。

1.2 台面刻蚀与电极制备

与表面型光电导天线^[28]相比,台面型天线^[29]的超晶格 InGaAs/InAlAs 外延材料利用率高,可以充分收集探测天线有源区厚度范围内产生的 THz 信号,同时,台面结构的光电导天线具有更低的噪声。本文设计了两种光电导探测天线的台面型平行线电极结构(见图2),以对比不同电极间隙天线的工作

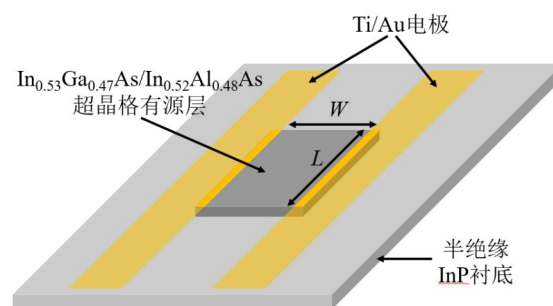


图2 光电导探测天线电极结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of electrode structure for PCA detector

性能,电极间隙大小(W)分别为 40 μm 和 60 μm ,对应台面长度(L)为 60 μm 和 80 μm 。

湿法腐蚀是一种稳定可靠、成本低、设备依赖性低且便于批量制备的成熟工艺。本文采用氢溴酸(HBr)、双氧水(H_2O_2)和水(H_2O)的混合液,混合比例为 10:1:30,刻蚀出天线台面结构,刻蚀速率 $\sim 0.7 \mu\text{m}/\text{min}$ 。用该配方刻蚀可形成无明显沟槽的光滑侧壁(见图3),天线的电极结构采用磁控溅射方式制备,在刻蚀好的台面两侧蒸镀厚度为 25/200 nm 的 Ti/Au 合金平行线,其中平行线宽 6 μm 。整个天线结构的大小为 2.4 mm $\times$ 2.5 mm,制备的天线间隙显微照片如图4所示。

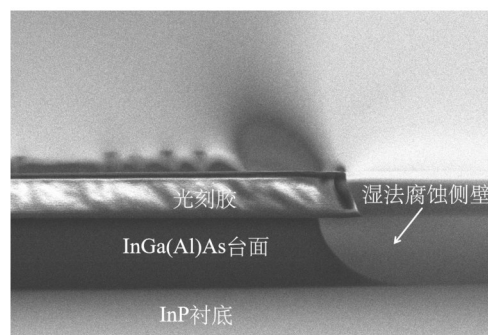


图3 光电导探测天线刻蚀台面侧壁显微照片

Fig. 3 Microscopic photo of the etching surface sidewall of PCA detector

1.3 天线封装

在光电导探测天线性能测试时,为了更好地将天线电极信号引出,并通过稳定可靠的电学接口输出至放大装置,本文设计了一种用于探测天线封装的 PCB 板电路及信号输出 SMA 接口,PCB 板上的电路设计与探测天线电极 Pad 分布保持一致,通过倒装贴片将探测天线芯片固定在 PCB 板上,同时在

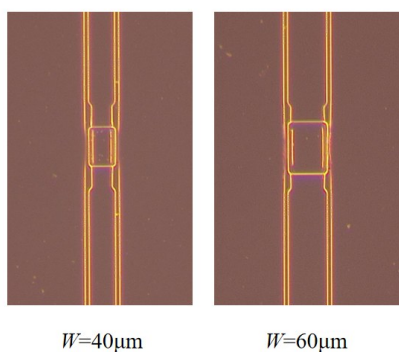


图4 电极间隙显微镜照片

Fig. 4 Microscopic photos of two types of electrode gaps

PCB板上设计一个直径约1 mm的圆孔,该圆孔位于PCB封装区域正中间,天线芯片封装时保持其台面型间隙位于圆孔的正中央附近,便于光纤飞秒激光的入射。采用PCB板封装后的THz光电导探测天线照片如图5所示。

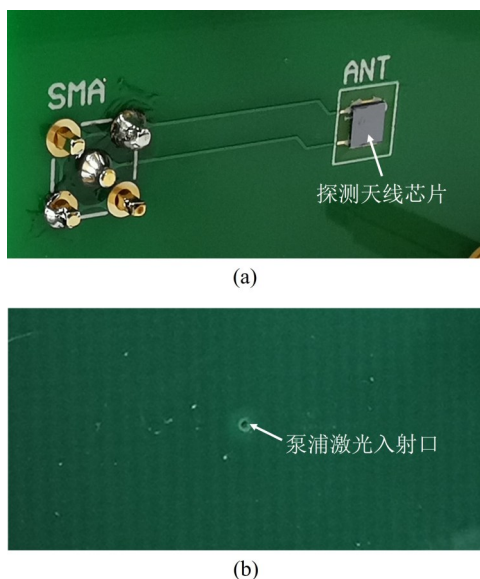


图5 光电导探测天线封装照片:(a) 正面;(b) 反面

Fig. 5 Photos of the packaged PCA detector: (a) front; (b) back

2 天线测试系统

为了获得光电导探测天线的工作性能,本文采用国产1550 nm光纤飞秒激光器(朗研科技ErFemto Elite100)、标准THz光电导发射天线(TERA15-TX-FC)、机械扫描式光纤延迟线、锁相放大器(SR830)以及一组离轴抛物面反射镜(OAPs),搭建了光电导探测天线的测试系统(见图6)。其中,泵浦激光重复频率为80 MHz,脉宽~100 fs,发射天线泵浦功率

20 mW,探测天线处的泵浦功率为22 mW。

如图6所示,在测试前,先用可见光将两个OAPs校准好,并将探测端泵浦光纤端面 and 标准THz光电导发射天线分别放置于离轴抛物面反射镜组的两个焦点附近,使发出的THz辐射被有效收集和准直,并会聚到探测端。包含探测天线芯片的PCB板被固定在一个支架上,并在探测天线的THz时域脉冲入射面上匹配一个高阻硅超半球透镜,其中超半球透镜被固定在一个可三维移动的支架上,其平面与天线芯片背面贴紧,超半球的直径为12 mm,厚度为8 mm;泵浦光纤则被固定在可三维移动的光纤夹具上。测试时,先将PCB板放置于泵浦光纤前面,使得光纤端面位于PCB板背面小孔附近,并保持对齐,然后细微调节固定光纤的三维移动台,使光纤端口深入PCB板背面的小孔,通过实时监测探测天线的电阻大小,判断光纤端口与探测天线的对准程度,当探测天线的电阻达到最小时,则认为泵浦光纤输出的激光最大程度地照射到探测天线的电极间隙上,光纤与探测天线实现对准;开启THz光电导发射天线,反复调节超半球透镜、探测端OAP和发射天线的位置,使探测天线的信号达到最大。为了使锁相放大器实现对探测天线信号的锁定,测试时采用斩波器对入射到产生天线的泵浦激光进行调制,斩波器频率信号输入锁相放大器作为同步信号,斩波频率为400 Hz,锁相放大器时间常数设置为0.3 s;采用的标准THz光电导发射天线的工作偏压为95 V,其出厂频谱宽度>6 THz,功率动态范围>80 dB。测试系统工作于室温和大气环境。

3 测试结果与讨论

在探测天线性能测试之前,先采用数字万用表测量了探测天线在1550 nm飞秒激光光照前后的电阻值,测量结果如表1所示,由表可知,40 μm天线和60 μm天线的光照后电阻均小于1 MΩ。

测试过程设置的扫描时间分辨率为0.05 ps,扫描时间范围为48 ps。图7所示为从锁相放大器读取的光电导探测天线的时域信号测试结果,其中时域脉冲峰值对应的时间差异来源于测试时天线位置的差异。

采用Origin软件将图7所示的时域脉冲信号进行快速傅里叶变换后得到探测天线的频域谱(功率谱),傅里叶变换的窗口函数选择最常用的矩形窗(Rectangle Window),图8所示为光电导探测天线的功率谱(以dB为单位)。按照光电导天线谱宽和功

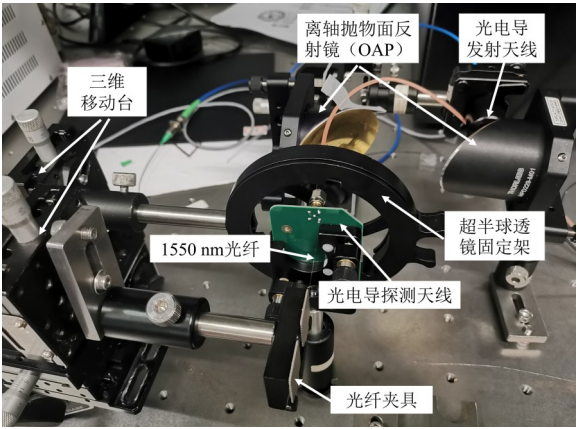
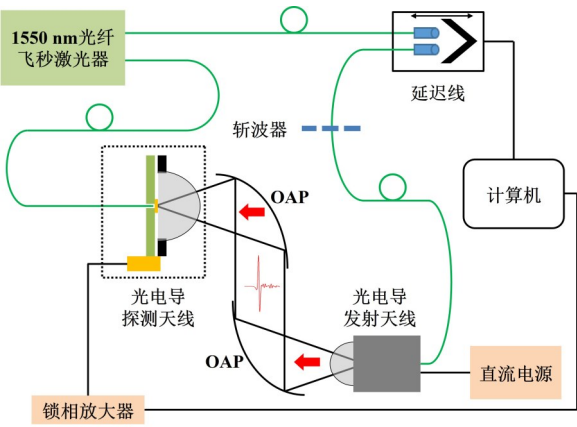


图6 光电导探测天线测试系统示意图(上)和相应的实验系统照片(下)

Fig. 6 Schematic diagram of the PCA testing system (left) and the corresponding experimental system photo (right)

表1 光电导探测天线光照前后的电阻对比

Table 1 Comparison of the resistance of PCA detector before and after illumination

电极间隙	暗态电阻	飞秒激光光照电阻	电阻变化量
40 μm	1.4 M Ω	0.7 M Ω	0.7 M Ω
60 μm	1.9 M Ω	0.9 M Ω	1.0 M Ω

率动态范围的定义^[30, 31],功率谱的噪底值取6~10 THz 范围功率谱信号的平均值,谱宽为噪底值对应噪底线与功率谱曲线相交点中频率最低点对应的频率值。从图中可以得出,40 μm 天线的谱宽为3.4 THz,功率动态范围71.7 dB,60 μm 天线的谱宽为4.0 THz,功率动态范围达到77.0 dB。表2所示为探测天线工作谱宽、功率信号最大值、噪底值和功率动态范围实测结果。

单纯从谱宽和功率动态范围来看,上述探测天线已可以满足部分THz-TDS场景下的应用需求,尤

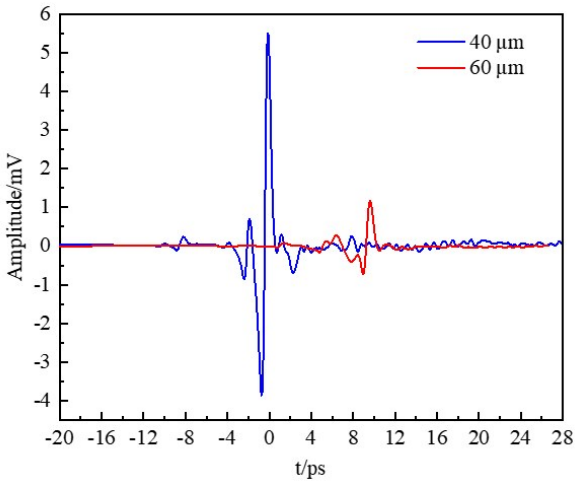


图7 不同间隙大小光电导探测天线时域信号测试结果

Fig. 7 Time-domain signal of PCA detectors with different gap sizes

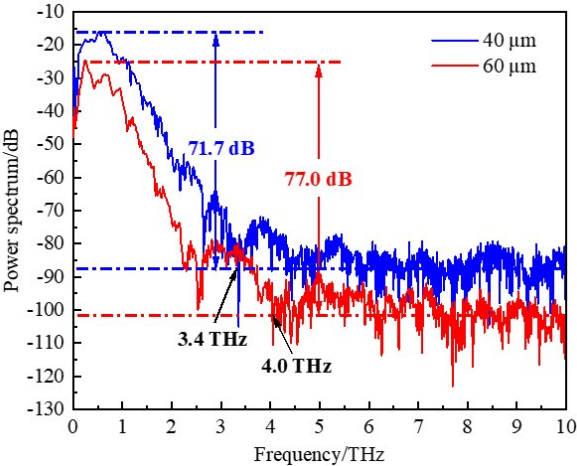


图8 不同间隙大小光电导探测天线功率谱测试结果

Fig. 8 Power spectra of PCA detectors with different gap sizes

表2 光电导探测天线工作谱宽和功率动态范围实测结果

Table 2 Results of the spectral width and power dynamic range of PCA detectors

电极间隙	探测谱宽	功率谱最大值	功率谱噪底值	功率动态范围
40 μm	3.4 THz	-15.8 dB	-87.5 dB	71.7 dB
60 μm	4.0 THz	-24.6 dB	-101.6 dB	77.0 dB

其是电极间隙为60 μm 的天线,其噪底值要比40 μm 天线低14.1 dB,超过1个数量级,功率动态范围可达77 dB。不过,要达到更宽的探测谱宽(>5 THz)和更大的功率动态范围(>80 dB),光电导探测天线还需要从以下几个方面进一步优化:1)在保证吸收效率的情况下采用更厚的超晶格外延材料,以

增强电流信号,这种方法需要调整间隙宽度及台面尺寸以避免无效载流子复合;还可以通过优化生长参数获得更高的暗态电阻率;2)采用表面覆膜技术或增加超表面结构,提高泵浦激光的吸收效率;3)采用超半球透镜直接封装技术,将天线芯片直接贴在半球平面部分的中心,提高天线测试时 THz 辐射的耦合效率。

4 结论

本文通过优化生长条件,采用分子束外延生长系统制备出适合于 THz 光电导探测天线的 Be 掺杂 InGaAs/InAlAs 超晶格外延材料,高分辨 XRD 测试结果显示外延材料的晶体质量良好,测得材料的方块电阻大于 $10^6 \Omega/\text{sq}$ 、电子迁移率大于 $200 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$;采用湿法腐蚀和磁控溅射工艺分别制备出探测天线的有源区台面和平行线电极结构,制备的电极间隙包括 $40 \mu\text{m}$ 和 $60 \mu\text{m}$ 两种,在 PCB 电路板上实现了探测天线芯片的可靠封装;采用国产 1550 nm 飞秒泵浦激光器搭建了探测天线测试系统,对两种电极间隙天线的表征结果表明, $60 \mu\text{m}$ 天线具有更宽的谱宽和功率动态范围,分别为 4.0 THz 和 77.0 dB。

致谢:感谢西安理工大学施卫教授、侯磊教授以及天津大学谷建强教授在天线研制与测试过程中给予的建议和有益讨论。

References

- [1] Neu J, Schmittenmaer C A. Tutorial: An introduction to terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS) [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124 (23): 231101.
- [2] Naftaly M, Tikhomirov I, Hou P, et al. Measuring Open Porosity of Porous Materials Using THz-TDS and an Index-Matching Medium [J]. *Sensors*, 2020; 20(11): 3120.
- [3] Murphy K N, Naftaly M, Nordon A, et al. Polymer Pellet Fabrication for Accurate THz-TDS Measurements [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(7): 3475.
- [4] Whelan P R, Shen Q, Luo D, et al. Reference-free THz-TDS conductivity analysis of thin conducting films [J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 28819-28830.
- [5] Islam M S, Sultana J, Cordeiro C M B, et al. Broadband Characterization of Glass and Polymer Materials Using THz-TDS [C]. 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), IEEE, 2019: 1-2.
- [6] Neu J, Stone E A, Spies J A, et al. Terahertz Spectroscopy of Tetrameric Peptides [J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2019, 10(10): 2624-2628.
- [7] Fardelli E, D'Arco A, Lupi S, et al. Spectroscopic evidence of the radioresistance of *Chroococcidiopsis* biosignatures: A combined Raman, FT-IR and THz-TDS spectroscopy study [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2023, 288: 122148.
- [8] Zhang T, Zhang Z, Arnold M A. Polarizability of Aspirin at Terahertz Frequencies Using Terahertz Time Domain Spectroscopy (THz-TDS) [J]. *Applied Spectroscopy*, 2019, 73 (3): 253-260.
- [9] Xu Y, Jiang X. Nondestructive testing and imaging of corrosion thickness of steel plates using THz-TDS [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, 127: 104467.
- [10] Damyanov D, Kubiczek T, Kolpatzeck K, et al. 3D THz-TDS SAR Imaging by an Inverse Synthetic Cylindrical Aperture [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 9680-9690.
- [11] Palka N, Maciejewski M, Kaminski K, et al. Fast THz-TDS Reflection Imaging with ECOPS - Point-by-Point versus Line-by-Line Scanning [J]. *Sensors*, 2022, 22 (22): 8813.
- [12] Mansourzadeh S, Damyanov D, Vogel T, et al. High-Power Lensless THz Imaging of Hidden Objects [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 6268-6276.
- [13] Zanutto L, Piccoli R, Dong J, et al. Time-domain terahertz compressive imaging [J]. *Optics Express*, 2020, 28 (3): 3795-3802.
- [14] Wang C, Shi F, Zhao M, et al. Convolutional Neural Network-Based Terahertz Spectral Classification of Liquid Contraband for Security Inspection [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(17): 18955-18963.
- [15] Dietz R J B, Globisch B, Roehle H, et al. Influence and adjustment of carrier lifetimes in InGaAs/InAlAs photoconductive pulsed terahertz detectors: 6 THz bandwidth and 90dB dynamic range [J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19411.
- [16] Kohlhaas R B, Dietz R, Breuer S, et al. Improving the dynamic range of InGaAs-based THz detectors by localized beryllium doping: up to 70 dB at 3 THz [J]. *Opt Lett*, 2018, 43(21): 5423-5426.
- [17] Globisch B, Dietz R J B, Stanze D, et al. Carrier dynamics in Beryllium doped low-temperature-grown InGaAs/InAlAs [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104 (17): 172103.
- [18] Grandier B, Chen H, Feenstra R M, et al. Scanning tunneling microscopy and spectroscopy of arsenic antisites in low temperature grown InGaAs [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 74(10): 1439-1441.
- [19] Kohlhaas R B, Dietz R, Breuer S, et al. Improving the dynamic range of InGaAs-based THz detectors by localized beryllium doping: up to 70 dB at 3 THz [J]. *Opt Lett*, 2018, 43(21): 5423-5426.
- [20] Richter P, Kartal E, Kohlhaas R B, et al. Ultrafast THz Conductivity Dynamics of a Novel Fe-Doped InGaAs Quantum Photoconductor [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2020, 10(2): 167-175.
- [21] Deumer M, Breuer S, Berrios S, et al. Continuous wave THz receivers with rhodium-doped InGaAs enabling 132 dB dynamic range [J]. *Optics Express*, 2024, 32 (17): 29855.
- [22] Jepsen P U, Cooke D G, Koch M. Terahertz spectroscopy and imaging-Modern techniques and applications [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2011, 5(1): 124-166.

- [23] Masahiko Tani M T, Kiyomi Sakai K S, Hidenori Mimura H M. Ultrafast Photoconductive Detectors Based on Semi-Insulating GaAs and InP[J]. Japanese journal of applied physics, 1997, 36(9A): L1175.
- [24] Dietz R J B, Globisch B, Roehle H, et al. Influence and adjustment of carrier lifetimes in InGaAs/InAlAs photoconductive pulsed terahertz detectors: 6 THz bandwidth and 90 dB dynamic range [J]. Optics Express, 2014, 22 (16): 19411–19422.
- [25] Dietz R J B, Gerhard M, Stanze D, et al. THz generation at 1.55 μm excitation: six-fold increase in THz conversion efficiency by separated photoconductive and trapping regions [J]. Optics Express, 2011, 19 (27) : 25911–25917.
- [26] Wan W J, Yin R, Han Y J, et al. Molecular beam epitaxy growth and characterization of low temperature InGaAs/InAlAs multiple quantum wells [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(06): 1523. 万文坚, 尹嵘, 韩英军, 等. 低温 InGaAs/InAlAs 多量子阱的分子束外延生长与表征 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25 (06) : 1523.
- [27] Kuznetsov K, Klochkov A, Leontyev A, et al. Improved InGaAs and InGaAs/InAlAs Photoconductive Antennas Based on (111)–Oriented Substrates [J]. Electronics, 2020, 9(3): 495.
- [28] Brown E R. A photoconductive model for superior GaAs THz photomixers [J]. Applied Physics Letters, 1999, 75 (6): 769–771.
- [29] Roehle H, Dietz R J B, Hensel H J, et al. Next generation 1.5 μm terahertz antennas: mesa-structuring of InGaAs/InAlAs photoconductive layers [J]. Optics Express, 2010, 18(3): 2296–2301.
- [30] Kohlhaas R B, Dietz R, Breuer S, et al. Improving the dynamic range of InGaAs-based THz detectors by localized beryllium doping: up to 70 dB at 3 THz [J]. Opt Lett, 2018, 43(21): 5423–5426.
- [31] Yardimci N T, Turan D, Cakmakyapan S, et al. A high-responsivity and broadband photoconductive terahertz detector based on a plasmonic nanocavity [J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(25): 251102.