

基于铟镓砷材料的新型太赫兹/亚毫米波探测器研究

童劲超, 黄敬国, 黄志明

(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: 对一种基于生长在半绝缘 InP 衬底上 InGaAs 外延材料的新型太赫兹室温探测器进行研究。首先在 HFSS 理论计算的基础上对器件天线阻抗、驻波比、辐射方向图等特性参数进行分析。其次, 通过光刻、腐蚀、溅射、点焊等工艺制作出对称金属电极天线耦合的太赫兹探测器件。结合自己搭建的 0.037 5 THz 器件响应测试系统, 得到铟镓砷太赫兹探测器件在不同偏置电流和不同调制频率下的器件响应曲线。结果表明器件具有明显的光电信号和快的响应速度。通过利用高莱探测器进行标定, 得到器件在 0.037 5 THz 时的电压灵敏度优于 6 V/W, 器件噪声等效功率 NEP 优于 1.6×10^{-9} W/Hz^{1/2}, 器件响应时间优于 300 μ s。

关键词: 太赫兹; 室温; 铟镓砷; 探测器; 天线计算

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3347-05

New type terahertz/sub-millimeter wave detector based on InGaAs layers

Tong Jinchao, Huang Jingguo, Huang Zhiming

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

Abstract: A brand new type of terahertz/sub-millimeter wave detector based on InGaAs material grown on semi-insulate InP substrate was proposed with an Metal-Semiconductor-Metal (MSM) structure. High Frequency Structural Simulator(HFSS) software was firstly used to characterize the metallic planar antenna by calculating its resistance, standing-wave ratio (SWR), and the radiation pattern. Detectors with symmetrical metallic antenna were fabricated by a serious of technical process mainly including photolithograph, etching, and sputtering. Photoresponse of the detector with respect to the bias current and the modulation frequency was measured by a homemade measure system with a 0.037 5 THz Gunn oscillator terahertz source. The results show large photovoltage signal and fast respond speed (<300 μ s) of the device. The voltage sensitivity of the detector at 0.037 5 THz reaching to 6 V/W was further obtained by the calibration of a Golay cell detector. And the noise equivalent power (NEP) at this frequency was 1.6×10^{-9} W/Hz^{1/2}.

Key words: terahertz; room temperature; InGaAs; detector; antenna simulation

收稿日期: 2014-02-11; 修订日期: 2014-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(61274138); 中国科学院上海技术物理研究所创新项目(Q-DX-29)

作者简介: 童劲超(1987-), 男, 博士生, 主要从事太赫兹探测方面的研究。Email: tjc@mail.sitp.ac.cn

导师简介: 黄志明(1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事红外、太赫兹产生与探测方面的研究。

Email: zmhuang@mail.sitp.ac.cn

0 引言

太赫兹波段是介于微波毫米波与红外之间的电磁波段,其频率范围和波长范围分别为 0.1~10 THz, 3 mm~30 μm 。此前,人们对太赫兹波段的研究很少,该波段也一直被称为 THz Gap。近年来,由于不断发现太赫兹波在材料、通信、生物化学、安全检测、空间遥感等领域上的巨大应用潜力,使得国内外的研究者对其研究热度大大提高^[1-4]。在太赫兹技术上,太赫兹探测技术是太赫兹科学与技术中最具应用前景的发展方向之一。由于太赫兹波的光子能量很小以及大气对太赫兹波段的强烈吸收,使得目前太赫兹探测器的发展较为缓慢。近年来,基于不同原理,使用不同探测材料制作的太赫兹探测器有了较大的发展。

目前,太赫兹探测器件主要有直接探测器和相干探测器两种,相干探测器如肖特基二极管混频器 SBD、超导体-绝缘体-超导体隧道混频器 SIS、半导体/超导体热电子 bolometer 混频器 HEB^[5-8]虽然具有高的转换效率和低的噪声,但是由于需要使用本地振荡源,使得其结构较为复杂,并且它们多数需要工作在深低温。而现在一些常见的直接探测器如高莱探测器,热释电探测器虽然可以工作在室温,但是其响应时间较慢,很难应用于太赫兹实时成像。

窄禁带半导体材料因其组分可调,迁移率高等优点,可应用于太赫兹探测,目前,基于钢镓砷材料,已经实现了多种结构,不同原理的太赫兹/亚太赫兹探测^[9-10],如基于等离子体共振效应的场效应晶体管,非对称蝶形天线耦合的基于二维电子气的太赫兹探测器。文中充分考虑到了实际太赫兹探测器对于响应时间、工作温度、结构难易、信噪比的要求,设计了一种新型基于电场增强效应的钢镓砷太赫兹探测器,具有响应时间短、室温工作、结构简单紧凑等优点,可对太赫兹信号进行直接探测,该探测器基于电场增强效应,选用组分适当的钢镓砷材料,设计合理可行的耦合天线结构,进行光刻、腐蚀、溅射等工艺制作,使用前置放大器进行放大读出,从而实现对于太赫兹信号的探测。

1 器件结构

图 1 是该钢镓砷太赫兹探测器的结构图,通过

MOCVD 方法在半绝缘磷化铟衬底上生长本征钢镓砷外延层,然后在在外延层上依次生长掺杂钢镓砷层。再在最上面溅射金属电极形成正电极层和负电极层。通过光刻、腐蚀、套刻、溅射等工艺形成所需探测器尺寸结构,右电极层和左电极通过点焊金属导线与前放电路连接来传递所探测信号。当外界太赫兹辐射信号入射到半导体上时,由于电场增强,从而改变本征钢镓砷层材料的电阻,在金属电极之间将产生电压信号,可用于太赫兹信号的探测。图 2 是通过工艺制作出来的实际钢镓砷太赫兹探测器的 SEM 图。

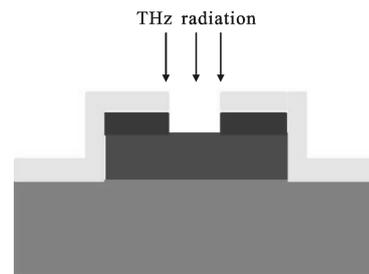


图 1 钢镓砷太赫兹探测器结构原理图

Fig.1 Scheme of InGaAs terahertz detector

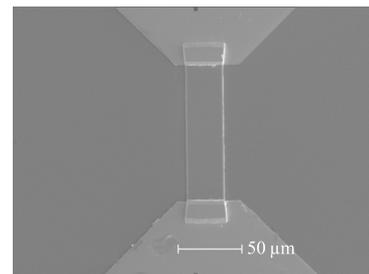


图 2 钢镓砷太赫兹探测器的扫描电镜图像

Fig.2 Scanning electron microscope graph of InGaAs terahertz detector

2 天线计算

金属耦合天线在该钢镓砷探测器中用于提高耦合外界太赫兹辐射的效率,对天线而言,方向性 D 定义为天线最大辐射强度对整个空间平均辐射强度之比,衡量天线的聚焦能力,具有高方向性的天线同时具有窄的波束宽度,在天线接收太赫兹辐射信号时,应要求天线对于太赫兹波入射方向有高的方向性,从而增大对于太赫兹波的耦合效率而抑制其他方向的耦合。天线的辐射效率 η 定义为要求的输出功率对提供的输入功率的比值,由于天线内部的金

属导电性和介质损耗引起的耗散性损耗使得天线辐射效率 $\eta < 1$; 天线的增益 G 定义为天线方向性和效率的乘积 $G = \eta D$ 。耦合天线和探测元之间的阻抗匹配是很重要的,对于阻抗匹配,在天线设计时一般要求电压驻波比 $VSWR < 2$ 。当驻波比 $VSWR = 2$ 时,反射功率损耗约 10%,而当驻波比 $VSWR = 6$ 时,反射功率损耗要接近 50%。所制作的铜铟砷探测器其直流电阻值在 30~70 Ω 左右,由于其尺寸较小,近似认为在太赫兹波频率时其特征阻抗和直流时相接近。铜铟砷材料还有个特点是其室温阻抗随组分 x 的变化而改变,在不改变探测器响应条件下,可通过选择合适的组分 x 来实现与平面耦合天线在太赫兹波段构成良好的阻抗匹配特性从而提高耦合效率。

仿真模拟了实验中所用的耦合天线,仿真时基底材料为 InP,其厚度为 0.5 mm,相对介电常数为 12.9,设铜铟砷敏感元尺寸为 50 $\mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$,使用 50 Ω 集总源进行天线馈电,外围是空气,使用插值扫频了 0.0375~0.045 THz 的天线特性。

实验所用天线在 0.0375 THz 附近的阻抗和驻波比的情况如图 3 和图 4 所示。可以看出,在 0.0375 THz

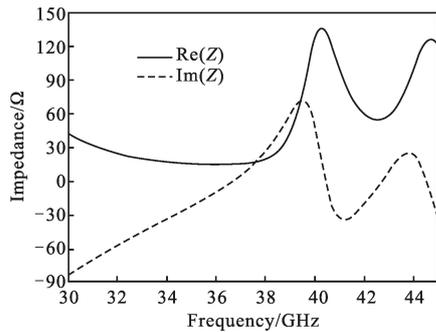


图 3 实验天线 0.0375 THz 阻抗图

Fig.3 Impedance pattern of antenna at 0.0375 THz

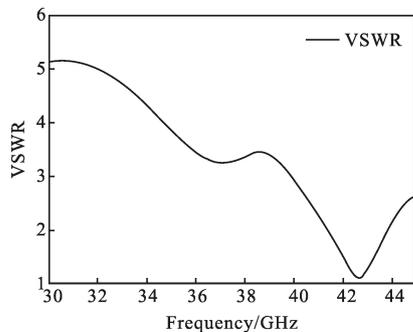


图 4 实验天线 0.0375 THz 驻波比

Fig.4 Standing wave ration of antenna at 0.0375 THz

左右,天线的阻抗较小,电阻只有约 16.7 Ω ,使得驻波比达到 3.3,另外,实验所用天线对于入射辐射的耦合效率,用天线方向性表示如图 5 所示。可以看出在 0.0375 THz 时对正入射耦合较好,其增益为 1.7 dB。

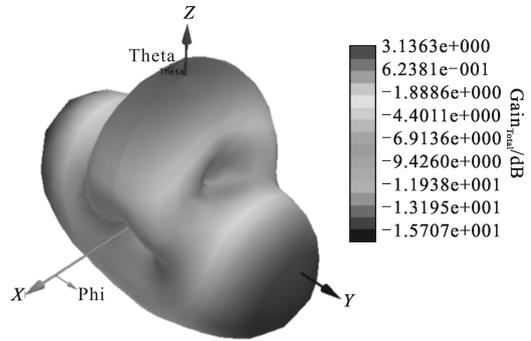


图 5 实验天线三维辐射方向图 0.0375 THz

Fig.5 Radiation pattern of the antenna at 0.0375 THz

3 测试系统

为测试铜铟砷探测器对于太赫兹波的响应特性,建立了如图 6 所示的测试平台。太赫兹信号源输出连续稳定的单频太赫兹波,用斩波器对太赫兹波进行机械调制(调制频率 10~3 000 Hz),A 和 B 是两个镀金偏轴抛物面反射镜(有效焦距 $FEL = 101.6 \text{ mm}$),太赫兹信号源出射口和探测器分别放在偏轴抛物面反射镜 A 和 B 的焦点处附近,调制的太赫兹波经聚焦后入射到探测器上,探测器输出小信号经前置放大电路放大后输入锁相放大器或者示波器进行数据读出和显示,斩波器的调制频率用作参考触发信号。入射到探测器上的信号功率用 Golay 探测器(俄罗斯 Tydex 公司)进行标定,其响应率为 91 kV/W (10 Hz 调制频率)。

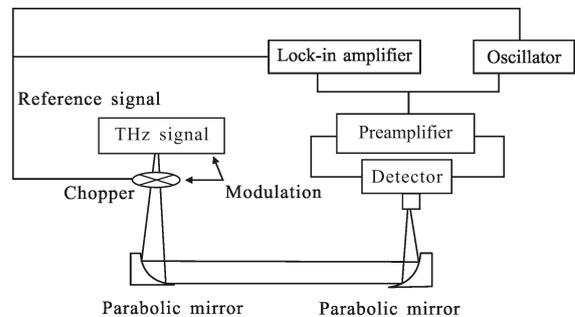


图 6 实验测试平台示意图

Fig.6 Scheme of measurement set-up

所制作的前置放大器其频响特性如图 7 所示,

可以看出在 100 kHz 以下, 放大器有良好的增益效果, 但增益曲线不太平滑, 在 30 kHz 处有突出。

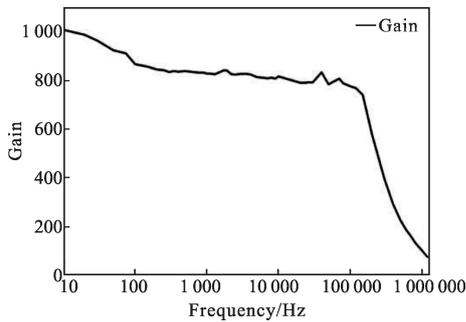


图 7 前置放大器频响特性

Fig.7 Spectral response of preamplifier

4 器件响应测试

图 8, 图 9 分别是钢镓砷探测器样机在不同偏置电压和不同调制频率下对 0.037 5 THz 信号源的响应。由图可以看出, 器件的电压信号输出与偏置电压

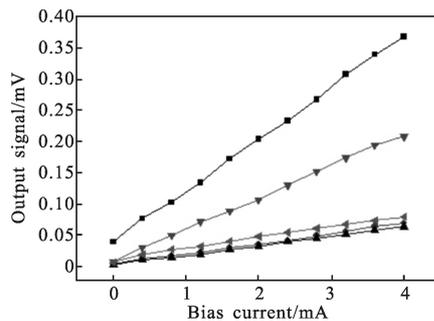


图 8 不同偏置电压下器件电压信号

Fig.8 Output voltage signal at different bias current

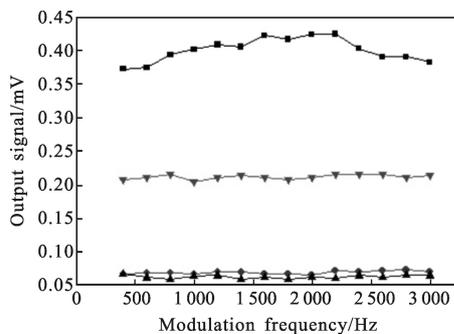


图 9 不同调制频率下器件电压信号

Fig.9 Output voltage signal at different modulation frequency

的关系是线性的。并且, 器件随调制频率增加到 3 kHz 时, 信号大小基本不变。由于受机械斩波器的限制, 目前还没有测试更高频率调制下的电压信号。同时, 受限于太赫兹源, 更高频率的光源下器件的响应也

没有加以测试。

为准确得到探测器响应率, 用校准好的 Golay 探测器标定入射能量大小。以对 0.037 5 THz 信号响应最大的探测器为定标对象, 在调制频率 $f=100$ Hz 条件下, Golay 响应为 2 425 mV, 除以 Golay 探测器 100 Hz 的响应率 5×10^3 V/W, 得到入射到 Golay 探测器表面上的功率为 0.49 mW, 而探测器对于该 0.037 5 THz 信号的响应为 3 mV, 考虑到探测器有效接收面积约等于 Golay 探测器接收面积的 1/1 000, 放大器放大倍数为 1 000, 则可以得到探测器的响应率为 $S_v=6$ V/W (不考虑放大器增益)。另一方面, 对于该钢镓砷太赫兹探测器, 其噪声来源主要有热噪声(起源于器件材料的热起伏, 电子的热运动所产生), 产生-复合噪声(钢镓砷中载流子的产生和复合在平均值附近变化导致产生-复合噪声), $1/f$ 噪声(钢镓砷探测器作为电子器件, 在低调制频率时出现的额外噪声)。通过实验, 用锁相测得探测器件的噪声约为 $10 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, 从而可得噪声等效功率为 $1.6 \times 10^{-9} \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。由图 9 可以得出在调制频率为 3 kHz 时, 器件响应没有下降, 说明探测器响应时间至少优于 300 μs 。

5 结论

文中实验研究了基于窄禁带半导体钢镓砷材料的太赫兹波探测性能, 在 MOCVD 外延生长的组分 x 为 0.53 掺杂 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}/\text{InP}$ 薄膜上制作了多个天线耦合的敏感元尺寸约为 $(30 \sim 110) \times 50 \mu\text{m}^2$ 的探测器, 搭建了一套器件响应测试系统, 并对 0.037 5 THz (8 mm) 信号进行了性能测试。实验结果表明, 探测器室温工作等效噪声功率约为 $1.6 \times 10^{-9} \text{ W}/\text{Hz}^{1/2}$, 探测器的响应率约为 6 V/W (调制频率 100 Hz 下), 同时测量探测器的响应速度明显优于 Golay 探测器。通过 HFSS 软件进行了多种耦合天线的仿真, 仿真结果表明实验中所使用的耦合天线和探测元在 0.037 5 THz 时能良好的阻抗匹配, 并提供约 1.7 dB 的天线增益。在探测器设计和工艺制作优化后, 可充分发挥其响应速度快, 探测灵敏, 室温工作等特点并利用红外焦平面阵列集成技术实现用于物理研究、实时成像、安检和通信等太赫兹技术应用场合。

参考文献:

- [1] Grossman E N, Dietlein C R, Chisum J, et al. Spectral

- decomposition of ultrawideband terahertz imagery [C]//SPIE, 2007, 6548: 654807.
- [2] Liu Jia, Fan Wenhui. Investigation of various fabrics in terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1537–1541. (in Chinese)
刘佳, 范文慧. 常见服装面料的太赫兹光谱研究 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1537–1541.
- [3] Li Fan, Shi Yanli, Zhao Lusheng, et al. Simulation and calculation of I–V characteristics of GaAs MESFET in THz detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 40(7): 1205–1208. (in Chinese)
李凡, 史衍丽, 赵鲁生, 等. 太赫兹探测用 GaAs MESFET I–V 特性模拟计算[J]. 红外与激光工程, 2013, 40(7): 1205–1208.
- [4] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97–105.
- [5] Wei J, Olaya D, Krasik B S, et al. Ultrasensitive hot-electron nanobolometers for terahertz astrophysics [J]. *Nature Nanotechnology*, 2008, 3(8): 496–500.
- [6] Glaab D, Lisauskas A, Bappel S, et al. Terahertz heterodyne detection with silicon field-effect transistors [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(4): 042106
- [7] Tarasov M, Svensson J, Kuzmin L, et al. Carbon nanotube bolometers [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(16): 163503.
- [8] Sizov F F. THz radiation sensors [J]. *Opto-Electronics Review*, 2010, 18(1): 10–36.
- [9] Takazato A, Kamakura M, Matsui T, et al. Detection of terahertz waves using low-temperature-grown InGaAs with 1.56 μm pulse excitation[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 101119.
- [10] Kasalynas I, Venckevicius R, Valusis G. Continuous wave spectroscopic terahertz imaging with InGaAs bow-tie diodes at room temperature [J]. *Sensors Journal IEEE*, 2013, 13(1): 50–54.