

滤波器增强的高灵敏度室温 HEMT 太赫兹探测器

孙云飞¹, 陶重霖¹, 孙建东², 秦华², 班建民¹, 罗恒¹

¹苏州科技大学电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009;

²中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所纳米器件与应用重点实验室, 江苏 苏州 215123

摘要 制备了一种集成有太赫兹低通滤波器的高速、高灵敏度 GaN/AlGaIn 高电子迁移率晶体管(HEMT)太赫兹探测器。实验研究表明,当在太赫兹天线与引线电极之间加入低通滤波器时,太赫兹耦合天线的谐振性能恢复,室温下器件的响应度达到了 1.05×10^3 V/W;测试带宽为 1 Hz 时,器件的噪声等效功率达到了 4.7×10^{-11} W。利用该探测器单元对不同材料进行了快速扫描成像,结果表明,该探测器单元具有较好的成像分辨率,且器件的响应速度优于商用的气动探测器的和热释电探测器的。

关键词 探测器; 太赫兹; 高电子迁移率晶体管; 滤波器; 扫描成像

中图分类号 TL814; TN386.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0304001

Filter-Enhanced High-Sensitivity HEMT Terahertz Detector at Room Temperature

Sun Yunfei¹, Tao Chongben¹, Sun Jiandong², Qin Hua², Ban Jianmin¹, Luo Heng¹

¹School of Electronic & Information Engineering, Suzhou University of Sciences and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China;

²Key Laboratory of Nanodevices and Applications, Suzhou Institute of Nano-tech and Nano-bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215123, China

Abstract A terahertz detector of GaN/AlGaIn high electron mobility transistor (HEMT) with a high speed and a high sensitivity integrated with low-pass filters is fabricated. The experimental study indicates that, when the low-pass filters are added between the terahertz antennas and the lead electrode, the resonance performance of THz coupled antenna is restored. At the room temperature, the responsivity of the device reaches 1.05×10^3 V·W⁻¹, and the noise equivalent power reaches 4.7×10^{-11} W when the bandwidth is 1 Hz. This detector unit is used for the fast scanning imaging of different materials, and the results show that this detector unit has a high imaging resolution and its response speed is superior to those of the commercial pneumatic detectors and pyroelectric detectors.

Key words detector; terahertz; high electron mobility transistor (HEMT); filter; terahertz imaging

OCIS codes 040.1880; 230.0040; 110.6795; 350.2450

1 引 言

太赫兹波辐射具有光子能量低、穿透力强、高频和超短脉冲(皮秒量级)等特性,在材料科学、安全检查、环境监测、通信等诸多领域得到广泛应用^[1-8]。太赫兹探测技术是太赫兹波应用的核心技术之一,基于不同材料和不同探测原理的太赫兹波探测器应

运而生。现有的探测器主要有超导隧道结探测器^[9]、硅测辐射热计^[10]、肖特基二极管^[11]、碳纳米管测辐射热计^[12]以及量子点探测器^[13]。这些探测器普遍存在灵敏度低、响应速度慢、需要在低温下工作等诸多缺点。因此,室温、高速和高灵敏度太赫兹探测器成为当前研究热点之一。近年来,有关室温太赫兹探测器方面的报道越来越多,探测器朝着频率

收稿日期: 2017-08-10; 收到修改稿日期: 2017-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(61401297,61401456)、江苏省自然科学基金(BK20140283)、苏州市科技局项目(SYG201708)、中国科学院纳米器件与应用重点实验室开放课题(14ZS05)

作者简介: 孙云飞(1982—),男,博士,讲师,主要从事太赫兹物理、器件及应用等方面的研究。

E-mail: yfsun2009@sinano.ac.cn

可调、噪声低、价格低廉和可在室温下工作的方向发展^[14-16],且出现大量具有耦合天线结构的太赫兹探测器,这些天线主要有双极子耦合天线^[17]、矩形平板天线^[18]、对数天线^[19]等。2009年,Öjefors等^[20]在室温下借助尺寸为 $390\ \mu\text{m}\times 440\ \mu\text{m}$ 的平板对称天线,利用GaAs二极管对频率为200 GHz的太赫兹波进行了探测,其室温下的响应度可以达到 $150\ \text{V/W}$ 。2010年,日本松下公司利用80 nm的T型栅GaN/AlGaIn-高电子迁移率晶体管(HEMT)器件,对频率为1 THz的电磁波进行了探测,其室温下的响应度达到了 $1100\ \text{V/W}$ ^[21]。2011年,本课题组提出了一种基于三极子碟形天线的自混频GaN/AlGaIn HEMT太赫兹探测器,室温下器件的响应度达到了 $250\ \text{V/W}$ ^[22]。为了进一步提高探测器的响应度,本课题组将该太赫兹探测器单元与硅透镜集成,制备出了响应度为 $4.5\ \text{kV/W}$ 的太赫兹探测器模组^[23],相对于太赫兹探测器单元,器件的响应度提高了约18倍,这主要是由硅透镜对太赫兹波的聚集增强效应所引起的。因此要进一步提高探测器模组的响应度,就必须提高探测器单元的响应度,而太赫兹天线的耦合效率是影响探测器单元响应度的主要因素之一。针对太赫兹天线耦合效率较低的问题,本文设计并制备了一种带有太赫兹低通滤波器的高灵敏度GaN/AlGaIn HEMT太赫兹探测器单元(未集成硅透镜),室温下该器件的响应度达到了 $1.05\times 10^3\ \text{V/W}$,测试带宽为1 Hz时,器件的噪声等效功率达到了 $4.7\times 10^{-11}\ \text{W}$ 。同时,利用该探测器单元对不同材料的物体进行了透射和反射扫描成像演,结果表明,探测器的成像分辨率达到了亚毫米量级,且器件的灵敏度和响应速度均优于商用的气动探测器(高莱管)的和热释电探测器的。

2 自混频探测机理及仿真计算

图1所示为自混频太赫兹探测器的工作原理图^[24],其中 V_{ds} 为源漏电压, I_{ds} 为源漏电流, I_{pc} 为光电流。根据自混频探测机理可知,在频率为 $\omega = 2\pi f$ (f 为入射太赫兹波的频率),能流密度为 P_0 的太赫兹光照射下,太赫兹天线会在栅下二维电子气处分别感应出平行和垂直于沟道的横向电场 $E_x = \dot{\xi}_x E_0 \cos\omega t$ 和纵向电场 $E_z = \dot{\xi}_z E_0 \cos(\omega t + \phi)$,其中 E_0 为自由空间太赫兹电场, $\dot{\xi}_x = d\xi_x/dx$ 和 $\dot{\xi}_z = d\xi_z/dz$ 分别为横向电场和纵向电场的增强因

子, ϕ 为横向电场和纵向电场的相位差, t 为时间。入射太赫兹波能流密度 P_0 和自由空间阻抗 Z_0 的关系可表示为 $P_0 = E_0^2/(2Z_0)$ 。因此,太赫兹光电流^[22]可表示为

$$I_o = Z_0 P_0 \frac{dG_0}{dV_{\text{geff}}} A_0 = Z_0 P_0 \frac{W}{L} \mu \frac{dC_g}{dV_{\text{geff}}} A_0, \quad (1)$$

式中 W 为器件的沟道宽度; L 为探测器的栅长; μ 为材料中电子的迁移率; $G_0 = \mu \frac{W}{L} C_g$ 为零偏压下器件的电导, $C_g = \epsilon/\bar{z}$ 为单位面电容(其中 ϵ 为材料的平均介电常数, \bar{z} 为栅极与沟道内二维电子气之间的有效距离); $V_{\text{geff}} = V_g - V_{\text{th}} - V_x$ 为沿沟道距离栅极左侧 x 处的有效栅压(定义栅极左侧 $x=0$,右侧 $x=L$), V_x 为沿沟道方向、距离栅极左侧 x 处的太赫兹感应电压, V_g 和 V_{th} 分别为外加栅极电压和阈值电压; $A_0 = \int_0^L \dot{\xi}_x \dot{\xi}_z \cos\phi dx - \int_0^L \dot{\xi}_x \dot{\xi}_z dx$ 为探测器的结构因子,用以表征天线对太赫兹电场的增强能力。

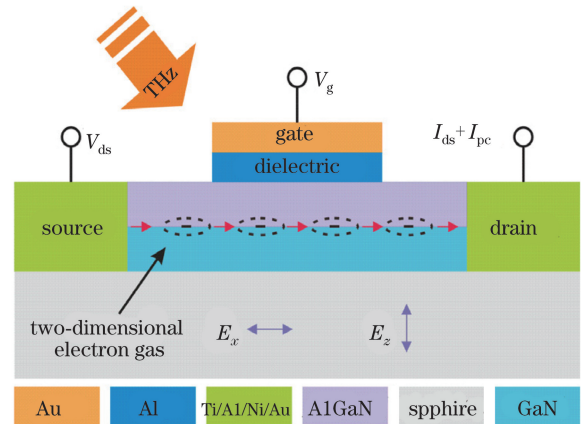


图1 自混频探测器的工作原理图^[24]

Fig. 1 Working principle of detector based on self-mixing mechanism^[24]

探测器正常工作时,无需施加源漏电流,探测器噪声以热噪声为主。热噪声电流谱密度^[22]为

$$N_i = \sqrt{4\kappa TG}, \quad (2)$$

式中 κ 为玻尔兹曼常数, T 为HEMT探测器的温度, G 为沟道电导。由热噪声电流密度限制的噪声等效功率可表示为

$$P_{\text{NEP}} = \frac{N_i}{R_i}, \quad (3)$$

式中 R_i 为器件的光电流响应度。

从(1)式可以得出,在太赫兹光强一定的情况下,光电流的大小主要取决于器件的电导 G_0 和探测器的结构因子 A_0 ,因此,在相同功率的太赫兹光源,

且器件的天线特征参数(天线结构、栅长和源漏天线间距)确定的情况下,天线的耦合效率越高,探测器的响应度就越高。

图 2(a)中插图是针对场效应自混频特点所开发的高效非对称碟形耦合太赫兹天线,该天线结构由源极天线 S(尺寸为 $45 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$,材料为金),漏极天线 D和栅极天线 G三部分构成^[22-25]。图 2(b)中插图是碟形耦合太赫兹天线,其通过直导线跟引线电极相连。图 2(c)中插图是通过太赫兹低通滤波器跟引线电极相连的天线。太赫兹天线的谐振性能越好,意味着探测器的响应度越高,但是在与外部测试电路连接并测试时,外部引线电极和太赫兹天线之间的连接方式必然会影响到天线的谐振性能,因此,利用有限时域差分法(FDTD)通过 CST MicroWave Studio 仿真软件对上述三种连接方式下太赫兹天线的结构因子分别进行了仿真计算。如图 2(a)所示,当太赫兹天线没有跟外部引线电极相连时,太赫兹天线在栅下二维电子气处的结构因子约为 2×10^4 ,而且共振峰在 1 THz 左右。如图 2(b)

所示,当太赫兹天线通过直导线跟引线电极相连时,太赫兹天线的谐振性能受到较大的影响,频率为 1 THz 处的结构因子受到较强的削弱,从原来的 2×10^4 减小到 4.5×10^3 左右,同时在频率约为 0.2 THz 处出现一个低频响应峰。说明外部引线电极发挥了低频耦合天线的作用,在太赫兹波的照射下通过直导线把低频耦合信号引入到栅极附近,而频率为 1 THz 的高频耦合信号则通过直导线泄露到外部引线电极上,造成了高频耦合信号的耗散,极大地降低了探测器的响应度。因此,在三极子蝶形耦合天线的每瓣天线跟外部引线电极之间均插入了一个类似于二维弹簧的太赫兹低通滤波器。制备的太赫兹低通滤波器的扫描式电子显微镜(SEM)图如图 2(d)所示,滤波器通过电子束曝光技术、电子束蒸发和剥离工艺制备,线条的宽度为 150 nm,每两个线圈的间距为 500 nm。通过仿真计算,发现高频信号的结构因子又恢复到原来的强度,而且低频信号也基本消失。因此,只要滤波器的尺寸设计合理,就能较好地保证器件的响应度和灵敏度。

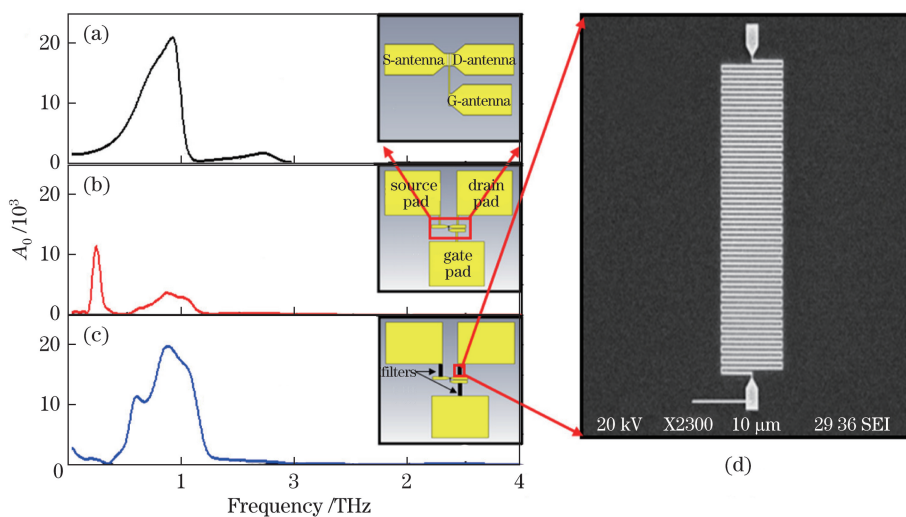


图 2 (a)~(c)不同器件的结构因子;(d)滤波器的 SEM 图

Fig. 2 (a)-(c) Structure factors of different devices; (d) SEM image of filter

滤波器不仅能保证太赫兹天线和引线电极之间的物理连接,而且能够较好地隔离天线和外部引线电极之间的信号干扰,从而保证器件的探测效率。但是,由于滤波器是由纳米级的金属线圈构成,线圈匝数越多,器件的加工成本越高,且器件的合格率越小。通过 FDTD 仿真计算,发现天线的结构因子随着滤波器线圈匝数 n 的增加而增大,如图 3 所示,当线圈匝数增加到 50 时,基本可以保证天线具有良好的谐振性能。因此,本文所使用的滤波器的线圈匝数为 50。

3 实验结果和讨论

3.1 探测器的制备

为了分析滤波器对探测器探测效率的影响,在 GaN/Al_{0.27}Ga_{0.73}N 材料上制备了两个具有相同三极子蝶形天线结构的探测器,其材料的室温迁移率为 $1400 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,二维电子气的浓度(单位面积内的粒子数)为 $1.3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$,欧姆接触电阻率为 $3 \times 10^{-5} \Omega/\text{cm}^2$ 。整个器件的制备过程主要包括有源区隔离、欧姆接触制备、滤波器制备和耦合天线及

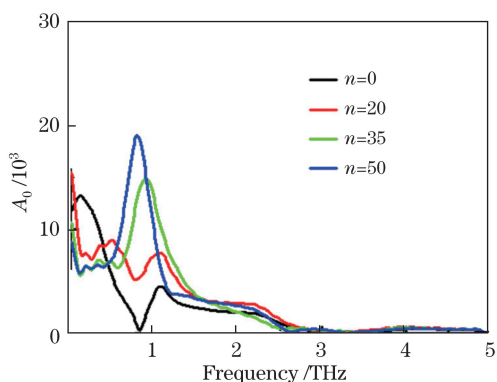


图 3 滤波器的频率响应曲线

Fig. 3 Frequency response curves of filters

引线电极制备 4 步工艺。经第一步紫外(UV)光刻和离子束刻蚀(IBE)等工艺对二维电子气进行台面隔离,形成有源区;通过第二步 UV 光刻、电子束蒸发、金属剥离和快速退火(N₂环境下 900 °C 退火)等工艺形成源、漏欧姆接触;通过第三步电子束曝光、电子束蒸发和金属剥离制备滤波器;通过第四步 UV 光刻、电子束蒸发和金属剥离制备三极子耦合天线和引线电极;最后进行裂片和封装。

图 4(a)所示为采用相似的制备工艺(去除上述第三步工艺)所制备的对比探测器,其中 S-pad、D-pad、G-pad 分别表示源极引线电极、漏极引线电极和栅极引线电极。探测器 A 中的三瓣天线(源极天线、漏极天线和栅极天线)都是通过直导线直接跟引线电极相连,而图 4(b)所示探测器 B 中的三瓣天线与引线电极之间则是通过太赫兹低通滤波器相连。为了真实地测试太赫兹低通滤波器对探测器响应度的影响,除了天线跟电极的连接方式不同之外,这两个探测器所有的特征尺寸都是相同的:栅长 $L_g = 700 \text{ nm}$,源漏间距 $L_w = 3 \text{ }\mu\text{m}$,栅宽 $W = 4 \text{ }\mu\text{m}$,引线电极的尺寸 $150 \text{ }\mu\text{m} \times 150 \text{ }\mu\text{m}$,蝶形耦合天线的尺寸 $10 \text{ }\mu\text{m} \times 45 \text{ }\mu\text{m}$,且所有的工艺参数和所用的材料均相同。分别对这两个器件的电学性质和光学响应进行了测试和对比,器件的详细测试方法见参考文献[22]。

3.2 探测器的光电性能测试

探测器的性能测试设备主要包括返波管太赫兹光源、锁相放大器、电压源表、电流前置放大器和多功能测试万用表等。单色、频率可调的太赫兹光由返波管产生,输出频率在 840~930 GHz 之间连续可调。太赫兹光经斩波器调制后,再经一组离轴抛物面反射镜(OAP)进行校准,最后经分束器分束后会聚到一个铁电探测器和 HEMT 探测

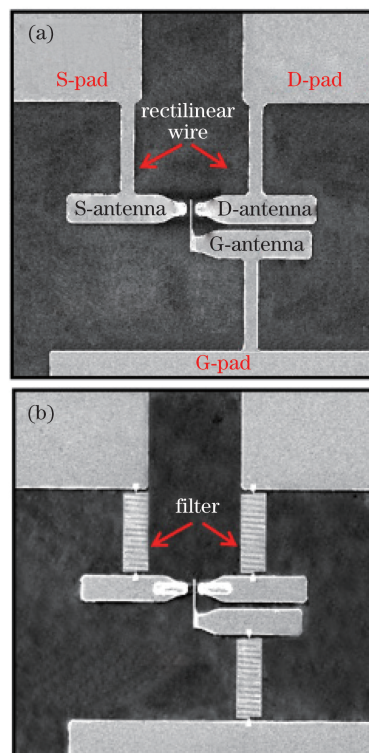


图 4 (a)探测器 A 和(b)探测器 B 的 SEM 图

器(放置于液氮杜瓦瓶中)上。其中,铁电探测器作为标准探测器用于对辐射太赫兹波的功率进行定标,探测器的光电流经电流前置放大器放大,最后通过锁相放大器输出。其光电性能测试装置示意图如图 5 所示。

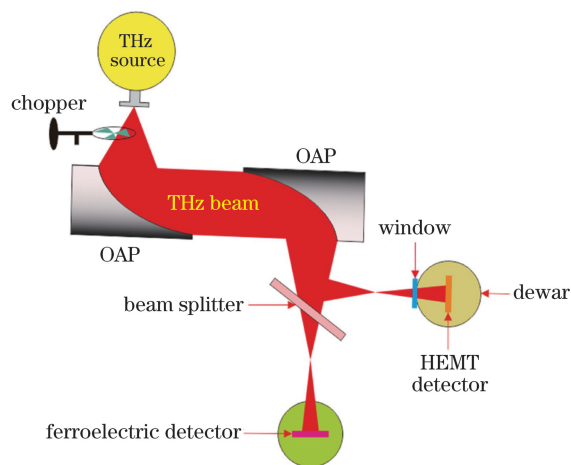


图 5 太赫兹探测器测试装置示意图

Fig. 5 Schematic of THz detector test device

首先,在室温下对上述两个器件的微分电导和微分电导的一阶导数进行了测试,图 6(a)所示为探测器的微分电导以及微分电导的一阶导数随栅压(V_g)变化的曲线。当栅压为零且无太赫兹波辐射时,由于探测器 A、探测器 B 的栅长和沟道宽度

都是相同的,故探测器 A 和探测器 B 的电导及电导的一阶导数在室温下随栅压的变化都是相同的。如图 6(b)所示,在入射功率为 78 nW,频率为 903 GHz 的太赫兹光照射下,直流光电流信号受栅压强烈调控,并正比于栅压对微分电导的一阶导数(实验结果与由自混频模型推导出的(1)式吻合较好)。器件 B 的光电流在室温下约为 1.6 nA,而器件 A 的光电流

在室温下仅为 0.4 nA 左右。实验表明,通过使用太赫兹低通滤波器,器件的光电流增加了约 4 倍,跟仿真结果(4.5 倍)吻合较好,从实验上证明了滤波器对太赫兹天线谐振性能的增强作用。当液氮加入到液氮杜瓦瓶中且器件的温度稳定后,对器件 B 的光电流也进行了测试,77 K 下器件 B 的最大光电流达到了 3 nA。

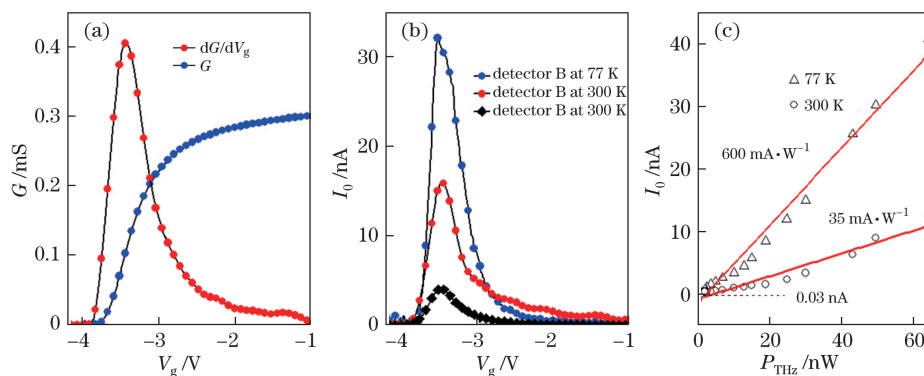


图 6 探测器的光电响应曲线。(a)G 和 dG/dV_g 随栅压的变化曲线;(b)探测器的光电流随栅压的变化曲线;(c)探测器的功率响应曲线

Fig. 6 Photoelectric response of detector. (a) G and dG/dV_g versus gate voltage; (b) photo current versus gate voltage; (c) power response of detector

图 6(c)所示为 903 GHz 下探测器 B 的响应度曲线,实验中 HEMT 探测器真实接收到的功率 $P_{THz} = \frac{V_{PE}}{R_{PE} \cdot n}$ 可由铁电探测器校准得到,其中, V_{PE} 为铁电探测器的输出电压, R_{PE} 为铁电探测器的电压响应度, n 为铁电探测器和 HEMT 探测器接收到的有效太赫兹波能量之比(实验中铁电探测器的有效接收面积为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, HEMT 探测器的有效接收面积为 $0.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$)。通过测试分析可知,器件 B 在室温下的光电流响应度为 35 mA/W , 光电电压响应度为 $1.05 \times 10^3 \text{ V/W}$, 温度为 77 K 时,光电流响应度为 600 mA/W 。由于整个测试电路的测试带宽为 5 Hz,探测器的本底噪声电流为 0.03 nA,计算可得,测试带宽为 1 Hz 时,探测器的噪声等效功率为 $4.7 \times 10^{-11} \text{ W}$ 。由于室温和低温下探测器的光电流响应度差别较大,为了在同一坐标系下准确和有效地显示所有测试数据,对图 6(b)和图 6(c)中室温(300 K)下的测试值分别乘了 10 倍和 5 倍的系数。

图 7 所示为所测得的 GaN 基 HEMT、热辐射计和热释电探测器的调制频率曲线,其中 f_M 为斩波器的调制频率。从图 7 可以看出,基于电子学的 GaN 基 HEMT 探测器响应速度远大于基于热效应的热辐射计、热释电探测器等探测器的。对于 GaN

基 HEMT 探测器,在有限的调制频率范围内(目前实验室的斩波器最高调制频率能达到 4 kHz)并没有看到信号有所减弱,说明最高调制频率 f_{max} 明显大于 4 kHz。如图 7 所示,热辐射计和热释电探测器的 -3 dB 响应带宽分别为 23 Hz 和 1.2 kHz。由于 f_{max} 与 $1/L^2$ 成正比,最高调制频率 f_{max} 随栅长的减小而迅速增大。对于 50 nm 栅长的 GaN 基 HEMT,在阈值电压附近的最高调制频率理论上可以达到 $80 \text{ GHz}^{[26]}$ 。

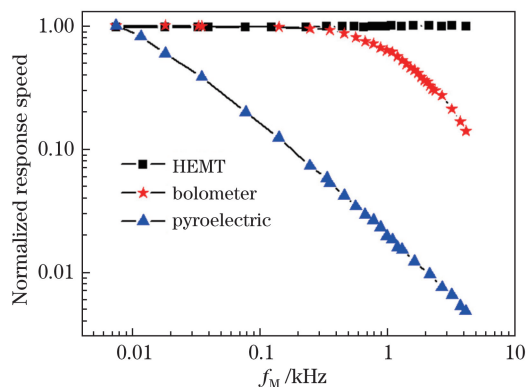


图 7 响应速度随调制频率的变化曲线

Fig. 7 Response speed versus modulation frequency

图 8(a)和图 8(b)所示分别为太赫兹扫描透射成像示意图和反射成像示意图。在透射成像系统中,返波管(频率为 903 GHz)发出的太赫兹波由两

个离轴抛物面反射镜收集并会聚到被测样品上,透过样品的太赫兹波再经由另外两个离轴抛物面反射镜会聚到太赫兹探测器上;在反射成像中,被样品反射的太赫兹波经由另外两个离轴抛物面反射镜会聚到太赫兹探测器上。在两种成像中,样品均被放置在 XY 二维电动位移平台上,并沿着焦平面作二维扫描,最终实现对被测物品的透射和反射扫描成像。

图 9 所示为 0.9 THz 光照下不同材料和结构物体的透射成像图。图 9(a)中红框为钥匙、火柴、回

形针的光学照片,黑框为太赫兹透视成像图,可以看出清晰的轮廓,具有很高的空间分辨率。图 9(b)所示为干树叶及其太赫兹波成像图片,由于叶片和叶脉所含水分不同,厚度也不同,故太赫兹波透过树叶的透射率也就不同,因此可以比较清晰地看到叶脉。太赫兹扫描成像的一个重要的用途就是对生物体组织成像的同时不破坏其结构,是一种非接触处式的成像技术,太赫兹射线光子的能量很低,成像时不会对样品造成损害。

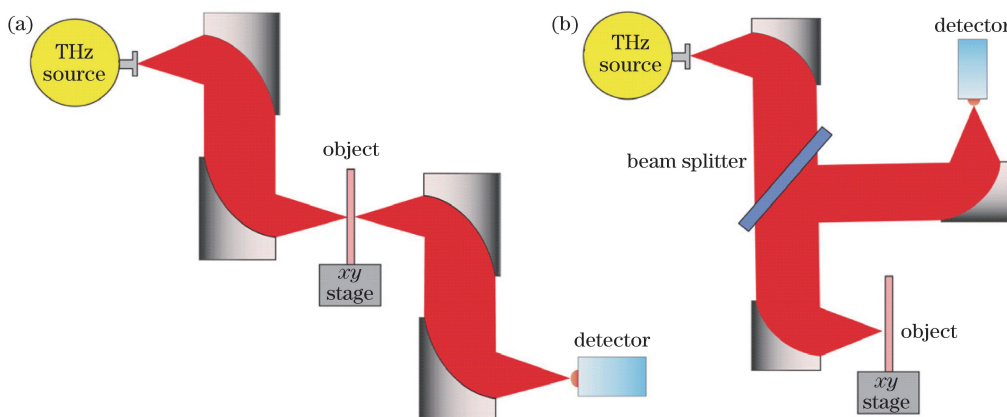


图 8 太赫兹扫描成像示意图。(a)透射成像;(b)反射成像

Fig. 8 Schematic of THz scanning imaging. (a) Transmission imaging; (b) reflection imaging

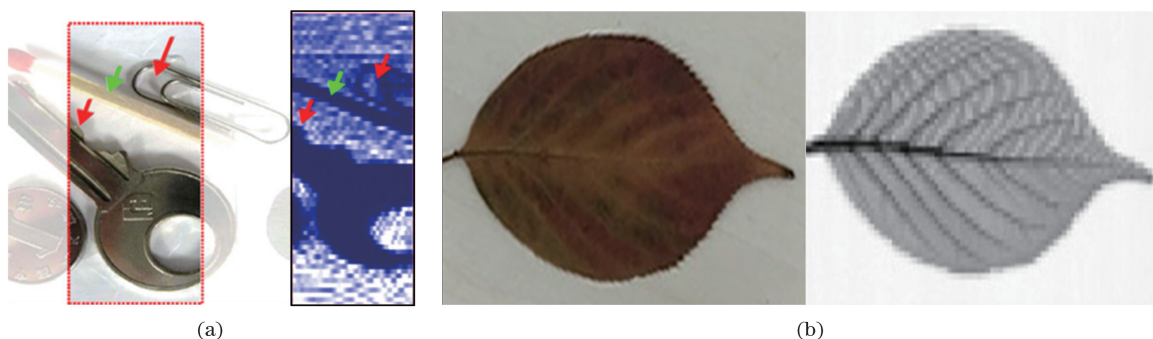


图 9 透射扫描成像。(a)钥匙、火柴和别针;(b)干树叶

Fig. 9 Transmission scanning imaging. (a) Key, match and pin; (b) dry leaf

图 10 所示为手术刀片的反射成像图。将手术刀置于粗糙的牛皮上,利用图 8(b)所示的成像系统进行成像实验,结果显示手术刀清晰可见,牛皮反射的微弱信号也能被清晰分辨。

从以上不同材料与结构物品的扫描反射和透射成像质量来看,所设计的高速、高灵敏度的室温太赫兹探测器单元完全适用于实际太赫兹成像应用。因此,太赫兹成像将会在不同的场合发挥巨大作用。

4 结 论

制备了一种基于太赫兹低通滤波器和三极子耦

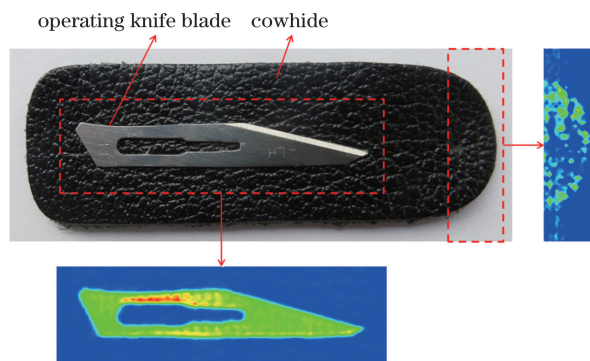


图 10 置于牛皮上的手术刀的太赫兹扫描反射成像图

Fig. 10 THz reflection scanning imaging of operating knife placed on cowhide

合天线的高速、高灵敏度 GaN/AlGaIn HEMT 室温太赫兹波探测器。实验研究表明,当用太赫兹低通滤波器代替太赫兹天线和引线电极之间的直导线时,器件的光电流从 0.4 nA 增大到了 1.6 nA,室温下器件的响应度达到了 1.05×10^3 V/W,测试带宽为 1 Hz 时,器件的噪声等效功率为 4.7×10^{-11} W。同时,利用该探测器单元对不同材料的物体进行了透射和反射扫描成像实验,结果表明,探测器的成像分辨率达到了亚毫米量级,且器件的响应速度优于商用的热敏探测器。

致谢 感谢中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所吴东岷研究员对本论文的指导。

参 考 文 献

- [1] Dyakonov M I, Shur M S. Shallow water analogy for a ballistic field effect transistor: New mechanism of plasma wave generation by dc current[J]. *Physical Review Letters*, 1993, 71(15): 2465-2468.
- [2] Dyakonov M I, Shur M S. Plasma wave electronics: Novel terahertz devices using two dimensional electron fluid[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1996, 43(10): 1640-1645.
- [3] Dmitriev A P, Kachorovskii V Y, Shur M S. Plasma wave instability in gated collisionless two-dimensional electron gas[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 79(7): 922-924.
- [4] Lü J Q, Shur M S. Terahertz detection by high-electron-mobility transistor: Enhancement by drain bias[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(17): 2587-2588.
- [5] Knap W, Deng Y, Romyantsev S, *et al.* Resonant detection of subterahertz radiation by plasma waves in a submicron field-effect transistor[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 91(11): 9346-9353.
- [6] Li M Q, Tan Z Y, Qiu F C, *et al.* Fast reflective scanning imaging based on terahertz quantum-cascade laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0611004. 李孟奇, 谭智勇, 邱付成, 等. 基于太赫兹量子级联激光器的反射式快速扫描成像[J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0611004.
- [7] Wang H Q, Liu X, Deng C, *et al.* An antenna can be used for terahertz scanning imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0711004. 王汉奇, 刘鑫, 邓朝, 等. 一种可用于太赫兹扫描成像的天线[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0711004.
- [8] Qin H, Huang Y D, Sun J D, *et al.* Terahertz-wave devices based on plasmons in two-dimensional electron gas[J]. *Chinese optics*, 2017, 10(1): 51-67. 秦华, 黄永丹, 孙建东, 等. 二维电子气等离激元太赫兹波器件[J]. *中国光学*, 2017, 10(1): 51-67.
- [9] Nahum M, Martinis J M. Ultrasensitive-hot-electron microbolometer[J]. *Applied Physics Letters*, 1993, 63(22): 3075-3077.
- [10] Richards P L. Bolometers for infrared and millimeter waves[J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 76(1): 1-24.
- [11] 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.
- [12] Tarasov M, Svensson J, Weis J, *et al.* Carbon nanotube based bolometer[J]. *JETP Letters*, 2006, 84(5): 267-270.
- [13] Kawano Y, Fuse T, Toyokawa S, *et al.* Terahertz photon-assisted tunneling in carbon nanotube quantum dots[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(3): 034307.
- [14] Otsuji T, Hanabe M, Ogawara O. Terahertz plasma wave resonance of two-dimensional electrons in InGaP/InGaAs/GaAs high-electron-mobility transistors[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(11): 2119-2121.
- [15] Fatimy A E, Tepe F, Dyakonova N, *et al.* Resonant and voltage-tunable terahertz detection in InGaAs/InP nanometer transistors[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(13): 131926.
- [16] Ryzhii V, Ryzhii M, Hu Y, *et al.* Resonant detection of modulated terahertz radiation in micromachined high-electron-mobility transistor[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(20): 203503.
- [17] Shitov S V, Jackson B D, Baryshev A M, *et al.* A low-noise double-dipole antenna SIS mixer at 1 THz[J]. *Physica C: Superconductivity*, 2002, 372/376(12): 374-377.
- [18] Balasekaran S, Endo K, Tanabe T, *et al.* Patch antenna coupled 0.2 THz TUNNETT oscillators[J]. *Solid-State Electronics*, 2010, 54(12): 1578-1581.
- [19] Kim S, Zimmerman J D, Focardi P, *et al.* Room temperature terahertz detection based on bulk plasmons in antenna-coupled GaAs field effect transistors[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(25): 253508.
- [20] Öjefors E, Lisauskas A, Glaab D, *et al.* Terahertz imaging detectors in CMOS technology[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2009, 30(12): 1269-1280.
- [21] Tanigawa T, Onishi T, Takigawa S, *et al.* Enhanced responsivity in a novel AlGaIn/GaN plasmon-resonant terahertz detector using gate-dipole antenna with parasitic elements[C]. *Device Research*

- Conference, 2010: 167-168.
- [22] Sun J D, Sun Y F, Zhou Y, *et al.* Room temperature terahertz detectors based on HEMTs enhanced by bowtie antennas[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2011, 48(4): 215-219.
孙建东, 孙云飞, 周宇, 等. 蝶形天线增强的 HEMT 室温太赫兹探测器[J]. *微纳电子技术*, 2011, 48(4): 215-219.
- [23] Qin H, Li X, Sun J, *et al.* Detection of incoherent terahertz light using antenna-coupled high-electron-mobility field-effect transistors[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(17): 171109.
- [24] Sun J D, Sun Y F, Wu D M, *et al.* High-responsivity, low-noise, room-temperature, self-mixing terahertz detector realized using floating antennas on a GaN-based field-effect transistor[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(1): 013506.
- [25] Sun Y F, Sun J D, Zhang X Y, *et al.* Enhancement of terahertz coupling efficiency by improved antenna design in GaN/AlGaIn high electron mobility transistor detectors[J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(10): 516-521.
- [26] Kachorovskii V Y, Shur M S. Field effect transistor as ultrafast detector of modulated terahertz radiation[J]. *Solid-State Electronics*, 2008, 52(2): 182-185.