

宽带太赫兹偶极子光电导接收天线研究

潘奕^{1,2}, 郑渚¹, 丁庆¹, 姚勇²

(1. 深圳市太赫兹科技创新研究院, 广东 深圳 518102;
2. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院 激光信息技术研究中心, 广东 深圳 518055)

摘要: 太赫兹光电导天线广泛应用于宽带脉冲太赫兹波的检测, 是太赫兹光谱和成像系统中的重要器件。偶极子光电导天线由于其结构简单、制作容易成为使用最广泛的一类太赫兹光电导接收天线。衡量太赫兹光电导探测天线的的一个重要指标是其响应带宽。针对偶极子天线的探测带宽, 分别对天线臂长为 10、50、150 μm 的偶极子天线及一种作为对比的 178 μm 的蝶形天线(Bowtie antenna)进行了实验及理论研究。结果显示其探测带宽随天线臂长增加而减小, 与微波天线理论一致。进一步的, 采用商用电磁场数值仿真软件进行建模仿真, 仿真结果与理论及实验结果具有很好的一致性, 证实数值仿真已在很大程度上模拟出实际天线的特性, 从而为优化结构参数制作大宽带和高灵敏度的太赫兹天线提供支持。同时, 对超半球硅衬底透镜对天线接收频谱的影响也进行了探讨。

关键词: 太赫兹; 光电导天线; 太赫兹时域光谱; 太赫兹探测器

中图分类号: TN821+.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0125002

Dipole photoconductive antennas for broadband terahertz receiver

Pan Yi^{1,2}, Zheng Zhu¹, Ding Qing¹, Yao Yong²

(1. Shenzhen Institute of Terahertz Technology and Innovation, Shenzhen 518102, China;
2. Laser Information Technology Research Center, Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Terahertz (THz) photoconductive antennas (PCAs) are widely used in the detection of broadband pulsed terahertz waves and are important components in THz spectroscopy and imaging systems. Due to its simple structure and ease of fabrication, the dipole photoconductive antenna is the mostly used antenna for THz receivers. The primary specification of THz antennas is the bandwidth. To study the detection bandwidth of PCAs, dipole antennas with the arm length of 10, 50 and 150 μm and a bowtie antenna with the arm length of 178 μm were studied theoretically and experimentally. The results showed that the detection bandwidth decreased with the increase of the antenna arm length, which is consistent with the microwave antenna theory. Further, a commercial electromagnetic field numerical software was used for simulation. The results were in good agreement with the theoretical and experimental results and the model could be able to predict the performance of actual THz PCAs. The simulation can be used to design broadband and high sensitive THz antennas by optimizing structural parameters. The use of a hyper-hemispherical silicon substrate lens on the back of the receivers was also studied.

Key words: terahertz; photoconductive antenna; terahertz time-domain spectroscopy; terahertz detector

收稿日期: 2018-08-05; 修订日期: 2018-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(61505183, 61575051); 中国博士后科学基金(2017M611363)

作者简介: 潘奕(1986-), 男, 博士, 主要从事太赫兹光谱技术方面的研究。Email: panyi@huaxunchina.cn

通讯作者: 郑渚(1984-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事太赫兹科学与技术方面的研究。Email: zzealot99@gmail.com

0 引言

太赫兹(Terahertz, THz)辐射是指频率在 0.1~10 THz(波长在 30~3 000 μm)之间的电磁波,是介于毫米波与红外线之间的电磁辐射区域。近 20 年来,基于超快飞秒激光激发的太赫兹时域光谱仪(THz time-domain spectroscopy, THz-TDS)因其具有超宽谱、高相干性、高信噪比和相位信息直接获取的优势^[1],在材料研究^[2]、生命科学^[3]、安全检查^[4]和无损探测^[5]等领域取得了广泛的应用。

太赫兹光电导天线(Photoconductive antennas, PCAs)作为目前最可靠和最易集成的太赫兹器件之一,广泛应用于太赫兹时域光谱仪中,作为太赫兹发射器或者探测器^[6]。光电导天线探测器通常由短载流子寿命的高电阻率半导体衬底和覆盖在衬底上的金属天线组成。飞秒激光脉冲激发衬底产生的自由电子-空穴对使桥接天线的半导体间隙导通,在平行于天线臂的太赫兹电磁场的驱动下,形成电流。通过使用光延迟线调整激光脉冲到达 PCAs 的时间,从而在时域上映射出入射的 THz 电磁波^[7]。

表征光电导天线太赫兹探测器的基本指标为信噪比和带宽。用于太赫兹光电导天线探测器的衬底材料必须具有较短的载流子寿命,从而有效降低噪声,提高信噪比。低温砷化镓(Low-temperature-grown GaAs, LT-GaAs)由于在晶体内部形成缺陷,其载流子具有高迁移率和亚皮秒寿命的优点,同时其带隙为 1.43 eV,可使用钛宝石超快激光或通过倍频的掺 Er 光纤飞秒激光在 780 nm 波段激发太赫兹波,是绝大多数实验室和商用 THz-TDS 仪器中的常用材料^[8]。光电导天线的带宽主要由两个因素决定,一个因素是激光脉冲宽度与载流子寿命,在 0~3 THz 范围内,激光脉冲宽度对天线带宽起决定性作用,而载流子寿命影响较小^[9],因此为获得大带宽,需采用较短时间宽度的脉冲激光(<100 fs)以增加探测带宽;影响光电导天线探测带宽的另一个重要因素是金属天线结构在频带内的不均匀响应,会对接收到的太赫兹波产生滤波效应,从而限制光电导天线的探测带宽,因此,如何设计具有更宽频谱响应的天线结构对增加太赫兹光电导天线的探测谱宽至关重要。

早期针对宽带 THz PCAs 结构的研究工作包括

Dykaar 等人的对数螺旋天线研究^[10]和 Gitin 等人的对数周期性天线研究^[11]等,这类天线在小于 100 GHz 频段具有高响应度、多带宽、多谐振峰等特征。而 Auston 天线^[12-13],即偶极子天线,因其结构高度简单,制作容易且稳定性好,在太赫兹时域光谱研究及产品中被广泛使用,至今仍在使用的很多 THz PCAs 采用了这种结构。然而,偶极子天线具有明显的共振频率特征,带宽响应较窄,是限制 THz-TDS 系统的带宽和高频探测信号的主要原因之一。

所以,针对太赫兹偶极子光电导天线探测器,进行天线结构设计和优化,提高其带宽及高频响应,将有利于增加 THz-TDS 系统的分析带宽,这对太赫兹在化学、生物、材料等领域的研究具有重要意义。由于太赫兹波具有较强的微波特性,可利用成熟的微波工程理论来研究设计多频或宽带天线结构,从而提高太赫兹波探测的效率。同时,半导体载流子性质在 THz 探测中影响重大,天线仿真和半导体载流子作用特性必须结合考虑。文中将针对太赫兹偶极子光电导探测天线进行实验、理论及仿真研究。

1 实验设置及天线参数

1.1 实验设置

文中使用 THz-TDS 系统对光电导探测天线进行实验测量。文中所使用的 THz-TDS 系统,激发光源为光纤型 780 nm 超快激光器,重复频率为 100 MHz,脉宽为 100 fs (Menlo System ELMO780)。激光通过分光片分成两束,分别用于激发发射和接收天线,用于太赫兹发射和接收天线的光功率均为 20 mW。通过 20 \times 物镜,两束激光分别聚焦到太赫兹光电导发射和接收天线上,聚焦光斑直径约为 4 μm ($1/e^2$)。实验中充入氮气以排除水气的吸收。

太赫兹发射器采用的是以 LT-GaAs 为衬底的共平面波导天线(Coplanar waveguide antenna),天线线宽为 10 μm ,分开间隔为 50 μm 。用于激发发射器的激光光斑聚焦在靠近正极的位置,这样可以借用准静电场效应以增强太赫兹发射功率^[7]。太赫兹发射器两极间施加的偏压为 50 V。厚度为 6.1 mm、直径为 10 mm 的超半球高阻硅衬底透镜用于聚拢发射器天线发出的太赫兹辐射。

发射器发出的太赫兹波在经过四个金属抛物面

镜后,被聚焦到太赫兹探测天线上,在探测天线未加入超半球硅衬底透镜的情况下,聚焦光斑约为5 mm。实验中,分别测量了未加入及加入超半球硅衬底透镜的太赫兹探测天线的频谱响应。为保证硅衬底透镜的聚焦效果,实验中精确调整透镜位置以获得最优信号。

1.2 天线参数

文中研究的光电导探测天线衬底为半绝缘砷化镓(semi-insulating GaAs, SI-GaAs)衬底上生长的低温砷化镓(LT-GaAs)材料。半绝缘砷化镓衬底厚度约为600 μm , LT-GaAs 厚度约为1 μm ,其中100 nm厚的AlAs的缓冲层将SI-GaAs和LT-GaAs相连。通过光学泵浦-THz探测(Optical pump-THz probe)实验系统测得LT-GaAs载流子俘获时间约为0.4 ps,电子迁移率约为3000 cm^2/Vs 。

THz探测天线结构如图1(a)所示。电极由厚度为20 nm的金属钛和200 nm的金属金使用光刻和剥离技术制备而成。实验中测量了 L_m 分别为10、50、150 μm 的偶极子天线,以及作为对比的 L_m 为178 μm 的蝶形天线。 L_s 为光电导间隙宽度,均为5 μm 。天线臂宽度 d 和传输线宽度 w 分别为20、10 μm 。图1(b)为在光学显微镜下获得的几种天线照片。

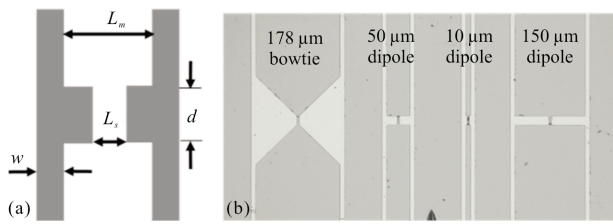


图1 (a)天线结构示意图;(b)LT-GaAs衬底上四种不同的天线结构显微图像

Fig.1 (a) Sketch of antenna; (b) microscope image of four antennas on LT-GaAs substrate

天线探测灵敏度(动态范围)由信号幅度的峰峰值与单位带宽的均方根(Root-mean-square, RMS)噪声的比值决定。信号幅度峰峰值正比于光电导率 $\sigma = n_0 e \mu_e$,其中 n_0 为载流子数, e 为电子电量, μ_e 为电子迁移率。衬底噪声主要由约翰逊热噪声决定,可表示为:

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{4k_B T \Delta f}{R}} \propto \sqrt{n_0 \mu_e \tau} \quad (1)$$

式中: k_B 为玻耳兹曼常数; Δf 为检测带宽; R 为天线间隙的平均光电阻值; n_0 为载流子数。文中测试的LT-GaAs光电导接收器为高暗电阻天线,暗电阻约为100 $\text{M}\Omega$,相应的暗热噪声小于100 $\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。使用锁相放大器,设置积分时间为300 μs ,可以测得在激光激发条件下的热噪声,在20 mW的激光激发下,天线平均电阻约为10 $\text{M}\Omega$,相应的热噪声约为600 $\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

2 结果与讨论

图2(a)给出了不同天线在未加硅衬底透镜时的时域信号。50 μm 的偶极子天线接收到的太赫兹的峰峰值信号幅度为5.9 nA,约为10 μm 偶极子的峰峰值信号2.5 nA的2倍,50 μm 偶极子天线具有更大响应的主要原因之一在于较长的天线臂 L_m 。而具有更长天线臂长 $L_m=150 \mu\text{m}$ 的偶极子天线峰峰值信号相对50 μm 偶极子较低,仅有3 nA,原因在于150 μm 天线的探测带宽较窄,限制了该天线接收到的太赫兹波能量。作为对比的蝶形天线探测到的信号峰峰值为6 nA,与50 μm 偶极子天线相当。

图2(b)是图2(a)中的时域信号经过傅里叶变换后的频谱图。由图可见,相比其他天线,10 μm 的偶极子天线的带宽显著更宽,10%幅度带宽约为0.1~2.5 THz。50 μm 的偶极子天线的10%幅度带宽约为0.1~1.5 THz,频谱峰值约为0.6 THz,而150 μm 偶极子天线的带宽更窄,只有约0.1~1 THz,峰值约0.3 THz。作为对比的蝶形天线的响应带宽与150 μm 的偶极子天线相当。对于偶极子天线,其探测带宽随 L_m 的增加而变窄,这与理论一致。

根据微波理论,偶极子天线的谐振频率 $\nu(n)$ 为:

$$\nu(n) = \frac{nc}{2L\sqrt{\epsilon^*}} \quad (2)$$

式中: $n=1,2,3,\dots$; ϵ^* 为有效介电常数; c 为自由空间光速,天线有效长度 $L=L_m+2w$ 。假设均匀GaAs衬底的条件下,即 $\epsilon^*=13$,当 $n=1$ 时,50 μm 和150 μm 的偶极子天线的第一个谐振频率分别为0.59 THz和0.24 THz,与实验结果较为一致。10 μm 的偶极子天线在低频响应较低,其第一谐振峰的理论值为1.39 THz。

为对天线测量结果进行验证,文中对几种实验测试天线进行了仿真,仿真工具为商用数值电磁场

软件 CST Microwave Studio。仿真中采用 Drude 模型对太赫兹探测区域的半导体材料进行参数设置,以模拟真实材料在太赫兹波段的特性。LT-GaAs 光电导材料设置区域为 $5\ \mu\text{m}\times 5\ \mu\text{m}\times 1\ \mu\text{m}$, 等离子角频率为 $2\times 10^{14}\ \text{rad/s}$, 散射时间为 55 fs。天线金属材料采用完美导体(PEC)近似。仿真中天线的几何参数与实验测试中一致, 仿真总区域大小为 $1\ \text{mm}\times 1\ \text{mm}\times 0.5\ \text{mm}$, 在仿真中被划分为约 8×10^7 个格子。采用平面波入射激发, 检测探头设在光电导天线间隙中央, 用于读取天线接收的太赫兹电磁场特性。仿真中未使用硅透镜。

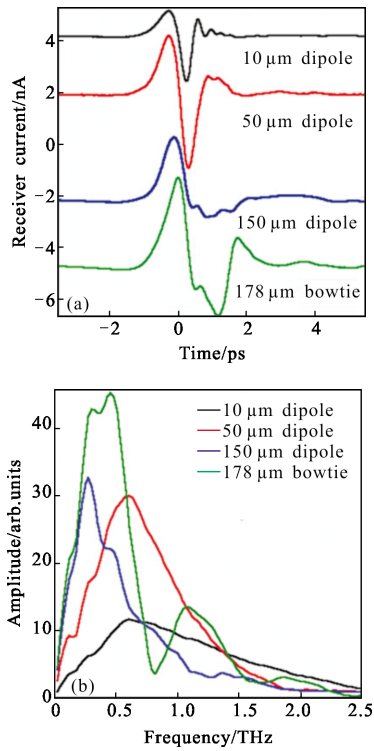


图 2 (a) 实验测量获得的不同天线的太赫兹时域信号; (b) 傅里叶变换后的光谱信号

Fig.2 (a) THz time-domain waveforms from different antennas obtained by experiments; (b) spectral signal after Fourier transfer

图 3(a) 是仿真结果, 三种偶极子天线和蝶形天线均有较强的周期频谱响应特性。仿真显示, $10\ \mu\text{m}$ 的偶极子天线第一个共振频率在 $1.33\ \text{THz}$, 而 $50\ \mu\text{m}$ 的第一个共振频率在 $0.73\ \text{THz}$ 。 $150\ \mu\text{m}$ 偶极子天线与 $178\ \mu\text{m}$ 蝶形天线的共振频率较为接近, 约为 $0.25\ \text{THz}$, 与理论值有较好一致性。

由于在实验中无法获知发射天线发出的太赫兹电磁场的实际频谱, 所以在进行实验与仿真结果的数值对比时, 采用 $10\ \mu\text{m}$ 的偶极子天线频谱响应作为参考信号, 将 $50\ \mu\text{m}$ 和 $150\ \mu\text{m}$ 的偶极子、 $178\ \mu\text{m}$ 的蝶形天线分别与 $10\ \mu\text{m}$ 的偶极子天线进行对比, 分析其相对频谱响应。由于测量噪声影响, 实验中 $3.5\ \text{THz}$ 以上的数据置信度较差, 故数值对比频率上限设置为 $3.5\ \text{THz}$ 。对比结果见图 3(b)~(d), 从图中可见实验数据与仿真数据较为一致。 $50\ \mu\text{m}$ 偶极子天线在 $1.2\ \text{THz}$ 以下有较高响应, 而在 $1.2\sim 3.5\ \text{THz}$ 波段相比 $10\ \mu\text{m}$ 天线响应较差, 这与天线的周期性谐振频率有关。 $150\ \mu\text{m}$ 的偶极子和 $178\ \mu\text{m}$ 的蝶形天线在 $0.6\ \text{THz}$ 以下有显著更高的响应, 因此针对 $0.6\ \text{THz}$ 以下的较低频段进行测量时, 使用 L_m 较宽的偶极子和蝶形天线较为合适。实验与仿真结果的一致性证明了仿真模型可以提供天线响应的准确图像, 对天线的设计及优化具有指导意义。

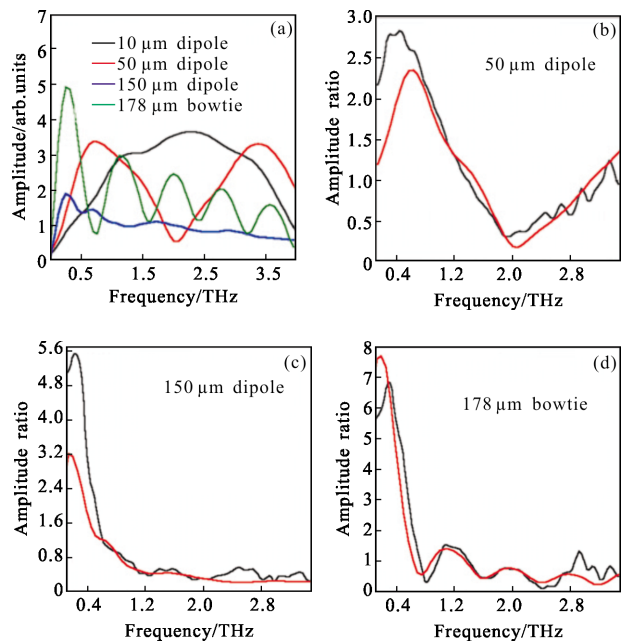


图 3 (a) 几种太赫兹天线的仿真结果; (b) $50\ \mu\text{m}$ 偶极子; (c) $150\ \mu\text{m}$ 偶极子; (d) $178\ \mu\text{m}$ 蝶形天线与未使用硅透镜 $10\ \mu\text{m}$ 偶极子天线比较得到的频率响应, 黑: 实验结果, 红: 仿真结果

Fig.3 (a) Simulation results of several THz antenna. Ratio of the frequency response of other antennas to the $10\ \mu\text{m}$ dipole antenna without a silicon lens, (b) $50\ \mu\text{m}$ dipole, (c) $150\ \mu\text{m}$ dipole and (d) $178\ \mu\text{m}$ bowtie, black: experimental results, red: simulation results

最后,考虑硅衬底透镜对频谱的影响。硅衬底透镜对太赫兹波有较强的聚焦作用。Grishchowsky 首先使用硅衬底透镜来提高 THz-TDS 系统性能^[7],后续很多学者对硅衬底透镜进行了大量的研究,包括准直硅透镜和超半球硅透镜等^[14-15]。文中对硅衬底透镜对太赫兹频谱的影响进行了实验测量。

使用超半球硅衬底透镜后测得的太赫兹频谱如图 4 所示,图 4(a)显示了增加硅衬底透镜聚焦后天线接收到的太赫兹时域波形。实验中,太赫兹波形受硅透镜位置的影响较大,为取得最大信号,硅透镜的

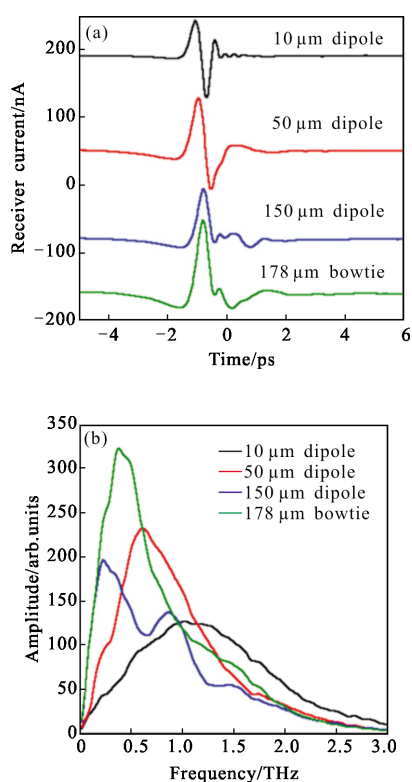


图 4 (a)加入硅衬底透镜后的太赫兹时域信号;(b)傅里叶变换后的频域信号

Fig.4 Measurements with a silicon lens on the back of the receiver;
(a) Time-domain waveforms from the different antennas;
(b) Spectra of the waveforms shown in (a)

位置调整范围需控制在数微米以内,可见太赫兹通过硅透镜后的聚焦光斑应小于数十微米。硅透镜可以极大地增强天线接收信号,10 μm 偶极子接收到的太赫兹信号峰峰值提高了近 40 倍,约为 100 nA,50 μm 偶极子的峰峰值约为 130 nA。图 4(b)显示接收到的太赫兹光谱也因硅透镜而改变。四个不同结构

的天线的带宽普遍增强,对于 10 μm 偶极子,峰值频率约为 1.0 THz,10%幅值带宽增加到约 3 THz。高频分量增强的原因在于 THz 聚焦光斑直径与频率成反比,故对于高频分量,焦斑中心处能量更加集中。

图 5 为太赫兹 10、50、150 μm 偶极子和 178 μm 蝶形天线在使用硅衬底透镜和无硅透镜时的频谱对比。由于幅值差异较大,分别对信号进行了归一化处理。

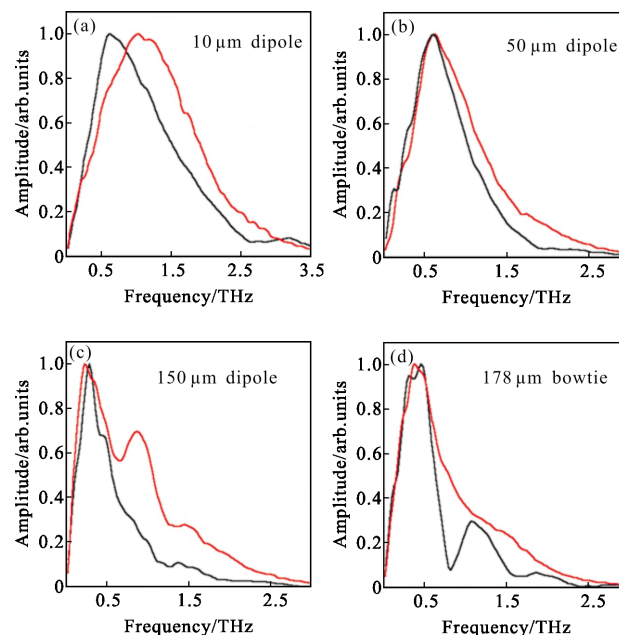


图 5 加入硅衬底透镜(红线)和未加入衬底透镜(黑线)的实验测量光谱信号对比(a)10 μm、(b)50 μm、(c)150 μm 偶极子天线和(d)178 μm 蝶形天线

Fig.5 Measurement spectral results with (red line) and without (black line) a silicon lens of (a) 10 μm dipole antenna, (b) 50 μm dipole antenna, (c) 150 μm dipole antenna and (d) 178 μm bowtie antenna

理,可以观察到硅透镜并未改变 50 μm 和 150 μm 的偶极子天线和 178 μm 的蝶形天线的峰值频率,其峰值仍然分别位于约 0.6、0.3、0.4 THz 的位置。而对于 10 μm 的偶极子天线,使用硅衬底透镜对其频谱有影响,其峰值频率发生一些偏移,其原因在于 10 μm 的天线谐振频率较高,而硅透镜聚焦对较低频段的天线接收能量影响相对较小,却能显著增强高频接收能量的特性有关。

3 结束语

设计和制作了三种臂长分别为 10、50、150 μm

的偶极子天线和一种 178 μm 的蝶形天线,对其探测带宽及灵敏度进行了实验和理论研究。结果显示:偶极子天线的探测带宽随天线臂长增加而变窄,其谐振频率峰值与微波天线理论具有良好一致性,同时数值仿真结果与理论及实验结果吻合。这说明为获得更大的探测带宽和较高的高频探测灵敏度,需采用天线臂较短的偶极子天线作为探测天线;而若要获得较低频段的更高响应,则天线臂较长的偶极子天线或蝶形天线是更好的选择。超半球硅衬底透镜因其强聚焦的特性,可用于提高太赫兹探测天线的灵敏度和带宽。此研究对太赫兹偶极子探测天线的设计及参数优化有指导意义,可在太赫兹时域光谱系统中发挥重要作用。

参考文献:

- [1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97-105.
- [2] Han Xiaohui, Cui Hongliang, Zhang Jin, et al. Accurate and rapid extraction of optical parameters for thin plates with terahertz time-domain spectroscopy technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5): 0525003. (in Chinese)
韩晓惠, 崔洪亮, 张瑾, 等. 太赫兹时域光谱技术用于准确快速地提取薄片的光学参数 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(5): 0525003.
- [3] Li Han, Yu Chen. Terahertz spectral detection in human renal tissue [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0525001. (in Chinese)
李晗, 余晨. 太赫兹波对肾癌组织的光谱检测 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(5): 0525001.
- [4] Xie Qi, Yang Hongru, Li Hongguang, et al. Explosive identification based on terahertz time-domain spectral system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 34(10): 2392 (in Chinese)
解琪, 杨鸿儒, 李宏光, 等. 基于太赫兹时域光谱系统的爆炸物识别[J]. *光学精密工程*, 2016, 34(10): 2392.
- [5] Zhang Xutao, Sun Jinhai, Cai He, et al. Quiet zone measurements and data processing of THz-TDS experiment system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1125003. (in Chinese)
张旭涛, 孙金海, 蔡禾, 等. 太赫兹时域光谱系统静区测试及数据处理[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(11): 1125003.
- [6] Burford N M, Elshenawee M O. Review of terahertz photoconductive antenna technology [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(1): 010901.
- [7] Van Exter M, Grischkowsky D. Characterization of an optoelectronic terahertz beam system [J]. *Microwave Theory & Techniques IEEE Transactions on*, 1990, 38(11): 1684-1691.
- [8] Xu Ming, Li Mengxia, An Xin, et al. Infrared quenching operation of non-linear GaAs photoconductive semiconductor switch for terahertz generation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0425001. (in Chinese)
徐鸣, 李孟霞, 安鑫, 等. 红外淬灭非线性砷化镓光电导开关产生太赫兹的实验研究 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(4): 0425001.
- [9] Winnerl S, Peter F, Nitsche S, et al. Generation and detection of THz radiation with scalable antennas based on GaAs substrates with different carrier lifetimes [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2008, 14(2): 449-457.
- [10] Dykaar D R, Greene B I, Federici J F, et al. Log-periodic antennas for pulsed terahertz radiation [J]. *Applied Physics Letters*, 1991, 59(3): 262-264.
- [11] Gitin M M, Wise F W, Arjavalingam G, et al. Broad-band characterization of millimeter-wave log-periodic antennas by photoconductive sampling [J]. *Antennas & Propagation IEEE Transactions on*, 1994, 42(3): 335-339.
- [12] Darrow J T, Hu B B, Zhang X C, et al. Subpicosecond electromagnetic pulses from large-aperture photoconducting antennas [J]. *Optics Letters*, 1990, 15(6): 323.
- [13] Darrow J T, Zhang X C, Ippen D H. Saturation properties of large-aperture photoconducting antennas [J]. *Quantum Electronics IEEE Journal of*, 1992, 28(6): 1607-1616.
- [14] Mittleman D M, Rudd J V. Influence of substrate-lens design in terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2002, 19(2): 639-640.
- [15] Nguyen T K, Rotermund F, Park I. A traveling-wave stripline dipole antenna on a substrate lens at terahertz frequency [J]. *Current Applied Physics*, 2014, 14(8): 998-1004.