

文章编号: 1672-8785(2011)12-0027-04

小孔径螺旋型光电导天线的太赫兹辐射特性研究

胡宜芬¹ 邓 琥¹ 夏祖学¹ 陈 琦² 尚丽平¹

(1. 西南科技大学信息工程学院, 四川 绵阳 621010;

2. 中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 研究了小孔径螺旋型光电导天线的太赫兹辐射特性。利用太赫兹时域光谱技术测量了螺旋型光导天线辐射的太赫兹波谱, 得到了其时域发射光谱。通过快速傅里叶变换得到相应的频域光谱, 同时对两种不同孔径螺旋天线的太赫兹辐射特性进行了比较。实验结果表明, 太赫兹信号强度会随偏置电压的增大而增强; 在偏置电压和泵浦光功率相同的情况下, 较小孔径的光导天线的辐射功率较高。

关键词: 太赫兹辐射; 光电导天线; 时域光谱技术; 低温生长砷化镓

中图分类号: O431.1; O433.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.12.006

Study of Performance of Terahertz Radiation of Small-aperture Spiral Photoconductive Antenna

HU Yi-fen¹, DENG Hu¹, XIA Zu-xue¹, CHEN Qi², SHANG Li-ping¹

(1. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The characteristics of terahertz (THz) radiation of small-aperture spiral photoconductive antennas are studied. By using the THz time-domain spectroscopy to measure the THz radiation spectra of a spiral photoconductive antenna, its time-domain emission spectra are obtained. Then, the corresponding frequency domain spectra are obtained via fast Fourier transform. At the same time, the THz radiation characteristics of two spiral photoconductive antennas with different apertures are compared with each other. The experimental result shows that the intensity of a THz signal can be enhanced with the increase of bias voltage. For same bias voltage and pump power, the photoconductive antenna with a smaller aperture has a higher radiation power.

Key words: THz radiation; photoconductive antenna; time-domain spectroscopy; LT-GaAs

0 引言

太赫兹 (THz) 辐射一般是指频率在 0.1 ~ 10 THz (波长为 30 μm ~ 3 mm) 之间的电磁波, 它在

电磁波谱中处于红外光与微波之间的区域。20 世纪 80 年代中期以后, 半导体技术和超快激光技术的发展为 THz 辐射提供了稳定、可靠的激发光源和较为简便的探测方法, 促进了 THz 辐

收稿日期: 2011-10-24

基金项目: 中国工程物理研究院重点项目资助

作者简介: 胡宜芬 (1987-), 女, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要从事太赫兹时域光谱技术研究。

E-mail: shangcheng0510@163.com

射的产生及其应用的蓬勃发展。人们已经提出了很多种用于产生和探测 THz 辐射的方法,并通过具体实验对其进行了验证。目前应用较为广泛的方法是利用飞秒脉冲泵浦加偏置电压的光电导天线产生 THz 辐射^[1]。近年来,国内外已经有很多关于光电导天线作为 THz 辐射源的相关报道。光电导天线一般分为大孔径光导天线和小孔径光导天线两大类。其中,小孔径天线具有有效谱宽较宽,可长时间稳定工作,工作电压较低以及安全性高等优点,但是其最大缺点是辐射信号强度较弱。因此,研究如何提高小孔径天线的辐射效率具有十分重要的意义。而小孔径螺旋天线具有宽频辐射,性能稳定,发射功率较大和方向性较好等特点^[2-4]。1990 年, Pastol 等人^[5]对对数螺旋天线的时域瞬态辐射特性进行了研究。1999 年, Saijo 等人^[6]对螺旋天线的频域特性进行了分析。我们主要研究偏置电压对螺旋形小孔径天线的辐射效率的影响和两种不同孔径天线的辐射特性的比较情况。

1 光电导天线辐射 THz 脉冲的机理

光电导天线辐射 THz 脉冲的机理是,飞秒激光脉冲照射半导体材料的光电导天线,产生的瞬间载流子在偏置电压的作用下加速运动,从而辐射出 THz 波^[7]。假设天线两端所加的静态偏置电场为 E_b , 当没有激光照射时,光导天线处于高阻截止状态;当用超快激光脉冲照射天线时,天线半导体材料内的光激发载流子会在偏置电场的作用下作加速运动,产生瞬变光电流 J_s , 其表达式为

$$J_s(t) = \sigma(t)E_b / \left[1 + \frac{\sigma(t)\eta_0}{(1 + \sqrt{\epsilon_r})} \right] \quad (1)$$

式中, $\sigma(t)$ 为半导体材料的电导率,由激发光的光强 I_0 决定; η_0 为自由空间的磁导率, $\eta_0 = 377 \Omega$; ϵ_r 为半导体的相对介电常数。由欧姆定律可得:

$$J_s(t) = \sigma(t)[E_b + E_r(t)] \quad (2)$$

式中, $E_r(t)$ 为瞬变电流在近场条件下所辐射的 THz 电场:

$$E_r(t) = -E_b \sigma(t)\eta_0 / \left[(1 + \sqrt{\epsilon_r}) + \sigma(t)\eta_0 \right] \quad (3)$$

在远场条件下,电流脉冲的 THz 辐射强度也与瞬变电流的微分具有相同的形式。假设 THz 光源各处的偏置电场和载流子是等值的,探测方向为光电导天线的法线方向,测量点与光电导天线的距离远大于波源的尺寸,则可得到其远场辐射场强 $E_{rad}(t)$ 的表达式为

$$E_{rad}(t) \cong -\frac{A}{4\pi\epsilon_0 c^2 z} \frac{dJ_s(t)}{dt} \quad (4)$$

式中, A 为光导天线的有效辐射面积, ϵ_0 为真空介电常数, c 为真空中的光速, z 为观察点到光导天线的距离。

2 小孔径螺旋形光电导天线的 THz 时域光谱系统

实验所使用的两个小孔径螺旋形光电导天线的衬底均为低温生长的砷化镓材料,其电极间距分别为 $14 \mu\text{m}$ 和 $34 \mu\text{m}$ 。实验中搭建的 THz 时域光谱系统使用的光源为中心波长为 800 nm 、脉宽为 30 fs 、重复频率为 75 MHz 、平均输出功率为 320 mW 的钛宝石自锁模飞秒激光器。图 1 所示为该系统的光路图。其中,飞秒激光(Fs Laser)经过分束镜(CBS)后分成两束光:一束作为泵浦光通过延迟系统(Stage)和透镜 L1 后聚焦到光导天线(PCA)上产生 THz 辐射, THz 辐射由两个镀金离轴抛物面镜(PM1、PM2)准直聚焦到 ZnTe(110)晶体上;另一束作为探测光通过反射镜 M7/M8、透镜 L2 和偏振片 P 并由硅片(Si Wafer)反射到 ZnTe 晶体的同一位置上,携带 THz 信息的探测光经过反射镜 M9 和透镜 L3 后聚焦到自动平衡检测仪(ABL100)上。ABL100 由一个四分之一波片、一个渥拉斯顿棱镜和一个光电探头组成。ABL100 输出信号至锁相放大器(Lock-in)。锁相放大器输出一个具有一定频率的 TTL 电平,其通过放大器(Amplifier)放大后作为偏置电压被加到光导天线的两级。该交流电压信号可代替斩波器的调制信号,在锁相放大器采集信号时作为参考信号进行锁相积分计算,然后由计算机采集并显示出来。实验在温度为 25° 、相对湿度为 50% 的条件下进行。

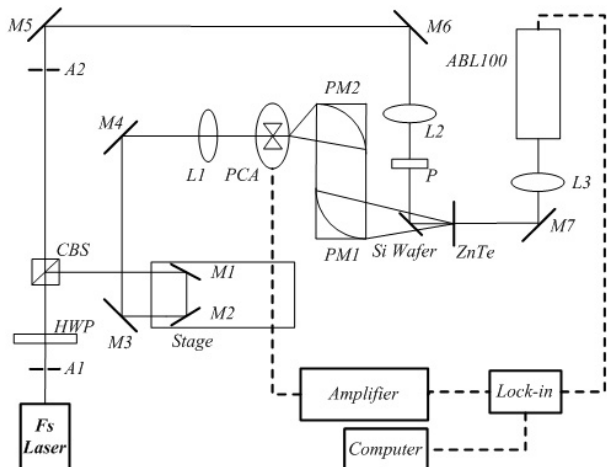
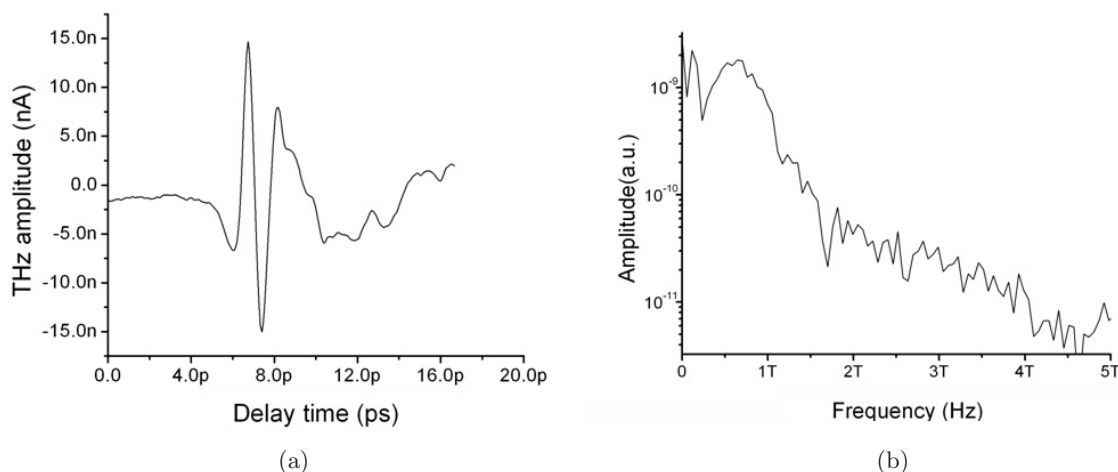


图 1 THz-TDS 系统的光路图

3 实验结果及分析

3.1 小孔径螺旋型光电导天线的辐射光谱

图 2 (a) 小孔径螺旋型光导天线 ($14\ \mu\text{m}$) 辐射的 THz 时域光谱；(b) 对应的 THz 频域光谱

3.2 偏置电压对小孔径螺旋型光电导天线辐射特性的影响

以电极间隙为 $14\ \mu\text{m}$ 的螺旋型光导天线为例。固定泵浦光的功率为 $200\ \text{mW}$ ，改变偏置电压大小，保持其他实验条件不变。通过对比辐射 THz 信号光谱，可以得到图 3 所示的 THz 辐射随偏置电压的变化情况。从图 3 中可以看出，产生的 THz 辐射的强度基本上与偏置电场成正比，这与式 (1) 相吻合。将图 3 转换为图 4 所示的频域光谱。从图 4 中可以看出，随着偏置电压的增大，辐射 THz 波的频谱峰峰值也增大。因为半

我们以电极间隙为 $14\ \mu\text{m}$ 的螺旋型天线为例，对其发射光谱进行测量。实验中，固定偏置电压为 $45\ \text{V}$ ，偏置电压频率为 $6.6\ \text{kHz}$ ，泵浦激光的功率为 $200\ \text{mW}$ ，探测光的功率为 $30\ \text{mW}$ ，所用 $\text{ZnTe}(110)$ 晶体的厚度为 $2\ \text{mm}$ 。图 2(a) 所示为实验所得的时域光谱。图 2(b) 所示为经快速傅里叶变换后得到的频域光谱，其频带宽度为 $1.5\ \text{THz}$ 。

从图 2(a) 中可以看出，小孔径螺旋天线的辐射波形远比目前报道的偶极子天线和蝶形天线的辐射波形复杂，其在一个主脉冲后有一个扫频。由天线间隙产生的瞬变光电流沿着螺旋天线的两臂向外流动。在此过程中，高频成分先辐射，低频成分后辐射。

导体内部载流子的加速运动会随着偏置电压的增强而加快，从而产生更强的瞬变电流，所以辐射 THz 波的强度也越大。继续提高偏置电压，以期得到更强的 THz 辐射并进一步验证 THz 辐射强度与偏置电压大小的线性关系。但是随着偏置电压的继续增高，光电导天线的发热量也急速增加，这将会导致光导天线被击穿而损坏。因此，通过增加偏置电压提高 THz 辐射强度会受到所用半导体材料的击穿阈值的限制。

3.3 电极间隙为 $34\ \mu\text{m}$ 的天线的击穿电场研究

固定泵浦激光的功率为 $200\ \text{mW}$ 。电极间隙为 $34\ \mu\text{m}$ 的天线辐射 THz 波的峰峰值会随偏置

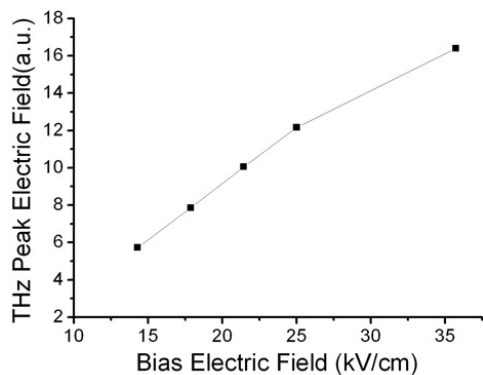


图 3 不同偏置电场下产生的 THz 波峰 - 峰值电场

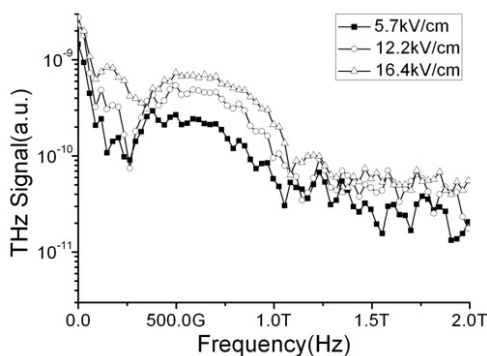


图 4 不同偏置电场下产生的 THz 波频域光谱

电压的增加而变大。但当偏置电压增至 60 V 时, 天线出现击穿现象。图 5 所示为天线击穿后在显微镜下放大 100 倍得到的图像。从图 5 中可以看出, 击穿部分不在电极间隙位置上。因为天线间隙很小, 泵浦光光斑不能被完全聚焦到电极间隙位置上。加偏压时, 旋臂间隙较小位置上的偏置电场比电极间隙位置上的高很多, 导致旋臂间隙较小位置被击穿。此时, 击穿电场为 50 kV/cm。

3.4 两种小孔径螺旋型天线的辐射特性比较

我们研究了电极间隙分别为 14 μm 和 34 μm 的两种小孔径螺旋型光导天线的辐射特性。固定泵浦激光的功率为 200 mW, 偏置电压为 50 V, 并在其他外界条件都相同的情况下进行了实验。图 6 所示为得到的两种天线辐射的 THz 波的时域波形。从图 6 中可以看出, 在相同条件下, 电极间距为 14 μm 的天线的辐射信号较强。因为在激光功率与偏置电压相同的情况下, 电极之间的间距越小, 两个电极之间的激光功率密度与电场强度就越大, 所以半导体内产生的

光生载流子数量也越多, 而且其加速运动也越剧烈, 导致辐射 THz 信号的强度增大。

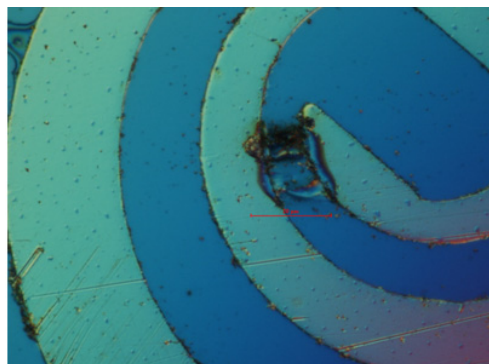


图 5 34 μm 天线击穿后的显微镜放大图

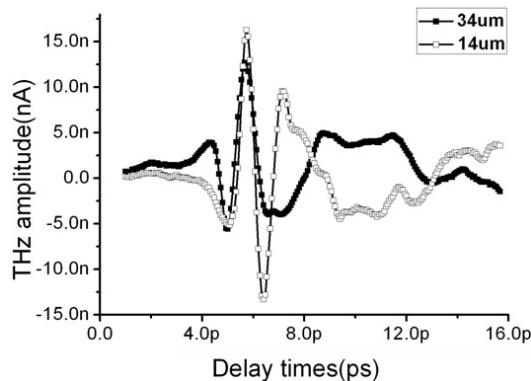


图 6 两种天线辐射的 THz 时域波形

4 结论

本文设计并搭建了一套基于小孔径螺旋型光电导天线的 THz-TDS 系统, 得到了其辐射的 THz 时域及频域光谱。然后分析了偏置电压强度对天线辐射特性的影响, 并对电极间隙分别为 14 μm 和 34 μm 的两种小孔径螺旋型光导天线的辐射特性进行了比较。实验结果表明, 天线的 THz 辐射功率会随着偏置电压的增大而增强; 在偏置电压与泵浦光功率相同的情况下, 不同电极间隙的螺旋型天线的间隙越小, 其辐射信号强度越大。

参考文献

- [1] Geizutis A, Krotkus A, Bertulis K, et al. Terahertz Radiation Emitters and Detectors [J]. *Optical Materials*, 2008, 30(2): 786-788.

(下转第 44 页)