

# 用飞秒激光触发 GaAs 光电导体产生 THz 电磁波的研究\*

施 卫<sup>1</sup> 张显斌<sup>1</sup> 贾婉丽<sup>1</sup> 李孟霞<sup>1</sup> 许景周<sup>2</sup> 张希成<sup>2</sup>

(1 西安理工大学应用物理系, 西安 710048)

(2 美国伦斯勒理工学院应用物理与天文系, 纽约州特洛伊市, 1218023590, 美国)

**摘要:** 报道了用半绝缘 GaAs 材料研制的光电导偶极天线在飞秒激光脉冲触发下辐射 THz 电磁波的实验结果. GaAs 光电导偶极芯片的两个欧姆接触电极间隙为 3mm, 采用 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 薄膜绝缘保护, 在 540V 直流偏置下被波长 800nm, 脉宽 14fs, 重复频率 75MHz, 平均功率 130mW 的飞秒激光脉冲触发时产生 THz 电磁波. 用电光取样测量得到了 THz 电磁脉冲的时域波形和频谱分布. THz 电磁波的辐射峰值位于 0.5THz 左右, 频谱宽度大于 2THz, 脉冲宽度约为 1ps.

**关键词:** GaAs 光电导偶极天线; 太赫兹电磁波; 皮秒电脉冲

**PACC:** 0660J; 5235H; 4280W

**中图分类号:** TN304.2<sup>3</sup>

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2004)12-1735-04

## 1 引言

THz 辐射通常指波长在 1mm ~ 100 $\mu$ m (300GHz~ 3THz) 之间的电磁辐射, 其波段位于微波和红外光之间. 随着超快激光技术的不断进步, 使 THz 电磁波的产生技术, THz 辐射机理的研究, THz 检测技术和应用技术得到迅速发展<sup>[1]</sup>. 目前, 产生脉冲 THz 辐射的主要方法有两种, 即光电导激发机制和光整流效应. 前者是利用超快脉冲激光触发直流偏置下的光电半导体, 因光生载流子在偏置电场作用下加速运动而辐射 THz 电磁波<sup>[2,3]</sup>. 光电导 THz 电磁辐射发射系统的性能与光电导芯片、天线的几何结构和触发激光脉冲宽度有关<sup>[1]</sup>. 其中, 光电导芯片是产生 THz 电磁波的关键部件, 性能良好的光电导芯片应该具有载流子寿命短, 迁移率高和能够承受高电压, 大电流的能力. 光整流效应是一种非线性效应, 利用亚皮秒量级激光脉冲和非线性介质(如 LiNbO<sub>3</sub>, LiTaO<sub>3</sub>, ZnTe 等)相互作用产生的低频电极化场也可以辐射出 THz 电磁波<sup>[4-6]</sup>. 用整

流效应辐射 THz 电磁波的强度和频率分布决定于激光脉冲的特征和非线性介质的性质. 由于光整流效应产生的 THz 波的能量仅仅来源于入射激光脉冲的能量, 而光电导激发机制辐射 THz 波的能量主要加载在光电导体上的偏置电场, 所以用光电导激发机制辐射的 THz 电磁波能量通常比用光整流效应产生的 THz 波能量强. 结合用半绝缘 GaAs 材料研制横向型超快光电导开关的研究经验<sup>[7-13]</sup>, 本文研制了具有条形电极结构的 GaAs 光电导偶极天线, 在 fs 超快激光脉冲触发下进行了 THz 电磁波的发射和测试实验, 得到了辐射峰值位于 0.5THz、频谱宽度大于 2THz、脉冲宽度约 1ps 的 THz 电磁波.

## 2 偶极天线结构和基本原理

半绝缘 GaAs 材料(其电阻率可达 10<sup>7</sup>~ 10<sup>8</sup> $\Omega \cdot$ cm, 击穿场强达 250kV/cm)具有优良的电、光性能, 是制作光电导偶极天线的理想材料. 本文选用半绝缘 GaAs 作为光电导偶极天线芯片材料, 其暗态电阻率  $\rho > 5 \times 10^7 \Omega \cdot$ cm, 载流子浓度  $n \approx 10^{14} \text{cm}^{-3}$ , 电

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 10390160, 10376025)

施 卫 男, 1957 年出生, 教授, 博士生导师, 从事固态电子器件的设计、研制以及相关教学工作. Email: swshi@mail.xaut.edu.cn

2004-08-08 收到

©2004 中国电子学会

子迁移率  $\mu > 5500\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ , 芯片的厚度为  $0.6\text{mm}$ , 外型尺寸为  $6.0\text{mm} \times 9.0\text{mm}$ ; 用电子束蒸发工艺淀积厚度为  $900\text{nm}$  的  $\text{Au}/\text{Ge}/\text{Ni}$  合金电极 (条形天线), 经退火处理与  $\text{GaAs}$  晶片形成欧姆接触, 电极尺寸为  $6\text{mm} \times 3\text{mm}$ , 圆角半径为  $1.1\text{mm}$ , 两电极间隙为  $3.0\text{mm}$ ; 其绝缘保护采用  $\text{Si}_3\text{N}_4$  绝缘薄膜, 与通常的钝化保护层相同, 其结构如图 1 所示.

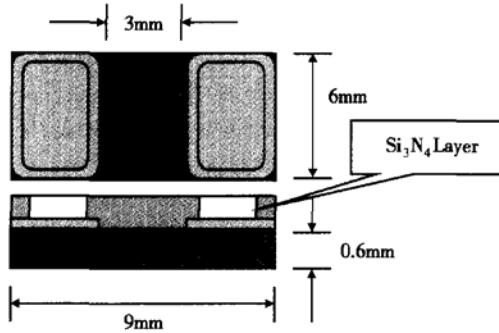


图 1 条形电极结构 GaAs 光电导偶极芯片示意图  
Fig. 1 Chip of GaAs dipole antenna

与光电导开关类似, 基于光电导激发机制的 GaAs 光电导偶极天线也是利用超短激光脉冲在 GaAs 材料中产生电子-空穴来实现对材料电导率的调制. 如果光电导偶极芯片两电极之间的直流偏置电场为  $E_b$ , 无光照时芯片处于高阻截止状态. 当用超快激光脉冲照射芯片时, GaAs 芯片内的光激发载流子在偏置电场作用下作加速运动, 形成瞬态电流  $J_s$ . 载流子的加速运动将以偶极辐射方式发射 THz 电磁波, 光脉冲每照射芯片一次, GaAs 光电导偶极天线便辐射一个 THz 脉冲电磁波, 其示意图如图 2 所示.

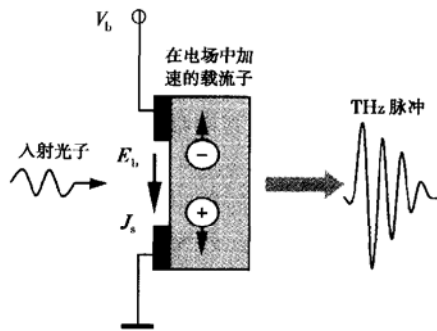


图 2 GaAs 光电导偶极天线辐射 THz 电磁波示意图  
Fig. 2 Schematic of THz radiation from dipole antenna

### 3 实验

触发实验及测试系统主要由飞秒脉冲激光器, 及作为 THz 辐射装置的 GaAs 光电导偶极天线, THz 辐射探测和时间延迟控制系统组成, 如图 3 所示. 钛宝石飞秒激光器输出平均功率为  $300\text{mW}$ , 脉宽为  $14\text{fs}$ , 脉冲重复频率为  $75\text{MHz}$ , 波长为  $800\text{nm}$ . 激光脉冲经过分束镜 BS 分为两束, 一束激光脉冲 (触发光脉冲) 经过偏振片  $P_1$  起偏, 斩波器 C 调制后, 通过时间延迟线入射到透镜  $L_1$ , 聚焦到 GaAs 光电导偶极天线, 通过光电导激发机制产生 THz 脉冲. THz 脉冲经过离轴抛物面镜系统聚焦到  $2\text{mm}$  (110) 电光晶体 ZnTe 上. 另一束激光脉冲 (探测光脉冲) 经过偏振片  $P_2$  起偏和透镜  $L_2$  聚焦, 经过反射镜在 ZnTe 晶体上聚焦到同一位置.

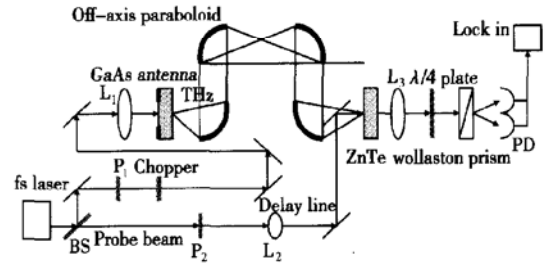


图 3 用 GaAs 光电导偶极天线产生 THz 电磁波的实验测试系统  
Fig. 3 Experiment setup of THz radiation from GaAs dipole antenna

如果没有 THz 脉冲信号, 由光电二极管 PD 探测到的两束偏振光大小相等, 通过锁相放大器检测到的输出为零. 当 GaAs 光电导偶极天线发射 THz 脉冲时, THz 脉冲与探测脉冲在电光晶体 ZnTe 中相遇, 探测脉冲的偏振态被 THz 脉冲电场调制, 在锁相放大器中产生与 THz 脉冲电场成比例的电流输出. 通过时间延迟装置改变探测脉冲与 THz 脉冲的光程差, 使探测脉冲在不同的时刻对 THz 脉冲的电场强度进行取样测量, 可以得到 THz 辐射脉冲的时域波形.

当 GaAs 光电导偶极天线两电极的直流偏置电压为  $540\text{V}$ , 入射飞秒激光脉冲经过斩波器后的平均功率为  $130\text{mW}$  时, 检测到的光电流为  $1.3\text{mA}$ , 所产生 THz 电磁脉冲的时域波形如图 4 所示, 其中右上角是该 THz 电磁脉冲的频谱分布图. 可见, THz 电

磁波的辐射峰值位于 0.5THz 左右, 频谱宽度大于 2THz, 脉冲宽度约为 1ps. 使 GaAs 光电导偶极天线两电极的直流偏置电压保持 540V 不变, 改变入射飞秒激光脉冲的平均功率, 得到 THz 辐射强度(相对值) 随入射激光功率的变化规律, 如图 5 所示.

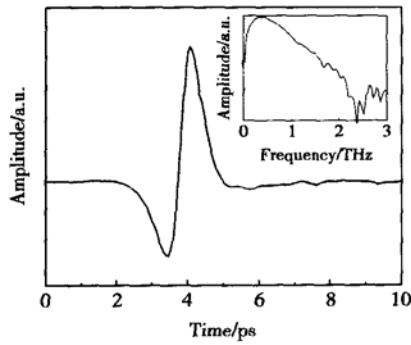


图 4 THz 电磁脉冲的时域波形

Fig. 4 THz waveform from GaAs dipole antenna

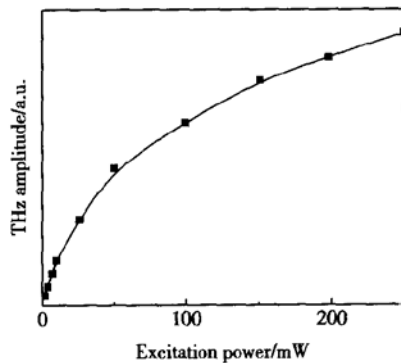


图 5 THz 电磁辐射随触发光功率的变化曲线

Fig. 5 Curve of THz radiation amplitude versus exciting laser power

## 4 结果和讨论

实验表明, 增加光电导偶极芯片两电极之间的偏置电场  $E_b$ , 可以提高所辐射 THz 电磁场的强度. 在实验中, 对于电极间隙 3mm 的 GaAs 光电导偶极芯片所加偏置电压仅为 540V, 如果增大偏置电压, GaAs 光电导偶极芯片易出现损伤甚至击穿. 在暗态条件下, 半绝缘 GaAs 材料的击穿电场强度  $E_{bd} \geq 250\text{kV/cm}$ , 在触发状态下, GaAs 光电导偶极天线的电场强度远小于  $E_{bd}$ , 这是由于光电导偶极芯片在高重复频率的触发条件下工作时, GaAs 芯片内的焦耳热效应导致其工作电压远低于材料击穿电

压. 改进光电导偶极天线的绝缘结构, 如采用多层透明绝缘结构<sup>[13]</sup>, 可以提高它在工作状态时的偏置电场强度, 从而提高 GaAs 光电导偶极天线辐射 THz 电磁波的强度.

如果 GaAs 光电导偶极芯片两电极之间的偏置电场为  $E_b$ , 则芯片表面的瞬态电流  $J_s$  以及在近场(芯片表面附近)和远场条件下所辐射的 THz 电磁场  $E_r$  和  $E_{rad}$  可以分别表示为<sup>[14]</sup>:

$$J_s(t) = \frac{\sigma(t) E_b}{1 + \frac{\sigma(t) \eta_0}{1 + \sqrt{\epsilon_r}}} \quad (1)$$

$$E_r(t) = - E_b \frac{\sigma(t) \eta_0}{\sigma(t) \eta_0 + (1 + \sqrt{\epsilon_r})} \quad (2)$$

$$E_{rad}(t) \cong - \frac{A}{4\pi\epsilon_0 c^2 r} \times \frac{dJ_s(t)}{dt} \quad (3)$$

其中  $\eta_0$  是真空中磁导率;  $\epsilon_r$  是 GaAs 芯片的相对介电系数;  $\sigma(t)$  是芯片的表面电导率;  $A$  是芯片表面面积;  $c$  是光速;  $r$  是远场位置矢量. 由(2)式知, 在近场条件下 THz 辐射强度正比于表面瞬态电流. 依据(3)式, 在远场条件下, THz 辐射强度与 GaAs 芯片表面光激发瞬态电流  $J_s$  的时间导数成正比. 由于瞬态电流  $J_s$  的时间变化率决定于触发光脉冲, 因此, 在远场条件下 THz 电磁波强度决定于触发光脉冲的宽度、功率和偏置电场的强度. 另外, 光电导偶极芯片的电极兼有发射天线的的作用, 可以通过设计金属电极的形状, 改进条状天线(电极)为对数螺旋天线或对数周期天线, 以提高 THz 电磁波的发射效率.

## 5 结论

本文研制了具有条形电极结构的半绝缘 GaAs 光电导偶极天线, 两电极间隙为 3mm, 电极材料采用一定比例的 Au/Ge/Ni 合金化工艺与 GaAs 形成欧姆接触, 绝缘保护采用  $\text{Si}_3\text{N}_4$  绝缘薄膜. 当 GaAs 光电导偶极天线偏置在 540V 被波长 800nm, 平均功率 130mW, 脉宽 14fs, 重复频率 75MHz 的飞秒激光脉冲触发时, 采用电光取样测量方法获得了该光电导偶极天线发射 THz 电磁脉冲的时域波形和频谱分布, THz 电磁波的辐射峰值位于 0.5THz 左右, 频谱宽度大于 2THz, 脉冲宽度约为 1ps. 实验表明, 半绝缘 GaAs 光电导偶极天线辐射 THz 电磁波的强度与光电导芯片的偏置电场、触发光脉冲的上升

时间、脉冲宽度及功率有关. 当光电导偶极天线的材料、电极间隙、偏置电压和触发光波长及脉冲宽度一定时, 所辐射 THz 电磁波的强度取决于触发光脉冲能量, 随着触发光脉冲能量的增加, THz 电磁辐射的强度增大. 用 GaAs 光电导偶极天线产生的 THz 电磁波在近场条件下正比于 GaAs 表面的光激发瞬态电流; 在远场条件下, 则与光激发瞬态电流的时间导数成正比.

### 参考文献

- [ 1 ] Verghese S, McIntosh K A, Brown E R. Highly tunable fiber 2 coupled photomixers with coherent terahertz output power. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 1997, 45: 1301
- [ 2 ] Cai Y, Brener I, Lopata J, et al. Design and performance of singular electric field terahertz photoconducting antennas. *Appl Phys Lett*, 1997, 71(15): 2076
- [ 3 ] Shi Wei, Dai Huiying, Sun Xiaowei. Photon-activated charge domain in high-gain photoconductive switches. *Chin Opt Lett*, 2003, 1(9): 553
- [ 4 ] Han P Y, Tani M, Pan F, et al. Use of the organic crystal DAST for terahertz beam applications. *Opt Lett*, 2000, 25(9): 675
- [ 5 ] Chen Q, Zhang X C. Polarization modulation in optoelectronic generation and detection of terahertz beams. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(23): 3435
- [ 6 ] Mickan S, Abbott D, Munch J, et al. Analysis of system trade offs for terahertz imaging. *Microelectron J*, 2000, 31: 503
- [ 7 ] Shi Wei, Tian Liqiang. Study on breakdown characteristics of semi-insulating GaAs photoconductive switch. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(6): 691 (in Chinese) [ 施卫, 田力强. 半绝缘 GaAs 光电导开关击穿特性研究. *半导体学报*, 2004, 25(6): 691]
- [ 8 ] Shi Wei, Liang Zhenxian. Optically activated charge domain phenomena in high gain ultra fast high voltage GaAs photoconductive switches. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1999, 20(1): 53 (in Chinese) [ 施卫, 梁振宪. 高倍增高压超快 GaAs 光电导开关中的光激发畴现象. *半导体学报*, 1999, 20(1): 53]
- [ 9 ] Shi Wei, Zhao Wei, Liang Zhenxian, et al. Time-dependent analysis of high-gain triggering in semi-insulating GaAs photoconductive switches. *Chin Phys Lett*, 2001, 18(11): 1479
- [ 10 ] Shi Wei, Zhang Xianbin, Li Qi, et al. Investigation of light absorption mechanisms in SI-GaAs switch photoconductive triggered by 1064nm laser pulse. *Chin Phys Lett*, 2002, 19(3): 351
- [ 11 ] Shi Wei, Chen Erzhu, Zhang Xianbin, et al. Monopole charge domain in high-gain gallium arsenide photoconductive switches. *Chin Phys Lett*, 2002, 19(8): 1119
- [ 12 ] Shi Wei. Optically activated charge domain model for high-gain GaAs photoconductive switches. *Chinese Journal Semiconductors*, 2001, 22(12): 1481
- [ 13 ] Shi Wei, Zhao Wei, Zhang Xianbin, et al. Investigation of high power sub-nanosecond GaAs photoconductive switches. *Acta Physica Sinica*, 2002, 4(51): 867 (in Chinese) [ 施卫, 赵卫, 张显斌, 等. 高功率亚纳秒 GaAs 光电导开关的研究. *物理学报*, 2002, 4(51): 867]
- [ 14 ] Gyu P S, Weiner A M, Melloch M R, et al. High-power narrow-band terahertz generation using large-aperture photoconductors. *IEEE J Quantum Electron*, 1999, 35(8): 1257

## Investigation on Terahertz Generation with GaAs Photoconductor Triggered by Femto-Second Laser Pulse<sup>\*</sup>

Shi Wei<sup>1</sup>, Zhang Xianbin<sup>1</sup>, Jia Wanli<sup>1</sup>, Li Mengxia<sup>1</sup>, Xu Jingzhou<sup>2</sup> and Zhang Xicheng<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Applied Physics, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(<sup>2</sup> Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY 1218023590, USA)

**Abstract:** Experiments of terahertz generation with semi-insulating GaAs photoconductive dipole antenna triggered by femto-second laser pulses are reported. The switch is insulated by Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> film and the gap of two electrodes is 3mm. When it is triggered by Ti-sapphire femto-second laser pulses with 130mW of average power, 14fs of pulse duration, 82 of MHz repetition rate and operated at 540V of biased electric voltage, both terahertz waveform and about 1ps width of the THz electric pulse is observed from the test of electro-optic sampling. The frequency spectrum of the terahertz radiation ranges about 2THz, and its amplitude peaks are at roughly 0.5THz.

**Key words:** GaAs photoconductive dipole antenna; terahertz radiation; picosecond electric pulse

**PACC:** 0660J; 5235H; 4280W; 5270G

**Article ID:** 0253-4177(2004)12-1735-04

\* Project supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 10390160, 10376025)

Shi Wei male, was born in 1957, professor. He is engaged in teaching and research on solid-state devices.

Received 8 Augst 2004

©2004 The Chinese Institute of Electronics