

文章编号: 0258-7025(2008)03-0396-05

低温生长砷化镓光电导天线产生太赫兹波的辐射特性

石小溪¹ 赵国忠¹ 张存林¹ 崔利杰² 曾一平²

(¹ 首都师范大学物理系, 北京 100037; ² 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要 研究了低温生长砷化镓光电导天线(LT-GaAs PCA)产生太赫兹(THz)波的辐射特性。利用太赫兹时域光谱(TDS)技术测量了光电导发射极在飞秒激光作用下辐射的太赫兹脉冲,得到了时域发射光谱,并通过快速傅里叶变换(FFT)得到相应的频域光谱。结果表明,低温砷化镓光电导天线产生的太赫兹波信号比飞秒激光激发半导体表面产生的太赫兹波信号具有更高的强度和信噪比;太赫兹波信号与光电导天线的偏置电压成线性关系;随着抽运激光功率的增强,太赫兹波信号增大并出现饱和。

关键词 光谱学;太赫兹波;时域光谱测量;低温生长砷化镓;光电导天线

中图分类号 O 431.1;O 433.2 **文献标识码** A

Terahertz Radiation Properties of Low-Temperature-Grown GaAs Photoconductive Antenna

Shi Xiaoxi¹ Zhao Guozhong¹ Zhang Cunlin¹ Cui Lijie² Zeng Yiping²

(¹Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037, China
²Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract The terahertz (THz) radiation properties of low-temperature-grown GaAs photoconductive antenna (LT-GaAs PCA) are studied in order to improve the THz radiation efficiency. The emission spectra of the photoconductive antenna are obtained by THz time domain spectroscopy (TDS) technology. The corresponding frequency domain spectra are obtained by fast Fourier transform (FFT). The results show that the THz signal generated by LT-GaAs PCA is more efficient than that generated by femtosecond electromagnetic pulse from semiconductor surface. The peak of THz electric field increases linearly as bias voltage increasing, and tends to saturation as pump power increasing.

Key words spectroscopy; terahertz wave; time domain spectroscopy measurement; low-temperature-grown GaAs; photoconductive antenna

1 引言

太赫兹(THz)波是指波长范围在 30~3000 μm (0.1~10 THz)之间的电磁波。随着超快激光技术的不断进步,太赫兹辐射的产生和探测技术以及辐射机制的研究得到了飞速的发展。目前,产生脉冲太赫兹波的方法主要有:用飞秒激光激发半导体表

面产生太赫兹波,以及利用光整流效应或光电导发射机制产生太赫兹波。其中利用光电导机制产生太赫兹波是用超短脉冲激光照射半导体材料的光电导天线(PCA),产生的光生载流子在偏置电压的作用下加速运动而辐射出太赫兹波段的电磁波^[1]。近年来,国内外有不少关于光电导天线作为太赫兹波辐

收稿日期:2007-10-11; 收到修改稿日期:2007-10-25

基金项目:国家自然科学基金(10474067)、北京市自然科学基金(4073030)和北京市教委科技发展计划面上项目(KM200510028003)资助课题。

作者简介:石小溪(1982—),男,北京人,硕士研究生,主要从事太赫兹波的产生和探测及其在半导体方面应用的研究。
E-mail: terahertz@126.com

导师简介:赵国忠(1964—),男,内蒙古人,教授,主要从事太赫兹光谱与成像、光电功能材料和光电子学方面的研究。
E-mail: guozhong-zhao@mail.cnu.edu.cn

光源的相关报道。Darrow 等^[2]对光电导天线产生太赫兹波的机制进行了理论解释,并且对砷化镓(GaAs)及磷化铟(InP)作为光电导天线衬底材料产生的太赫兹脉冲进行了对比。Hattori 等^[3]研究了大孔径光电导天线产生太赫兹波的时间特性,考虑了半导体载流子寿命和弛豫时间对太赫兹辐射的影响。大孔径光电导天线在强激光脉冲的触发下产生的太赫兹脉冲会出现饱和现象,Darrow 等^[4,5]分别进行了理论模拟,得出半导体表面的辐射电场对偏置电场的屏蔽效应是产生饱和现象的主要原因。施卫等^[6]对半绝缘的砷化镓产生太赫兹波的辐射特性进行了相关研究。

本文主要研究了低温生长砷化镓(LT-GaAs)的太赫兹辐射特性。低温生长砷化镓是最适用于产生、探测太赫兹波的材料之一,因为它有极高的电子迁移率、较快的电信号捕获时间、很高的击穿电压以及高抗性^[6,7]。本文拟通过实验了解影响低温生长砷化镓光电导天线(LT-GaAs PCA)产生太赫兹波发射效率的因素,用以制作高效、高功率的太赫兹辐射源。

2 基于低温生长砷化镓光电导天线的太赫兹波时域光谱系统

低温砷化镓样品是在 EPI GEN II solid-source MBE 系统上生长的,以半绝缘的 GaAs(001)为衬底,首先生长 80 nm 的 GaAs 缓冲层,生长温度为 580 °C,然后在 300 °C 的低温下生长 1 μm 厚的 GaAs 薄膜层。通过高能电子衍射(RHEED)监测得知,样品在整个生长过程中均保持二维层状。经过 600 °C 退火之后,采用范德堡方法测量其电学特性,Hall 测量结果显示其电阻率为 $3.91 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$,载流子浓度为 $3.17 \times 10^9 \text{cm}^{-3}$,载流子迁移率为 $5035 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。在低温砷化镓样品上,利用光刻及电子束蒸镀的方法在其表面制作一对间距 1 mm 的金质偶极天线,其中每条天线长 10 mm,宽 3 mm,如图 1 所示。

基于低温砷化镓光电导天线,建立了一套太赫兹波时域光谱(TDS)系统。该系统主要由飞秒激光器(脉宽 100 fs,重复频率 82 MHz,中心波长 800 nm,平均输出功率 1 W)、低温生长砷化镓光电导偶极天线、太赫兹时间延迟系统和太赫兹探测系统(ZnTe 晶体电光取样探测)组成,如图 2 所示。

图 2 中,飞秒激光经过分束镜分为两束:一束激

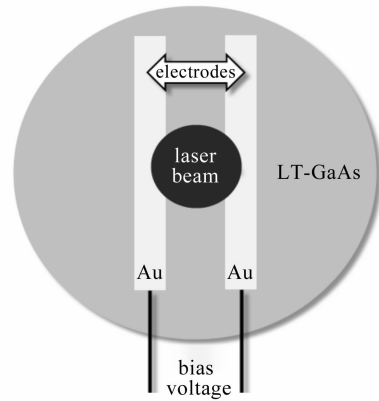


图 1 低温砷化镓光电导天线示意图
Fig. 1 Schematic diagram of LT-GaAs PCA

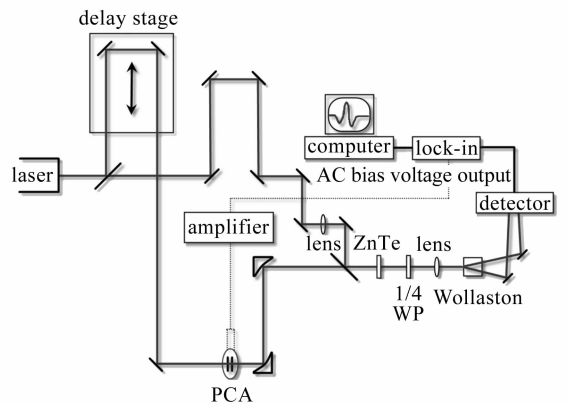


图 2 太赫兹时域光谱系统示意图
Fig. 2 Schematic diagram of THz time domain spectroscopy system

光作为抽运脉冲(经分束镜反射的激光)通过时间延迟系统照射到光电导天线上产生太赫兹波,太赫兹波经过两个镀金离轴抛物面镜聚焦到一块 1 mm 厚(110)生长方向的探测晶体 ZnTe 上;另一束激光作为探测脉冲(经分束镜透射的激光)经过一面透镜也聚焦到 ZnTe 晶体的同一位置上,实验采用电光取样的方法来探测太赫兹波信号。锁相放大器输出一个一定频率的交流电压信号,经过放大器加到光电导偶极天线的两极上作为偏置电压。而该交流电压信号可以代替斩波器调制信号,在锁相采集处理信号时作为参考信号进行锁相积分计算。

我们建立了一套利用飞秒激光激发半导体表面产生太赫兹波的太赫兹时域光谱系统^[8],这套系统与本文中光电导天线产生太赫兹波时域光谱系统基于同一个激光源,其光路结构基本相同,探测晶体使用的是同一块 ZnTe 晶体。半导体表面产生太赫兹波的基本原理是:飞秒激光以 45°角照射到 p 型(110)砷化铟晶体表面上,激光脉冲激发 InAs 产生

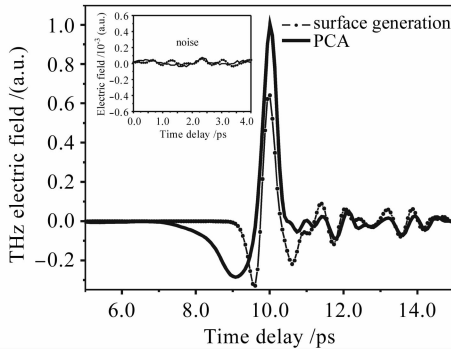


图3 光电导天线产生的与半导体表面产生的太赫兹波电场

Fig.3 THz electric fields generated by PCA and semiconductor surface

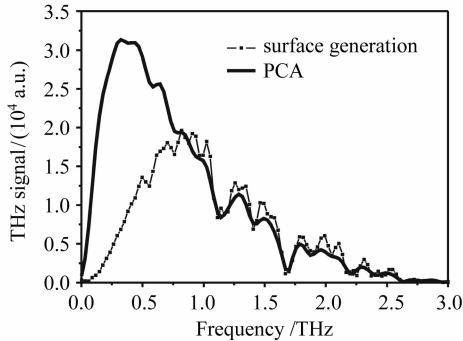


图4 图3中太赫兹脉冲相应的频域光谱

Fig.4 Corresponding frequency domain spectra of THz pulses in Fig.3

光生载流子,通过载流子在半导体表面电场中的加速运动而辐射出太赫兹电磁波^[9]。这种方法和光电导方法都可以产生宽带太赫兹电磁波^[10]。图3为光电导天线方法与半导体表面辐射方法在相同功率的抽运激光照射下产生的太赫兹波时域谱对比图。比较时域谱的峰-峰值的大小,可以看到光电导天线在220 V的偏置电压下所产生的太赫兹波信号大约是半导体表面产生太赫兹波信号的1.33倍,继续增大偏置电压,还可以获得更强的太赫兹波信号。这是由于光导天线辐射的太赫兹波能量主要来自天线上所加的偏置电场,可以通过调节外加电场的大小来获得较强的太赫兹波,而半导体表面辐射方法产生的太赫兹波光束能量受限于抽运激光脉冲的能量,所以其辐射的太赫兹波脉冲能量相对较小。图3中小图所表示的是两套产生太赫兹波装置的噪声对比,可以看到两者的噪声水平是基本相当的,因此光电导产生太赫兹波的系统具有更高的信噪比。图4表示的是图3中时域谱信号经快速傅里叶变换(FFT)之后的频域谱,由于两者的辐射机制不同,它

们的辐射频率分布范围也不同。可以看到,由光电导方法得到的太赫兹频谱幅值在0.2~0.5 THz的频率区域比较强,而由半导体表面辐射的方法得到的频谱幅值在0.7~1.1 THz的频率区域比较强。

3 理论分析与实验结果

3.1 理论分析

光电导偶极天线是利用超短激光脉冲照射在偶极天线的半导体材料上产生光生载流子,光生载流子在偏压的作用下加速运动而辐射出太赫兹脉冲。如果光电导偶极天线两电极之间的直流偏置电场为 E_b ,无光照时天线处于高阻截止状态。当用超快激光脉冲照射天线时,光导天线半导体材料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太赫兹电磁波。

传统小孔径光电导天线(光电导天线的孔径与入射光波长相当)所产生的太赫兹辐射强度较小,而采用大孔径光电导天线(孔径远大于入射光波长)可以获得辐射强度更大的太赫兹波^[11]。本文所研究的即为大孔径的光电导偶极天线。

当辐射的太赫兹电磁场达到最大值时,太赫兹电场和半导体表面电导率可以表示为

$$E_{t,\max} = -E_b \frac{\sigma_{\max} \eta_0}{\sigma_{\max} \eta_0 + (1 + \sqrt{\epsilon})}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{e(1-R)\mu_{tr}F_{\text{opt}}}{\hbar\omega}, \quad (2)$$

式中 F_{opt} 为激发光的能量密度, μ_{tr} 为产生的太赫兹脉冲达到最大值时的瞬态载流子迁移率, ϵ 为半导体的介电常数, η_0 为自由空间的电阻率, E_b 为光电导偶极天线两极的偏置电压。(1)式等号左右同时除以 $-\eta_0/(1+\sqrt{\epsilon})$,得到太赫兹波辐射电场达到最大值时的瞬态电流密度

$$J_{s,\max} = \frac{\sigma_{\max} E_b}{1 + \frac{\sigma_{\max} \eta_0}{1 + \sqrt{\epsilon}}}, \quad (3)$$

当 $\frac{\sigma_{\max} \eta_0}{1 + \sqrt{\epsilon}} \geq 1$ 时,辐射的太赫兹场达到饱和^[2,3,12]。从

(2)和(3)式可以看出,当增大 E_b 时,辐射出的太赫兹场会随之线性增大,而增大照射在光电导天线上激发脉冲的能量密度时,辐射出的太赫兹场会随之增大并会逐渐趋于饱和。

3.2 实验结果

根据理论分析,进行了下面几组实验,研究低温

砷化镓光电导天线的太赫兹辐射特性。测得飞秒激光器的总输出功率为1045 mW,照射到光电导天线上的抽运激光功率为800 mW(能量密度为 $1.1 \times 10^{-4} \text{ J/m}^2$),光斑直径为1052 μm 。加在光电导天线两极间的偏置电压为220 V,偏置电压频率为9200 Hz。

将照射在光导天线表面的抽运光能量密度固定在 $0.4 \times 10^{-4} \text{ J/m}^2$,改变偏置电压,对比产生的太赫兹信号。由图5可知,固定照射在光电导天线上的抽运光光强(固定在 $0.4 \times 10^{-4} \text{ J/m}^2$),改变偏置电场大小,产生的太赫兹波强度与偏置电场基本成正比,这与(3)式一致。从图6中还看到,随着偏置电场的增大,产生的太赫兹波频域谱的峰值随之增大,并且频域谱峰值频率会向高频移动。上述实验现象可以解释为:半导体内的光生载流子加速运动受外加电场的影响^[13],外加电场越大,加速运动越快,因而所辐射出的太赫兹电磁波的强度越大并且频率越高。继续提高偏置电压,希望得到更强的太赫兹波信号并进一步验证太赫兹信号与偏置电场的线性关系。但是随着偏置电压的增高,光电导天线的发热量也迅速提高,导致光电导天线出现击穿现象,如果继续增加电压会使天线完全导通而不再能辐射太赫兹波,所以没有再进一步加大偏置电压。

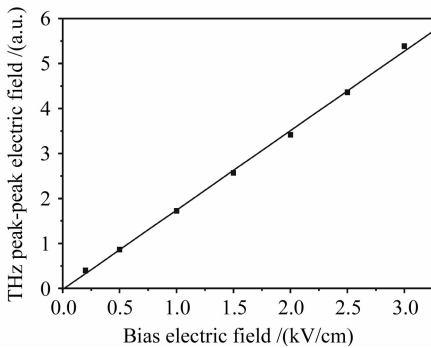


图5 不同偏置电场下产生的太赫兹波峰-峰值电场
Fig. 5 THz peak-peak electric fields at different bias electric fields

将偏置电压固定在220 V,改变照射在光电导天线上的抽运光能量,对比产生的太赫兹信号。由图7可以看到,改变照射在光电导天线上的抽运光功率,产生的太赫兹波的强度也随之改变,正如(2), (3)式所示,当增大抽运光的能量,太赫兹波强度也随之增大,但是随着抽运光强的不断增大,当 $\frac{\sigma_{\max} \eta_0}{1 + \sqrt{\epsilon}} \geq 1$ 时,太赫兹辐射就会达到饱和。鉴于激光器的功率限制,抽运光功率无法继续加大,但是根据(1)

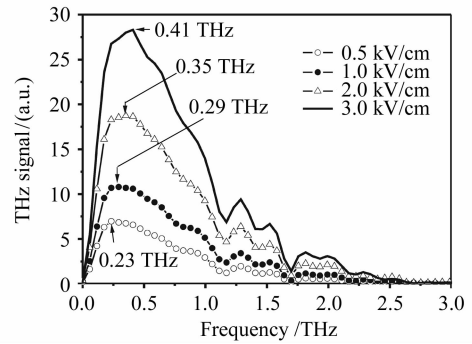


图6 由图5转换的频域光谱
Fig. 6 Frequency domain spectra transformed from Fig. 5

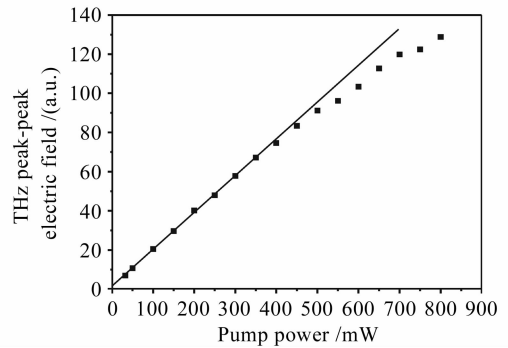


图7 不同功率下的太赫兹波峰-峰值电场
Fig. 7 THz peak-peak electric fields at different pump powers

式可以预见,随着抽运激光功率的不断增大,相应的太赫兹电场最终将趋于一个数值而饱和,这个数值的大小就是偏置电场。由于光电导天线的太赫兹波发射能量来源于所加的偏置电场,所以这种饱和性质也可以用光电导天线的基本发射原理解释。

4 结 论

建立了一套基于低温砷化镓大孔径光电导偶极天线的太赫兹波发射光谱测量系统。较之半导体表面辐射方法产生的太赫兹波,低温砷化镓光电导偶极天线所辐射的太赫兹波具有更大的强度及更高的信噪比。实验结果和理论分析表明,低温砷化镓光电导天线发射的太赫兹波强度与加在天线两极的偏置电压成正比,并且所获得的频域谱峰值频率随偏置电压的增大而增高;产生的太赫兹波信号强度还与照射在光电导天线上的抽运光光强呈饱和递增关系。

致谢 本文得到了北京市人才强教计划、太赫兹光电子学教育部重点实验室和纳米光电子学北京市重点实验室的支持,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 D. Dragoman, M. Dragoman. Terahertz fields and applications [J]. *Progress in Quantum Electron.*, 2004, **28**(1):1~66
- 2 Justin T. Darrow, Xi-Cheng Zhang, David H. Auston *et al.*. Saturation properties of large-aperture photoconducting antennas [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(6):1607~1616
- 3 Toshiaki Hattori, Keiji Tukamoto, Hiroki Nakatsuka. Time-resolved study of intense terahertz pulses generated by a large-aperture photoconductive antenna [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, **40**(8):4907~4912
- 4 J. T. Darrow, X.-C. Zhang, D. H. Auston. Power scaling of large-aperture photoconducting antennas [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**(1):25~27
- 5 Jia Wanli, Ji Weili, Shi Wei. Two-dimensional Monte Carlo simulation of screening of the bias field in terahertz generation from semi-insulated GaAs photoconductors [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(4):2042~2046
贾婉丽, 纪卫莉, 施 卫. 半绝缘 GaAs 光电导开关产生太赫兹波电场屏蔽效应的二维 Monte Carlo 模拟 [J]. *物理学报*, 2007, **56**(4):2042~2046
- 6 Shi Wei, Zhang Xianbin, Jia Wanli *et al.*. Investigation on terahertz generation with GaAs photoconductor triggered by femto-second laser pulse [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2004, **25**(12):1735~1738
施 卫, 张显斌, 贾婉丽 等. 用飞秒激光触发 GaAs 光电导体产生 THz 电磁波的研究 [J]. *半导体学报*, 2004, **25**(12):1735~1738
- 7 G. Rodriguez, S. R. Caceres, A. J. Taylor. Modeling of terahertz radiation from biased photoconductors: transient velocity effects [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(23):1994~1996
- 8 Weili Cui, Zhenwei Zhang, Guozhong Zhao *et al.*. Transmission properties of terahertz radiation through a single sub-wavelength circular hole in the metal foil [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(Suppl.):74~76
- 9 Sun Hongqi, Zhao Guozhong, Tian Yan *et al.*. Transverse mode distribution of THz wave by THz imaging technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1225~1229
孙红起, 赵国忠, 田 艳 等. 太赫兹波传播过程中横模分布的成像 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1225~1229
- 10 Zhang Xianbin, T. Ikari, Chen Yingli *et al.*. Analysis of THz electromagnetic wave output character based on high performance 85 mm short cavity optical parametric oscillator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4):616~620
张显斌, 碓智文, 陈颖丽 等. 高性能 85 mm 短腔光学参变振荡器的 THz 电磁波输出特性分析 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(4):616~620
- 11 Zhang Tongyi, Cao Juncheng. Temporal characterization of THz pulses generated by large aperture photoconductive antennas [J]. *Chin. J. Rare Metals*, 2004, **28**(3):588~589
张同意, 曹俊诚. 大孔径光电导天线产生的太赫兹脉冲时间特性研究 [J]. *稀有金属*, 2004, **28**(3):588~589
- 12 Chang Qing, Yang Dongxiao, Wang Liang *et al.*. Study on terahertz generation from large-aperture photoconductive antenna [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(6):574~577
常 青, 杨冬晓, 王 亮 等. 大孔径光导天线技术产生太赫兹波的研究 [J]. *激光技术*, 2006, **30**(6):574~577
- 13 Sun Jinhai, Zhao Guozhong, Zhang Liangliang *et al.*. Effect of applied electric and magnetic field on THz radiation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):192~195
孙金海, 赵国忠, 张亮亮 等. 外加电场和磁场对太赫兹辐射产生的影响 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(2):192~195