

文章编号: 0258-7025(2010)01-0110-05

小孔径光电导天线产生太赫兹波的辐射特性

黄 振 于 斌 赵国忠

(首都师范大学物理系 北京市太赫兹波谱与成像重点实验室, 太赫兹光电子学省部共建教育部重点实验室, 北京 100048)

摘要 研究了在抽运激光光斑面积不同的情况下, 两种小孔径光电导天线各自的辐射特性, 并且将它们辐射出的太赫兹 (THz) 波进行了对比。目的在于找到提高小孔径光电导天线发射效率的方法, 为研制高效率的太赫兹波辐射源提供参考依据。利用太赫兹时域光谱 (TDS) 技术测量了光电导天线辐射的太赫兹脉冲, 得到了时域发射光谱, 通过快速傅里叶变换得到相应的频域光谱。结果表明, 两种光电导天线辐射的太赫兹信号强度都随着抽运激光光斑直径的减小而增强; 随偏置电压的增大而增强; 随着抽运激光功率的增大出现了先增强后饱和的现象。在偏置电压、抽运激光光斑直径与抽运激光功率相同时, 对比两种光电导天线产生的太赫兹信号发现: 蝴蝶型光电导天线的太赫兹信号的强度较大并且频域谱的半峰全宽 (FWHM) 较宽。

关键词 太赫兹波; 小孔径光电导天线; 低温砷化镓

中图分类号 O431.1; O433.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103701.0110

The THz Emission Properties of Small-Aperture Photoconductive Antenna

Huang Zhen¹ Yu Bin² Zhao Guozhong²

(Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract The terahertz (THz) emission properties of two kinds of small-aperture photoconductive antennas are studied under the condition of different spot area of pump laser. The characteristic of THz radiation generated by them is compared. Meanwhile, it also provides a reference to investigate and fabricate the high efficient of THz radiation source. 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 when the bias voltage is enhanced or the spot area of pump laser becomes smaller, the peak value of THz radiation is increased and saturated with increasing of pump power. Under the same bias voltage, the spot area of pump laser and the pump power, the properties of THz radiation generated by two kinds of photoconductive antennas are compared. The results show that, the full width of half maximum (FWHM) of THz frequency domain spectra which is generated by the small-aperture bow-tie photoconductor antenna is broader and the intensity of THz radiation is larger.

Key word THz emission; small-aperture photoconductive antenna; low temperature of GaAs

1 引 言

太赫兹 (THz) 波通常是指波长范围在 30 ~ 3000 μm 之间的电磁波, 位于微波与红外光之间, 属于远红外波段。在 20 世纪 80 年代中期以前由于缺乏有效的产生和探测方法, 人们对该波段电磁辐射性质的了解非常有限^[1]。

随着超快激光技术的不断进步, 使太赫兹辐射的产生和探测技术以及辐射机理的研究得到了飞速

的发展。已经提出了很多产生 THz 波的方法, 其中比较广泛的方法是利用飞秒脉冲激光激发外加电场偏置的光电导天线^[2,3]。使用光电导天线为 THz 源时有两种常用的光电导天线, 一种是小孔径天线(天线两电极之间的间距和 THz 波长相比较小), 另一种是大孔径天线(天线两电极之间的间距和 THz 波长相比较大)。这两种天线有各自的优点, 比如: 大孔径天线信号强度较高, 但是发热量较大, 长时间连

收稿日期: 2008-10-12; 收到修改稿日期: 2008-11-22

基金项目: 国家 973 计划 (2007CB310408, 2006CB302901)、国家自然科学基金 (10474067)、北京市自然科学基金 (4073030) 和北京市教育委员会高等教育人才强教计划资助课题。

作者简介: 黄 振 (1983 -), 男, 硕士, 主要从事脉冲式太赫兹源方面的研究。E-mail: hzdashun@163.com

续稳定工作较困难；而小孔径天线信号强度较低，但是发热量较小，能长时间稳定工作，所以探索如何提高小孔径天线发射的 THz 波的强度很有意义。

本文主要研究如何提高小孔径光电导天线的发射效率，对光电导天线辐射 THz 波的理论进行了研究；介绍了所使用的两种小孔径光电导天线，并对本文实验所使用的基于小孔径光电导天线的太赫兹时域光谱系统做了介绍；对这两种小孔径光电导天线在不同的条件下各自的辐射特性做了比较细致的研究；在相同的条件下对比了这两种天线的 THz 信号，并总结了提高小孔径光电导天线发射效率的方法。

2 光电导天线产生 THz 波的机理

用光电导天线产生 THz 波的机理是：当没有飞秒激光脉冲照射时，光电导天线处于高阻截止状态；当有飞秒激光脉冲照射光电导天线时，光电导天线的半导体材料被飞秒激光脉冲激发可以产生光生载流子，同时在天线两电极之间加有偏置电压 E_b ，光生载流子在偏置电压的作用下开始加速运动，产生瞬态电流 J_s ，载流子的加速运动将发射出太赫兹电磁波。

当辐射的太赫兹电磁场达到最大值时，半导体表面电导率和太赫兹电场可以表示为^[4,5]

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

$$E_{t,\max} = -E_b \frac{\sigma_{\max}\eta_0}{\sigma_{\max}\eta_0 + (1+\sqrt{\epsilon})}, \quad (2)$$

其中 F_{opt} 为抽运光单脉冲能量， 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 为自由空间的阻抗。(2)式等号左右同时除以 $\eta_0/(1+\sqrt{\epsilon})$ ，可以得到太赫兹波辐射电场达到最大值时的瞬态电流密度

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

可以看出，当 $\sigma_{\max}\eta_0/(1+\sqrt{\epsilon}) \geq 1$ 时，辐射的太赫兹场达到饱和^[6,7]，通过观察(1)~(3)式，可以发现，1)当增大光电导天线两极间的偏置电场 E_b 时，光电导天线辐射出的太赫兹场会随之线性增大。2)当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逐渐趋于饱和。所以提高偏置电压、增大入射飞秒激光的光强或者减小入射飞秒激光的光斑直径都可以增大光电导天线的发射效率。

3 基于小孔径光电导天线发射太赫兹波的光谱系统

3.1 光电导天线以及所用衬底材料

使用的两个小孔径光电导天线是在中国科学院半导体研究所制作完成的，两个光电导天线所使用的衬底材料都是从一块直径 7.62 cm 的低温砷化镓晶体上切割下来的。此块低温砷化镓晶体是在 EPI GEN II solid-source MBE 系统上生长的，如图 1 所示。

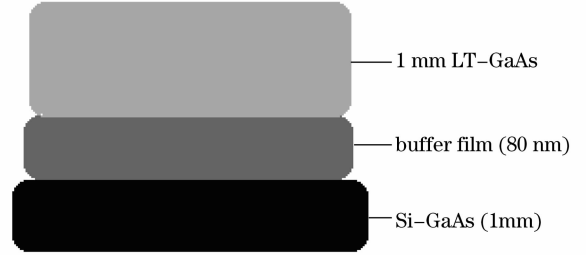


图 1 光电导天线衬底材料示意图

Fig. 1 Schematic view of semiconductor substrates

样品在生长过程中通过高能电子衍射 (RHEED) 监测，整个生长过程均保持二维层状生长。经过 600 °C 的退火之后，采用范德堡方法测量了材料的电学特性，通过霍尔测量结果显示其电阻率为 $3.86 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ ，载流子浓度为 $3.12 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ ，载流子迁

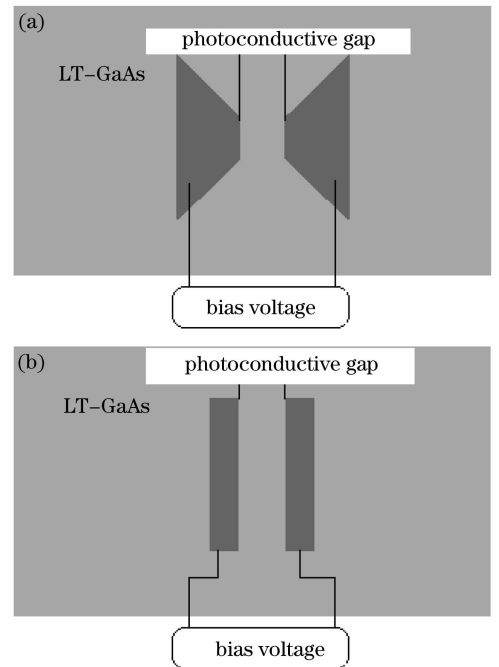


图 2 小孔径光电导天线示意图。(a) 蝴蝶形，(b) 双极形

Fig. 2 Schematic view of two kinds of small-aperture photoconductive antenna. (a) Butterfly shape; (b) two-electrode shape

移率为 $5035 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 。

在制备好的低温砷化镓样品上,利用光刻和电子束蒸镀的方法在其表面上制作了两个电极间距都为 $100 \mu\text{m}$ 的小孔径光电导天线。它们的区别:天线形状不同。一个是蝴蝶形天线如图 2(a)所示,另一个是双极形天线如图 2(b)所示。将蝴蝶形小孔径光电导天线编为 LT-1 号天线,将双极形小孔径光电导天线编为 LT-2 号天线。

3.2 实验系统的搭建

在制作光电导天线的同时,搭建了一套测量光电导天线辐射太赫兹波的时域光谱系统,这套实验系统主要包括:飞秒激光器(脉宽为 100 fs ,重复频率为 82 MHz ,中心波长为 800 nm ,平均输出功率为 1 W)、时间延迟系统、天线位置控制系统(三维平移台及其控制器,精度为 $1 \mu\text{m}$)、光电导天线系统(高

频电压放大器和天线支架)以及 THz 探测系统(ZnTe 晶体电光取样和锁相探测^[8]),如图 3 所示。

由图 3 可知,偏振分束镜把飞秒激光脉冲分为两束,一束作为探测脉冲(经分束镜透射的部分)用凸透镜聚焦到一块 1 mm 厚的探测晶体 ZnTe 上,通过电光取样来探测太赫兹波;另一束作为抽运脉冲(经分束镜反射的部分)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探测晶体 ZnTe 上,并且与探测光聚焦位置相同。锁相放大器输出一个频率为 7000 Hz 的正弦交流电压信号,经过电压放大器作为偏置电压加载到光电导天线的两极上。这个交流电压信号可以代替斩波器调制太赫兹波,在锁相放大器采集处理信号时作为参考信号进行锁相探测。

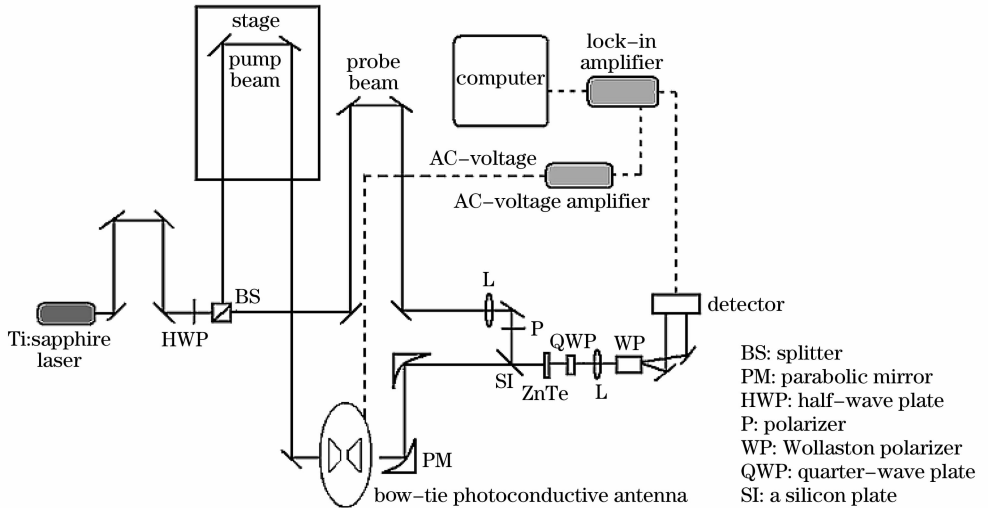


图 3 太赫兹时域光谱系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of THz-TDS spectrometer

4 小孔径光电导天线的辐射特性

由理论分析发现偏置电压、入射飞秒激光的光斑直径和光功率这些外加条件都会对光电导天线的发射效率产生影响。下面分别改变 LT-2 号双极形小孔径光电导天线的外加条件,研究这些外加条件对其发射效率的影响。

4.1 偏置电压对双极形小孔径光电导天线发射效率的影响

固定照射到光电导天线上的飞秒激光的功率(600 mW)和光斑直径(1 mm),之后改变偏置电压,对比产生的 THz 信号如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,太赫兹波强度与偏置电压基本成正比,可以解释为,半导体内的光生载流子加

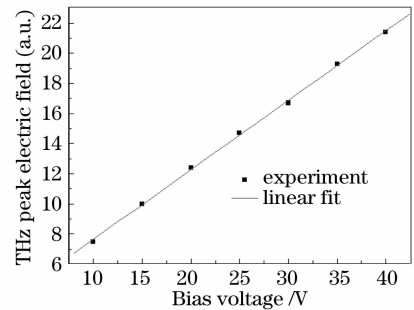


图 4 不同偏置电压下太赫兹波的峰值电场

Fig. 4 THz field as a function of biased voltage for LT-2 antenna

速运动受外加电场的影响^[9],外加电场越大,加速运动越剧烈,因而所辐射出的太赫兹电磁波的强度越

大。如果继续提高偏置电压,原则上可以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压的线性关系。但是偏置电压增大到较大值时会导致光电导天线被击穿,所以没有进一步加大电压。

4.2 入射光功率对双极形小孔径光电导天线发射效率的影响

固定照射到光电导天线上的飞秒激光的光斑直径(1 mm)和天线两电极之间的偏置电压(50 V),之后改变飞秒激光的功率,对比产生的 THz 信号如图 5 所示。

从图 5 可以看出,增加入射抽运激光功率可以增大天线辐射出的 THz 信号强度,但是在实验中抽运光功率大于 600 mW 的地方出现了饱和现象。这种饱和现象是由于空间电荷屏蔽效应产生的,当电子和空穴在偏置电压下向两个相反的方向漂移运动,由于空间电荷的电场和偏置电场是反向的,所以会屏蔽掉偏置电场,从而使 THz 信号出现饱和现象^[10]。由于本系统的激光器最大输出光功率的限制,抽运光功率无法再继续加大。

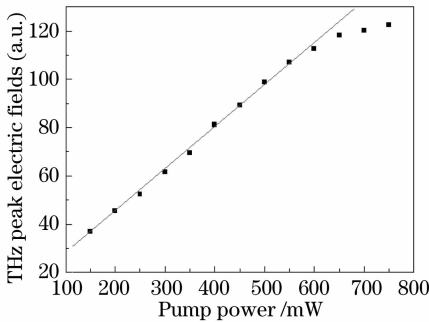


图 5 不同飞秒激光功率下太赫兹波的峰值电场

Fig. 5 Pump-power dependency of THz radiation for LT-2 antenna

4.3 入射激光光斑面积对双极形小孔径光电导天线发射效率的影响

固定照射到光电导天线上的飞秒激光的功率(200 mW)和天线两电极之间的偏置电压(30 V),之后改变光斑直径,第一次光斑直径为 1 mm,第二次光斑直径为 400 μm,对比这两次产生的 THz 信号如图 6 所示。

从图 6 可以看出,减小入射飞秒激光的光斑直径可以有效地增加光电导天线的发射强度。通过减小光斑直径 THz 信号提高到原先的 1.5 倍以上。图 6 中小图表示的是两种不同光斑直径下产生太赫兹波的噪声对比,可以看到两者的噪声水平基本相当,所以减小光斑直径还可以有效地提高光路的信

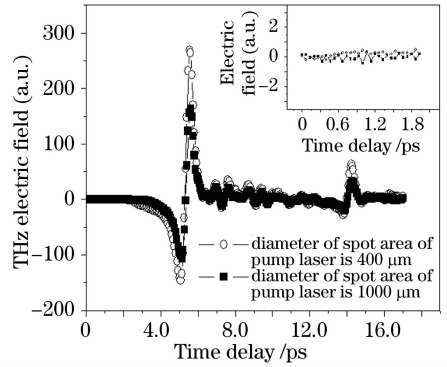


图 6 不同飞秒激光光斑直径下太赫兹波的时域谱

Fig. 6 THz pulse generated by LT-2 antenna under the condition of different spot area of pump laser

噪比。

在 LT-1 号蝴蝶形小孔径光电导天线上也进行了以上的 3 组实验并且得到了近似的结果。所以通过上面的实验可以看到增加入射飞秒激光强度、增加偏置电压或者减小入射光的光斑直径都可以提高小孔径光电导天线的发射效率。

5 两种小孔径光电导天线发射的 THz 信号对比

在相同的外加条件下对两种小孔径光电导天线发射的 THz 信号进行对比,研究天线形状对天线发射效率的影响。固定照射到光电导天线上的飞秒激光的功率(200 mW)与光斑直径(400 μm),之后在两个天线两电极之间都加上 30 V 的偏置电压,得到了它们发射的时域谱与频域谱,如图 7 所示。

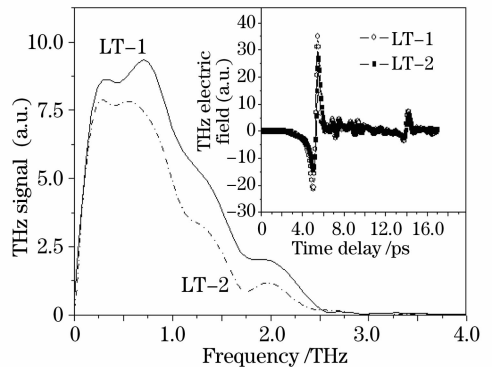


图 7 不同小孔径光电导天线的太赫兹波的时域谱(插图)与频域谱

Fig. 7 THz pulse generated by LT-1 and LT-2 antenna

从实验数据中可以明显地看到,在相同的条件下小孔径蝴蝶形光电导天线所发射的 THz 信号强度高于小孔径双极形光电导天线。并且小孔径蝴蝶

形光电导天线所发射的 THz 信号频域谱的半峰全宽明显较宽。所以通过改变天线形状也可以提高小孔径光电导天线的发射效率。

6 结 论

几组实验的结果表明,增大天线两极间的电压、提高入射飞秒激光的光功率和减小光斑直径,以及改变天线的形状都可以提高小孔径光电导天线的发射效率;同时还可以通过这些方法提高 THz 时域光谱系统的信噪比。但是外加因素的改变也是有限制的,例如天线两极间的电压不能加得太多,否则天线容易被击穿,在实验中电压有效值最大在 70 V 时天线还能够正常发射 THz 信号;入射飞秒激光的功率受到激光器的限制,不可能太大。所以建议在制作高效率的小孔径光电导天线发射源时要综合调整这些外加条件,才能得到高效且实用的 THz 发射源。

参 考 文 献

- 1 D. Dragoman, M. Dragoman. Terahertz fields and applications [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2004, **28**(1): 1~66
- 2 J. C. Diels. *Ultrashort Laser Pulse Phenomena*[M]. New York;

- Academic, 1995, Chap11
- 3 U. D. Keil, D. R. Dykaar. Electro-optic sampling and carrier dynamics at zero propagation distance[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(13): 1504~1506
- 4 F. E. Doany, D. Grischkowsky. Carrier lifetime versus ion-implantation dose in silicon on sapphire[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **50**: 460~462
- 5 T. Hattori, K. Tukamoto, H. Nakatsuka. Time-resolved study of intense terahertz pulses generated by a large-aperture photoconductive antenna [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1992, **32**(8): 1910~1912
- 6 Chang Qing, Yang Dongxiao, Wang Liang *et al.*. Study on terahertz generation from large-aperture photoconductive antenna [J]. *Laser Technol.*, 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
- 7 A. E. Iverson, G. M. Wysin, D. L. Smith *et al.*. Overshoot in the response of a photoconductor excited by subpico-second pulses [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **52**: 2148~2150
- 8 U. D. Keil, D. R. Dykaar. Electro-optic sampling and carrier dynamics at zero propagation distance[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(13): 1504~1506
- 9 Sun Junhai, 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 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 192~195
- 10 E. Budiarto, J. Margolies, S. Jeong *et al.*. High-intensity terahertz pulses at 1 kHz repetition rate. [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(10): 1839~1846