

文章编号: 0258-7025(2005)02-0192-04

外加电场和磁场对太赫兹辐射产生的影响

孙金海^{1,2}, 赵国忠¹, 张亮亮¹, 钟 华², 沈京玲¹, 张存林¹

(¹ 首都师范大学物理系, 北京 100037; ² 伦斯勒理工大学太赫兹研究中心, 纽约)

摘要 通过对半导体太赫兹发射极在有和没有外加电场和磁场作用下发射光谱的测量, 说明了外加电场和磁场对太赫兹电磁辐射的产生具有增强作用。采用反射式发射极在飞秒激光作用下辐射太赫兹脉冲的装置, 同时利用电光取样方法探测太赫兹电场, 得到了这些发射极的时域发射光谱, 并通过快速傅里叶变换(FFT)得到了相应的频域光谱。实验表明, 太赫兹时域发射光谱和频谱在外加电场、磁场作用下都有增强, 但是所发射的频率成分和带宽都没有改变。借助于经典电磁理论的定性分析, 认为太赫兹发射光谱在外加电场、磁场作用下的增强起源于半导体中载流子的加速运动受外加电场和磁场的影 响。

关键词 超快光学; 太赫兹; 电场; 磁场; 飞秒激光; 发射光谱

中图分类号 O 433.2 **文献标识码** A

Effect of Applied Electrical and Magnetic Field on THz Radiation

SUN Jin-hai^{1,2}, ZHAO Guo-zhong¹, ZHANG Liang-liang¹,

ZHONG Hua², SHEN Jing-ling¹, ZHANG Cun-lin¹

(¹ Physics Department, Capital Normal University, Beijing 100037, China)
(² THz Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, New York, America)

Abstract In this paper, the effects of the applied electrical and magnetic field on the generation of optically induced terahertz (THz) electromagnetic radiation are reported by measuring the signal from the semiconductor emitter. The biased electrical field and magnetic field can enhance optically induced THz electromagnetic radiation. The emission spectra of time domain of semiconductors biased by applied electrical and magnetic field are obtained by the use of the reflection-type emitter irradiated by the femtosecond laser and the electro-optic sampling. The corresponding frequency domain spectra are obtained by fast Fourier transform (FFT). The results show that THz emission spectra are enhanced by the applied electrical and magnetic field, while their frequency components and bandwidths are not changed. By the classical electromagnetic theory, the effect of applied electrical and magnetic field on THz emission can be attributed to the acceleration motion of carriers in semiconductors.

Key words ultrafast optics; terahertz; electric field; magnetic field; femtosecond laser; emission spectra

1 引 言

太赫兹(1 THz=10¹² Hz)频段是指频率从十分之几到十几个(有的认为到二十个)太赫兹的电磁波, 介于毫米波与红外光之间相当宽范围的电磁辐射区域。近年来, 随着在太赫兹领域内不断深入的研究, 飞秒激光器激发的太赫兹辐射的产生、探测和应用方面的研究引起了越来越多的关注^[1~6]。太赫

兹技术具有许多潜在的应用, 例如太赫兹光谱^[7~10]、测距^[11]和成像系统^[12,13]。目前, 产生脉冲太赫兹辐射的主要方法是利用超短激光脉冲去激发太赫兹辐射源, 通常有两种方案^[14]: 1) 用光导天线作为瞬变电流源辐射太赫兹波^[15~17]; 2) 用晶体中光学脉冲整流的光电切连科夫辐射^[18]。两种产生太赫兹电磁波的方法中, 用光导天线辐射的太赫兹电磁波通常比用光整流效应产生的太赫兹波强。因

收稿日期: 2004-04-26; 收到修改稿日期: 2004-11-12

作者简介: 孙金海(1974—), 男, 山东东营人, 首都师范大学硕士研究生, 主要从事太赫兹的产生和探测及其在生物方面的应用研究。E-mail: jinhaisun@126.com

为光整流效应产生的太赫兹波的能量仅仅来源于入射的激光脉冲的能量,而光导天线辐射的太赫兹波的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能量较高的太赫兹波。最近的实验通过用垂直入射激发光^[19,20]来区分由真正的载流子与光整流所产生的电磁辐射。

本文采用电光取样的方法进行测量。太赫兹电光取样的方法是基于线性电光效应(又称普克尔效应)进行的,其基本原理是:当太赫兹电场通过电光晶体时,其瞬态电场将使电光晶体的折射率发生各向异性的改变,当另一束探测光和太赫兹脉冲同时通过晶体时,太赫兹脉冲电场导致的晶体折射率改变将使探测光的偏振态发生变化。调整探测光脉冲和太赫兹脉冲间的时间延迟,检测探测光在晶体中发生的偏振变化就可以获得太赫兹脉冲电场的时间波形。

2 实验装置和结果

实验采用 45° 入射发射极产生太赫兹辐射的装置,研究电场和磁场的影响。实验装置包括快速延迟扫描的太赫兹辐射产生和探测系统。锁模钛蓝宝石激光器产生的光脉冲中心波长为 776 nm,重复频率 80 MHz,脉宽 20 fs。实验装置如图 1 所示,激光脉冲作为抽运和探测光源,被分束镜 BS 分成两束,一小部分作为探测脉冲,另一大部分作为抽运脉冲。抽运光依次经过光阑 D_1 , 反射镜 M_1 和光阑 D_2 后通过以 60 Hz 重复频率扫描的光学延迟线(由扬声器上粘有两个相互垂直的反射镜制成),然后经过光阑 D_3 , 反射镜 M_2 后照射在发射晶片上,激发出太赫兹

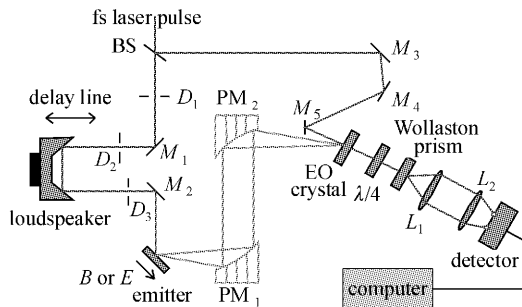


图 1 太赫兹产生与探测系统示意图

BS:分束镜; $D_1 \sim D_3$:光阑; $M_1 \sim M_5$:反射镜;EO:电光晶体;
 $\lambda/4$:四分之一波片; L_1, L_2 :凸透镜; PM_1, PM_2 :抛物面镜
 Fig. 1 Diagram of THz generation and detection system
 BS: beam splitter; $D_1 \sim D_3$: diaphragms; $M_1 \sim M_5$: mirrors;
 EO: electrooptic crystal; $\lambda/4$: $\lambda/4$ plate; L_1, L_2 : convex lens;
 PM_1, PM_2 : paraboloid mirrors

脉冲。产生的太赫兹脉冲被抛物面镜 PM_1 和 PM_2 聚焦到探测电光晶体 EO 上,探测电光晶体放置在可旋转支架上。探测光束经过反射镜 M_3, M_4, M_5 后与太赫兹聚焦在探测电光晶体的相同的点上。通过电光晶体后,探测光先经过 $\lambda/4$ 波片,然后被沃拉斯顿棱镜分为两偏振方向垂直的分量,依次经过凸透镜 L_1, L_2 后由差分探测器测量到两偏振分量的强度差。当延迟线以 60 Hz 的频率扫描时,可获得大约相当于延迟 13 ps 的太赫兹时域波形,信噪比为 200。因为激光器噪声由时间范围长于 1 s 的能量波动决定,快扫描技术可以压缩频率低于 1 Hz 的噪声,这样就大大提高了探测太赫兹电场的系统的信噪比。

实验中用的激光在连续波状态下的功率为 425 mW,在锁模后的飞秒状态下激光功率为 410 mW,抽运光照射在发射极上的入射角度 θ_p 为 45° ,探测光垂直入射于电光晶体。首先用(100)方向的 InAs 半导体作为发射极,在垂直于入射飞秒激光的偏振方向上加以磁场强度大约为 1 T 的永久强磁体磁场,用 200 μm 厚(110)晶向的 ZnTe 电光晶体予以探测,得到了有和没有磁场情况下的太赫兹发射光谱,如图 2 所示。其次,用(100)方向的 GaAs(载流子浓度为 $2 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$,不掺杂其他杂质)作为发射极,分别在偏置电压为 0 V, 150 V 和 300 V 的情况下进行了对比测量,探测装置用的是 1 mm 厚的 ZnTe 晶体,其时间分辨发射光谱如图 3 所示。

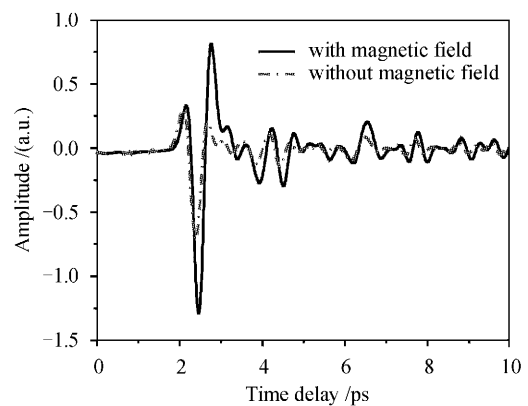


图 2 有磁场和无磁场时的时域谱

Fig. 2 Time-domain spectra with and without magnetic field

3 分析和讨论

从图 2 不难看出,当加了外磁场以后,同样的发射极发射出的太赫兹电场强度要大大增强;由图

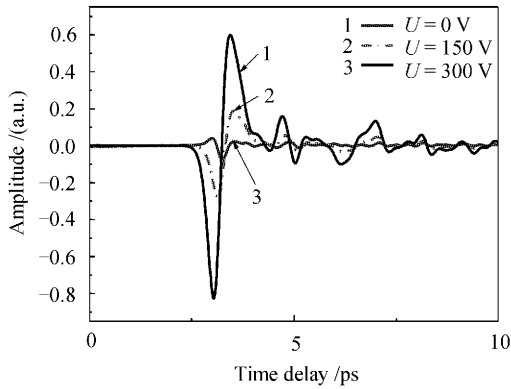


图 3 不同偏置电压下的时域谱
Fig. 3 Time-domain spectra under different bias voltages

3 可知,随着偏置电压的增强,加在发射极上的外加电场强度随之增强,辐射的太赫兹电场强度也随之增强。可见偏置电场的增强也提高了太赫兹的发射功率。

值得注意的是,图 2 示出有和没有磁场情况下的太赫兹脉冲波形基本上是相同的,只是振幅和相位有所差别;但是由图 3 可见,加和不加偏压情况下的太赫兹波形相位相反,这是由于当外加电场时,改变了半导体内建电场的方向,从而导致了太赫兹波的相位在加和不加电场时相差 180°。这说明外加电场和半导体内的内建电场方向是相反的。从这些发射光谱可以发现,外加电场和磁场可以有效地增强太赫兹的辐射强度,所以这种方法在增强太赫兹发射功率上很有发展前景。

利用快速傅里叶变换(FFT),可以得到相应于图 2 和图 3 的频域发射光谱,如图 4 和图 5 所示。图中光谱线的振荡波形来自于水蒸气的吸收和电光

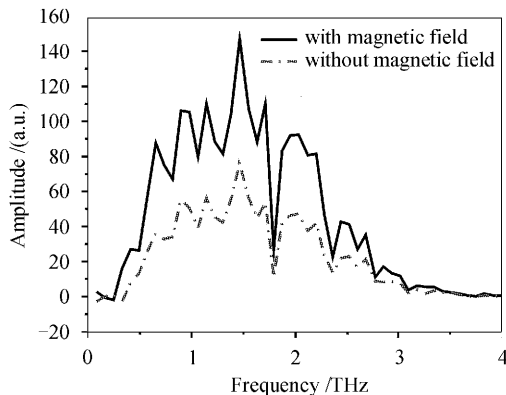


图 4 有磁场和无磁场时的频域谱
Fig. 4 Frequency-domain spectra with and without magnetic field

晶体的法布里-珀罗干涉效应,这可以通过将实验放在真空或氮气环境中进行而加以解决。图 4 和图 5 所示的半导体太赫兹频域发射光谱表明,外加电场和磁场作用可以有效地增强半导体表面的太赫兹辐射功率,这与时域光谱所得到的结论一致。通过图 4 和图 5 还可知道,在外加电场和磁场的的作用下,频谱并没有增宽,也就是说并没有新的频率成分产生。

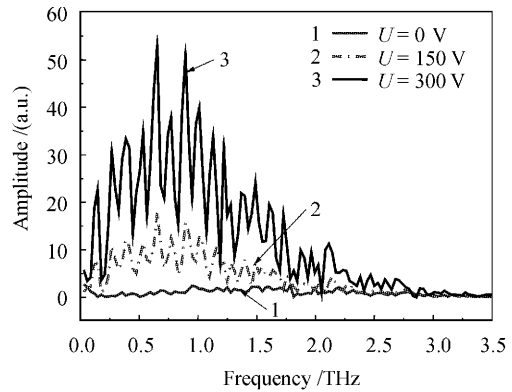


图 5 不同偏置电压下的频域谱
Fig. 5 Frequency-domain spectra under different bias voltages

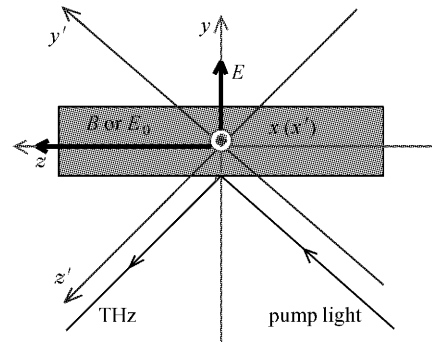


图 6 坐标系的建立
Fig. 6 Diagram of the coordinate system

在研究外加磁场对太赫兹辐射产生的影响实验中,用的磁场方向与电荷运动的方向相垂直,实际上磁场方向不与电荷运动方向相同的话,运动电荷在洛仑兹力作用下要发生偏转。由于此时既有来自抽运光的电场又有外加的磁场,相应的载流子上所受的力既有库仑力又有洛仑兹力,则产生的电子加速度为

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{e}{m^*}(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

由于空穴的质量是正离子的质量,较大而又在分母上,所以由公式知,由其得到的加速度较小,故可以忽略空穴运动。如图 6 建立坐标系。

在 z 方向有稳定的外加磁场 B , 在 y 方向有耗尽电场 E , 则载流子加速度的 x' 向分量有如下的简单

形式: $a_{x'} = -\frac{eE}{m_e^*} \sin\left(\frac{eB}{m_e^*} t\right)$, y' 方向的加速度分量为

$$a_{y'} = \frac{\sqrt{2}eE}{2m_e^*} \sin\left(\frac{eB}{m_e^*} t\right).$$

对非常短的测量时间 t 而言(如 $2\sim 3$ ps)可对上两式进行泰勒展开, 展开并省略高阶项得

$$a_{x'} = -\left(\frac{e}{m_e^*}\right)^2 EBt, a_{y'} = \frac{\sqrt{2}}{2}\left(\frac{e}{m_e^*}\right)^2 EBt. \quad (2)$$

对于只加有外加偏置电场的情况, 由于同时存在有耗尽电场 E 和外加电场 E_0 , 则由公式: $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$

$= -\frac{e}{m^*}(\vec{E} + \vec{E}_0)$ 可知垂直于太赫兹传播方向的加速度分量为

$$a_{y'} = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{e}{m_e^*} (E + E_0). \quad (3)$$

因为测量的太赫兹电场在远场区域内正比于垂直于太赫兹传播方向的电荷加速度的分量^[20], 所以由公式(2), (3)可见, 外加电场和磁场都可以用来增强太赫兹的辐射功率。

4 结 论

通过对半导体太赫兹发射极在有和没有外加电场和磁场作用下发射光谱的测量, 发现外加电场和磁场可以有效地增强太赫兹的辐射强度。借助于经典电磁理论分析, 认为太赫兹发射光谱在外加电场、磁场作用下的增强是起源于半导体中载流子的加速运动受外场的影响。

参 考 文 献

- 1 Paul C. M. Planken, Han-Kwang Nienhuys, Huib J. Bakker *et al.*. Measurement and calculation of the orientation dependence of terahertz pulse detection in ZnTe [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2001, **18**(3):313~317
- 2 Toshihiko Kiwa, Masayoshi Tonouchi. Time-domain terahertz spectroscopy of (100) (LaAlO₃)_{0.3}-(Sr₂AlTaO₆)_{0.7} substrate [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, **40**(Part 2, 1A/B):L38~L40
- 3 P. Y. Han, X. G. Huang, X.-C. Zhang. Direct characterization of terahertz radiation from the dynamics of the semiconductor surface field [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(18):2864~2866
- 4 R. Mendis, D. Grischkowsky. Plastic ribbon THz waveguides [J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, **88**(7):4449~4451
- 5 Xing Qirong, Lang Liying, Mao Fanglin *et al.*. Experiment research on THz wave [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5):640
邢岐荣, 郎利影, 毛方林等. THz 波的实验研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(5):640
- 6 Guo Fengzhen, Yu Changtai, Wang Wei *et al.*. A novel type of electrooptic modulator suitable for THz-width sidebands generation [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(7):935~938
郭凤珍, 于长泰, 汪伟等. 用于产生太赫超宽带带光谱的新型电/光调制器 [J]. *光学学报*, 1995, **15**(7):935~938
- 7 D. Grischkowsky, S. Keiding, Martin van Exter *et al.*. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1990, **7**(10):2006~2015
- 8 Martin van Exter, Daniel R. Grischkowsky. Characterization of an optoelectronic terahertz beam system [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, 1990, **38**(11):1684~1691
- 9 Y. Cai, I. Brener, J. Lopata *et al.*. Design and performance of singular electric field terahertz photoconducting antennas [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(15):2076~2078
- 10 Tae-In Jeon, D. Grischkowsky. Observation of a Cole-Davidson type complex conductivity in the limit of very low carrier densities in doped silicon [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(18):2259~2261
- 11 R. A. Cheville, D. Grischkowsky. Time domain terahertz impulse ranging studies [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(14):1960~1962
- 12 Daniel M. Mittleman, Rune H. Jacobsen, Martin C. Nuss. T-ray imaging [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1996, **2**(3):679~692
- 13 S. Hunsche, M. Koch, I. Brener *et al.*. THz near-field imaging [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **150**:22~26
- 14 X.-C. Zhang, B. B. Hu, J. T. Darrow *et al.*. Generation of femtosecond electromagnetic pulses from semiconductor surfaces [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(11):1011~1013
- 15 Alfred P. DeFonzo, Charles R. Lutz. Optoelectronic transmission and reception of ultrashort electrical pulses [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**(4):212~214
- 16 Ch. Fattinger, D. Grischkowsky. Terahertz beams [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **54**(6):490~492
- 17 A. S. Weling, B. B. Hu, N. M. Froberg *et al.*. Generation of tunable narrow-band THz radiation from large aperture photoconducting antennas [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(2):137~139
- 18 B. B. Hu, X.-C. Zhang, D. H. Auston *et al.*. Free-space radiation from electro-optic crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(6):506~508
- 19 X.-C. Zhang, Y. Jin, L. E. Kingsley *et al.*. Influence of electric and magnetic fields on THz radiation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(20):2477~2479
- 20 X.-C. Zhang, Y. Jin, T. D. Hewitt *et al.*. Magnetic switching of THz beams [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(17):2003~2005