

化合物半导体的 THz 发射光谱*

赵国忠 张振伟 崔伟丽 张存林

(首都师范大学物理系, 北京 100037)

摘要: 利用反射式太赫兹(THz)辐射产生与探测系统,研究了基于不同半导体的 THz 发射光谱.通过快速傅里叶变换,由测得的 THz 时域光谱得到了其相应的频域光谱,从而对不同半导体的 THz 发射性质进行了比较.结果表明,未掺杂的砷化铟(InAs)较其他半导体材料有更高效率的 THz 发射效率.

关键词: THz; 半导体; 电光取样; 发射光谱

PACC: 0765; 2930; 3320E; 4280W; 7850G

中图分类号: O433.4 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)S0-0009-04

1 引言

近年来,太赫兹时域光谱学(THz-TDS)在科学和技术方面都得到了广泛的应用^[1~3].一般来说,有两种方法可以产生太赫兹脉冲:一种是所谓的光学整流方法^[4],即超短激光脉冲带宽内的频率成分在诸如 ZnTe 和 GaP 这样的非线性光学晶体中发生混频,而产生短周期的 THz 脉冲;另一种是超短激光脉冲照射在加有偏置电场或磁场的诸如 GaAs 这样的半导体上,产生一种超快瞬态电流,从而辐射 THz 脉冲^[5].这两种方法中,光学整流需加有偏置电场和进行微制备发射极(亦称微制备天线)的方法,具有简便易行的优点,其缺点是光学整流所得到的峰值电场一般较偏置电场发射极所产生的峰值电场要小得多.微制备天线典型的尺度是几微米到几十微米,一般需要用光刻等技术制作而成,工艺要求高,设备复杂,一般实验室难以做到.一种可供选择的替代办法是所谓的大孔径发射极^[6],即在半导体上制备两个电极,其间隔可以大于所发射 THz 光的波长.大多数情况下,这种装置需要加一个直流偏置电压,其最大电压由电流所产生的热量所限制.大孔径发射极通常和放大的脉冲激光配合使用,因为放大的激光脉冲不能聚焦在很小的光斑尺度内而不损坏材料.据我们所知,它们很少与低峰值功率的钛蓝

宝石激光结合使用.

另一方面,太赫兹 THz 探测系统可以分为三类^[7~9]:第一类是热辐射计,实质上是一种热探测器;第二类是电光探测系统,即在诸如(110)取向的 ZnTe 晶体中,THz 电场引起同步探测脉冲的偏振变化,通过偏振分束后,探测两束光的差别而确定 THz 电场强度的信息;第三类使用在诸如低温生长的 GaAs 半导体上微制备天线,或者利用辐射损伤在蓝宝石上的硅制备天线结构,由同步探测脉冲进行时控测量.在这三种探测方法中,热辐射计的缺点是,工作时需要液氮致冷;电光探测具有极大的优点,它可同时测量 THz 电场的振幅和相位,并且极其简单,但缺点是在探测晶体内的多次反射,以及由于相位匹配和吸收所引起的 THz 脉冲的再成形,使 THz 脉冲发生形变;时控微制备天线也能同时测量 THz 脉冲的振幅和相位,但是需要使用超净室设备和具有制备它们的专门技术.文献^[10]已经给出有关基于微制备天线的 THz 时域光谱系统详细的噪声分析.文献^[9]对电光探测和微制备天线探测进行了比较,我们已经对电光探测方案作了一个类似的详细分析.另外,基于不同半导体表面辐射 THz 电磁波的性能已有研究^[11],但是仍然不够全面.

本文,我们利用反射式 THz 辐射装置,基于不同的半导体样品研究了它们的发射光谱.采用光学整流方法产生 THz 脉冲,利用电光取样技术探测

* 国家自然科学基金(批准号:10390160 和 10474067)和国家高技术研究发展计划(批准号:2003AA333090)资助项目

赵国忠, Email: guozhong-zhao@mail.cnu.edu.cn

2004-09-10 收到, 2004-12-10 定稿

THz 电场的时域光谱,比较了几种不同的半导体样品辐射 THz 电磁脉冲的性能.

2 原理和实验装置

我们已经建立了一个相对简单高效的 THz 发射和探测系统^[12],其中心是一台 15fs 的钛蓝宝石激光器.在这个系统中,把平均功率为 400mW 的 fs 激光脉冲聚焦在半导体表面上,光斑直径约为 120 μm ,温度保持在 300K 左右.使用 60Hz 的快扫描延迟和锁相探测,用 1mm 厚的 (110) 取向的 ZnTe 晶体进行电光取样,得到了探测激光量子噪声限制的信号.本系统使用一种独特的电子学系统,不需要微制备技术.实验装置如图 1 所示.

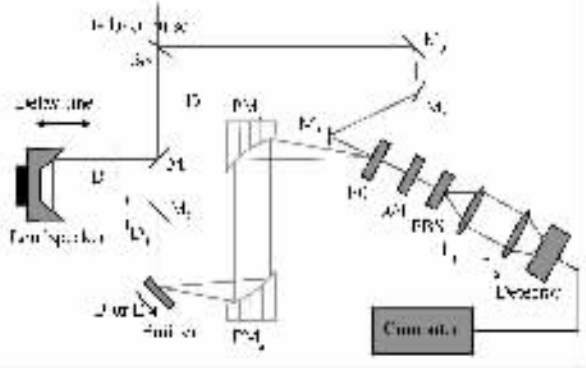


图 1 反射式 THz 产生与探测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reflection-type THz generation and detection system

THz 脉冲的电光探测基于线性电光效应(普克尔效应)原理. THz 电场强度改变了电光晶体的折射率椭球,因此折射率 n_i 变成了 $n_i(E_{\text{THz}})$,其中 i 代表 x, y, z 中任何一个主轴方向.假设 THz 光束沿 z 方向传播,使得同样沿 z 向传播的探测光束的电场强度分量 E_x 和 E_y 有不同的位相改变 ϕ_x 和 ϕ_y .在一段距离 dz 上由于 THz 电场引起的探测光束在不同方向上的位相延迟可表示为 $d\phi = \phi_x - \phi_y$.对于 (110) 晶向的 ZnTe,晶体内不存在固有位相延迟,因此,由于 THz 场引起的位相延迟可被写作^[14]:

$$d\phi_{\text{THz}}(\tau) = \frac{\omega}{c} n_0^3 r_{41} E_{\text{THz}}(\tau) d\tau = C_{\text{ZnTe}} E_{\text{THz}}(\tau) dz \quad (1)$$

其中 τ 是 THz 脉冲和探测脉冲之间的相对时间延迟; r_{41} 是电光张量的分量元素; ω 是探测光频率.

通常,探测光束 ($\lambda \approx 800\text{nm}$) 的群速度比 THz 波大 $n_{\text{THz}}/n_{\text{opt}}$,所以在晶体内,探测光束会超过 THz 脉冲.因此要得到所有位相延迟信号,在整个晶体长度 L 上积分时需要考虑探测光和 THz 脉冲随时间变化的空间重叠.因此与探测脉冲相遇的位相延迟 $\Delta\phi_{\text{THz}}$ 变为:

$$\Delta\phi_{\text{THz}}(\tau) = (1-R) C_{\text{ZnTe}} \int_0^L E_{\text{THz}} \left(\frac{z}{c} \Delta n + \tau \right) e^{-\alpha z} dz \quad (2)$$

这里我们引入了附加因子 $(1-R) = 2n_{\text{cry}}/(1+n_{\text{cry}})$,并考虑了 THz 场在 ZnTe 晶体表面的反射损耗.对 THz 光电场强度 E_{THz} 的积分说明在晶体中 THz 场是衰减的(场吸收系数 α),并且探测脉冲通过晶体传播的群速度和 THz 脉冲不同 ($\Delta n = n_{\text{THz}} - n_{\text{probe}}$).由于 $n_{\text{probe}} < n_{\text{THz}}$,探测脉冲可以有效扫过 THz 脉冲存在于晶体中的部分.

对于 ZnTe 晶体, $\Delta n (= 3.17 - 2.85)$ 和 $\alpha (= 2.5\text{cm}^{-1})$ 都很小,方程(2)可简化为

$$E_{\text{THz}}(\tau) \approx \frac{\Delta\phi_{\text{THz}}(\tau)}{C_{\text{ZnTe}} L} \quad (3)$$

这样就可以直接从测量的相位改变量 $\Delta\phi_{\text{THz}}(\tau)$ 得到 THz 脉冲的时域波形.

3 结果和讨论

正如本文引言中所提到的,基于不同半导体表面辐射 THz 电磁波的性能已有研究^[12],但是仍然不够全面.文献[12]指出,对于带隙大于 fs 脉冲激光光子能量的半导体,没有 THz 辐射过程可以发生;对于 InP, GaAs, $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ ($x < 0.2$), GaSb, InSb, CdTe, CdSe, Ge 和 Si 来说,在相同的条件下,半绝缘 InP 的辐射本领最强,其辐射强度是 Si 的 200 倍.

我们利用所建立的反射式 THz 发射系统,对 InAs, InP, GaAs 和外延层等离子体样品的 THz 辐射性质进行了测量.这四种样品分别为:(1)未掺杂的 (100)InAs(本征载流子浓度约为 $2 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$) 体材料半导体;(2)半绝缘 InP 体材料半导体;(3)外延层等离子体半导体;(4)未掺杂的 (100)GaAs 体材料半导体,它们的时域发射光谱如图 2 所示.可以看出,未掺杂的 InAs 较包括 InP 在内的其他样品有更强的 THz 发射性能,其峰-峰值电场强度大约为 InP 的 2 倍,外延层等离子体也有很好的 THz 发射

性能.

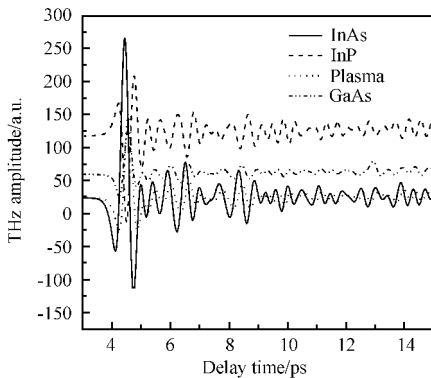


图 2 半导体时域发射光谱

Fig. 2 Time-domain THz emission spectra of different semiconductors

由图 2 还可以看出,半绝缘 InP 发射极较其他半导体有不同的内建电场极性,从而其 THz 发射时域光谱显示了不同的脉冲波形.从图 2 不难得到,如果以 InAs 的 THz 电场强度峰-峰值进行归一化,这四种样品的发射强度依次为: InAs (100); InP (57.4); Plasma (46.2); GaAs (26.3). 可见它们的 THz 发射本领几乎处于同一水平,不像 Si, Ge, GaSb 和 GaSe 等半导体的 THz 发射本领要低两个数量级^[12].事实上,我们也利用同一实验装置对 n 型和 p 型掺杂的 InAs、GaSb 以及 InSb 和 ZnTe 进行了类似的 THz 发射光谱测量,但这些样品的 THz 发射本领都比 InAs 弱的多.正如文献^[12]所指出的,半导体表面辐射 THz 电场强度的振幅和位相依赖于样品的载流子浓度、杂质浓度以及内部电场的强度和极性,我们也得到了同样的结果.

通过快速傅里叶变换(FFT),我们由测得的 THz 时域光谱得到了其相应的频域光谱,如图 3 所示.图中显示了多个吸收峰,这是因为在进行 THz 电光探测之前,充斥于系统中的水蒸气选择性吸收了部分 THz 电磁辐射所致.由此图不难看出,半导体 InAs 发射极较其他半导体不仅具有较强的发射强度,而且其辐射谱宽也比其他发射极大.与时域光谱相对应的是,频域光谱也反映了半绝缘 InP 半导体与其他半导体发射极相比所不同的内建电场极性.因此,可以通过 THz 发射光谱的测量来判断半导体内建电场的极性,这与文献^[12]所得出的结论一致.

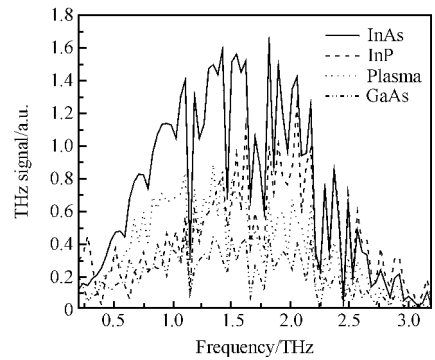


图 3 半导体的 THz 频域光谱

Fig. 3 Frequency-domain THz emission spectra of semiconductors

4 结论

通过对不同半导体发射极的 THz 发射光谱的研究,可以看到未掺杂的 InAs 较 InP 和 GaAs 有更高效率的 THz 光学整流辐射本领,半导体等离子体也是较好的 THz 发射极.

参考文献

- [1] Liu H C, Song C Y, Wasilewski Z R, et al. Coupled electron-phonon modes in optically pumped resonant intersubband lasers. *Phys Rev Lett*, 2003, 90: 77402
- [2] Cao J C. Interband impact ionization and nonlinear absorption of terahertz radiation in semiconductor heterostructures. *Phys Rev Lett*, 2003, 91: 237401
- [3] Cao J C, Lei X L. Multiphoton-assisted absorption of terahertz radiation in InAs/AlSb heterojunctions. *Phys Rev B*, 2003, 67: 085309
- [4] Fujita M, Toyoda T, Cao J C, et al. Induced charge-density oscillation under a quantizing magnetic field and intense terahertz radiation. *Phys Rev B*, 2003, 67: 075105
- [5] Wu B H, Cao J C, Xia G Q. Simulation of semiconductor intersubband Raman laser. *J Appl Phys*, 2003, 94: 5710
- [6] Zhang X C, Hu B B, Darrow J T, et al. Generation of femtosecond electromagnetic pulses from semiconductor surfaces. *Appl Phys Lett*, 1990, 56(11): 1011
- [7] Weiss C, Wallenstein R, Beigang R. Magnetic-field-enhanced generation of terahertz radiation in semiconductor surfaces. *Appl Phys Lett*, 2000, 77: 4160
- [8] Wu W, Zhang X C. Ultrafast electro-optic field sensors. *Appl Phys Lett*, 1996, 68: 1604
- [9] Cai Y, Brener I, Lopata J, et al. Coherent terahertz radiation detection; Direct comparison between free-space electro-optic sampling and antenna detection. *Appl Phys Lett*, 1998, 73: 444

- [10] Van Exter M, Grischkowsky D R. Characterization of an optoelectronic terahertz beam system. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 1990, 38(11):1684
- [11] Zhang X C, Auston D H. Optoelectronic measurement of semiconductor surfaces and interfaces with femtosecond optics. *J Appl Phys*, 1992, 71(1):326
- [12] Zhao G, Schouten R N, Van der Valk N, et al. Design and performance of a THz emission and detection setup based on a semi-insulating GaAs emitter. *Rev Sci Instrum*, 2002, 73(4):1715
- [13] Zhao G, Schouten R N, Van der Valk N. Design and performance of a THz emission and detection setup based on a semi-insulating GaAs emitter. *J Opt Soc Am B*, 2002, 19(6):1476

THz Emission Spectra Based on Different Compound Semiconductors^{*}

Zhao Guozhong, Zhang Zhenwei, Cui Weili, and Zhang Cunlin

(*Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037, China*)

Abstract: A THz generation and detection system using the reflection-type THz radiation equipment is presented. The THz emission spectra based on different compound semiconductors are shown. By means of fast Fourier transformation, the frequency domain spectra of THz emission by different semiconductors are obtained from their time domain spectra. THz emission properties of different semiconductors are compared. The results show that the undoped InAs is a kind of more effective THz emission material than those of other studied semiconductors.

Key words: THz; semiconductor; electro-optic sampling; emission spectra

PACC: 0765; 2930; 3320E; 4280W; 7850G

Article ID: 0253-4177(2005)S0-0009-04

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 10390160 and 10474067) and the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2003AA333090)

Zhao Guozhong, Email: guozhong-zhao@mail. cnu. edu. cn

Received 10 September 2004, revised manuscript received 10 December 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics