

不同中心波长飞秒脉冲激发 InAs 表面 辐射太赫兹波的机理研究^{*}

孙红起 赵国忠[†] 张存林 杨国桢

(首都师范大学物理系, 太赫兹波谱与成像重点实验室, 北京 100037)

(2007 年 4 月 25 日收到, 2007 年 5 月 25 日收到修改稿)

研究了 p 型 (100) InAs 在不同中心波长飞秒激发光 (750—850 nm) 作用下的太赫兹 (THz) 波辐射特性. 这种太赫兹辐射的光谱性质与光学 Dember 效应密切相关, 飞秒脉冲激发下产生的载流子在 InAs 表面的 Dember 场内做加速运动, 从而辐射出 THz 电磁波. 实验结果表明: 不同中心波长的激发光作用下, InAs 表面产生的 Dember 电场、光生载流子浓度、谷间散射效应以及处于不同状态的载流子数目都发生了变化, 因而激发出太赫兹波的功率、振幅、频谱分布和有效谱宽是不同的. 这项研究将有利于 THz 时域光谱技术以及实验系统的优化, 对 InAs 表面辐射太赫兹电磁波的超快过程及其物理机理也作了进一步的解释.

关键词: 太赫兹波, InAs, Dember 电场, 谷间散射效应

PACC: 3200, 3270, 3270J

1. 引 言

利用飞秒脉冲激发半导体表面是一种非常有效的获得相干太赫兹 (THz) 电磁辐射的方法. 到目前为止, 获得 THz 波最常用的机理有三种: 光导激发机理^[1], 光整流效应^[2], 半导体表面场效应^[3,4]. GaAs 是最常见的被用作光导激发机理的 THz 发射极, 光整流效应常用 ZnTe 作发射极. 近年来, 利用半导体表面场获得 THz 辐射, 被多数人认为是最实用和最高效的方法, 由于其简便和高辐射效率的特点, 获得了广泛的应用. 人们经常提到的表面场包括耗尽层电场^[3]和丹伯尔电场^[4]两种类型, 在表面场机理提出的早期, 利用耗尽层电场产生 THz 辐射曾占主导地位, 最典型的就是一段时期内 InP (耗尽层电场较强) 被认为是辐射 THz 波效率最高的辐射源^[3]. 随着 Dember 电场逐渐被人们所认识, 发现 InAs (Dember 电场较强) 的辐射效率比 InP 还要高^[4], 使得 InAs 在许多情况下成了 THz 波发射极的首选.

InAs 是一种窄带隙半导体材料, 其禁带宽度在

300 K 时仅为 0.36 eV, 其辐射出 THz 波主要是由于光生载流子在 Dember 电场作用下加速运动产生的. 通常情况下, 利用 InAs 比利用宽带隙的 InP (1.34 eV) 和 GaAs (1.43 eV) 获得的 THz 辐射强度要高一个量级^[4]. 近期文献中, 将 InAs 置于适当的磁场中, 大大地提高了 THz 波的辐射强度, 强度在相同条件下比 GaAs 辐射强度高三个量级^[5,6]. 因此, InAs 作为一种更加高效、宽谱、高强度的 THz 辐射材料正得到广泛的研究^[7,8]. InAs 作为发射极所辐射出的 THz 信号与激发脉冲的入射角度、温度、磁场、InAs 的掺杂类型及掺杂浓度的关系^[4,9], 文献中已有报道. 但对于入射脉冲的激发波长对 InAs 所辐射出的 THz 信号的影响, 相关报道的研究工作还不够深入. Hiroshi 等人^[9]报道过在磁场中入射脉冲波长对 THz 信号的影响, 介绍了 THz 信号的饱和磁场强度值随波长增加而向低磁场区移动的现象. 本文将对 InAs 在不同中心波长 (750—850 nm) 的激发脉冲作用下所辐射出的 THz 波特性的物理机理进行理论解释.

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金 (批准号: 10390160, 10474067), 北京市自然科学基金 (批准号: 4073030) 和北京市教委科技发展计划面上项目基金 (批准号: KM200510028003) 资助的课题.

[†] 通讯联系人, E-mail: guozhong-zhao@mail.cnu.edu.cn

2. 实验装置和方法

图 1 是实验装置的示意图,实验中所使用的飞秒激光器是由光谱物理公司生产的钛宝石飞秒脉冲激光器,激光器的重复频率为 82 MHz,中心波长在 810 nm 时脉宽为 100 fs,平均功率为 930 mW,可产生的脉冲中心波长范围是 750—850 nm. 由飞秒脉冲激光器发出的飞秒脉冲经分束镜分为 I 和 II 两束,半波片可以调节两束光的能量分配,光束 I 作为抽运

光,经频率为 1.2 kHz 的斩波器斩波再通过时间延迟后,以 45°角入射到 p 型 100 砷化铟晶体上. 光束 II 为探测光束,它通过与抽运光同样的光程后,由电光晶体对 THz 电场进行取样. THz 电场调制电光晶体的折射率椭圆,也即发生了电光效应,使同时到达的探测光经电光晶体后偏振特性发生变化. 被调制的探测光经 1/4 波片和渥拉斯顿棱镜后,被一对光电二极管探测,得到的差分信号经过锁相放大器和计算机同步采集,记录的差分信号就反映了辐射出 THz 信号的情况. 图中虚线框为一个密封仓,充满干

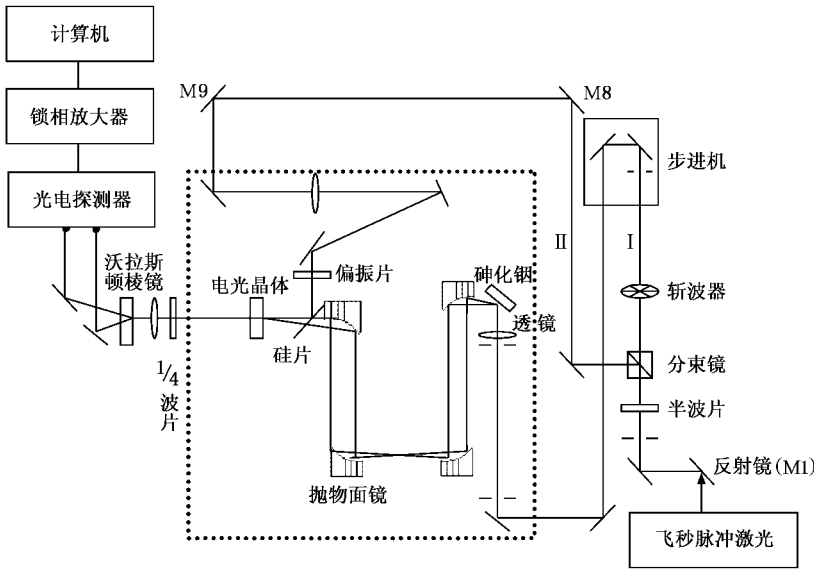


图 1 实验装置示意图

燥的氮气,相对湿度保持在 4.0% 左右,以降低水蒸气对 THz 辐射的吸收^[10-14]. 我们的实验是在室温(约 20℃)下进行的.

为了研究激发脉冲的波长对 InAs 表面辐射 THz 电磁波的影响,我们在不同中心波长的飞秒激光脉冲激发下,测量了 InAs 表面所辐射 THz 电磁波时域光谱. 通过调节飞秒脉冲激光器,使其发出中心波长为 750—850 nm 的飞秒脉冲,每隔 5 nm 进行一次实验. 控制抽运光的功率在斩波器后测得的值保持在 250 mW,探测光的功率在 M9 和 M8 两反射镜之间的值保持在 50 mW,调节半波片和在 M9, M8 两反射镜之间加入的衰减片,可以达到改变波长后对抽运光和探测光功率保持恒定的要求,这样我们保证了在改变激发光中心波长的过程中,始终保持抽运和探测光强度恒定,从而在相同的光强条件下研究激发光波长对 THz 辐射的影响. 太赫兹时域光谱测量方法与其他实验相同.

3. InAs 表面辐射 THz 波的机理与结果分析

3.1. InAs 表面辐射 THz 波的机理

飞秒脉冲照射在 InAs 晶体上,在被照射半导体表面附近将产生高浓度的电子-空穴对,因而沿光照方向将存在电子和空穴的浓度梯度,并导致相应的扩散. 由于电子和空穴的迁移率不同,导致样品光照面和背面间异性电荷的积累,从而在样品中沿光照方向形成一个电场,即 Dember 电场. Dember 电场在穿透深度内产生 Dember 电压. 飞秒脉冲激发 InAs 表面产生的光生载流子,在 Dember 电场的作用下加速运动,形成瞬态光电流而辐射出 THz 电磁波.

静态的 Dember 电压可以表示为^[4]

$$V_D = \frac{k_B T}{e} \frac{b-1}{b+1} \ln \left(1 + \frac{(b+1)\Delta n}{n_0 b + p_0} \right), \quad (1)$$

其中, $b = \mu_e / \mu_p$ 是电子迁移率(μ_e)和空穴迁移率(μ_p)的比值, n_0 和 p_0 分别指的是电子和空穴的初始浓度, T 是激发状态下电子和空穴的温度, Δn 是光生载流子的浓度.

从(1)式可看出, 电子的迁移率 μ_e 越高, 电子的剩余能量 ΔE 越多 ($\Delta E \propto T$), 抽运功率 I 越大 ($\Delta n \propto I$), 产生的 Dember 电压就越大, 且由于 InAs 为窄带隙半导体, 穿透深度 d 较小, 因此产生的 Dember 场 E_D 较大

$$E_D = \frac{V_D}{d}. \quad (2)$$

受激 InAs 在 Dember 场下产生的瞬态光电流密度为

$$J \propto \Delta n e \mu_e E_D, \quad (3)$$

其中 Δn 指的是 InAs 表面场内的光生载流子浓度.

由此得到 THz 电磁波在远场处的电场可以表示为

$$E_{\text{THz}} \propto \frac{\partial J(t)}{\partial t}. \quad (4)$$

在 750—850 nm 波长范围内(对应的光子能量在 1.66—1.46 eV), 不同中心波长的飞秒脉冲激发 InAs 表面辐射 THz 波信号表现出不同的性质, 包括功率、辐射振幅、有效谱宽、峰值频率和峰值大小等等, 对不同中心波长的飞秒脉冲作用下, InAs 表面辐射出的 THz 波的功率、振幅和有效谱宽进行了研究.

3.2. 实验结果与讨论

图 2 示出了不同中心波长的飞秒脉冲作用下, 在相同的抽运和探测功率下, InAs 表面辐射出 THz 波的振幅-频率曲线. 从图中可以看出, 在不同中心波长的飞秒脉冲激发下, THz 信号的峰值振幅是不同的, 短波长(760 和 770 nm)和长波长(845 和 850 nm)下 THz 信号的峰值都比较小, 中心波长为 835 nm 的激发脉冲下, THz 波的峰值最大, 810 和 840 nm 下, THz 波的峰值大小基本相同. 由于横坐标是 THz 波的频率, 纵坐标是 THz 波电场的振幅大小, 因此图 2 不同中心波长下 THz 波的波形与横坐标所围面积的大小, 反映了 InAs 在不同中心波长的飞秒脉冲作用下辐射出 THz 波功率的大小. 短激发波长和长波长下 InAs 表面所辐射出的 THz 波功率都比较小, 中心波长为 835 nm 的激发脉冲作用下, THz 辐射功率最大.

结合(1)(2)式可以看出, 不同中心波长的激发脉冲作用下, 在 InAs 表面产生的 Dember 电场是不

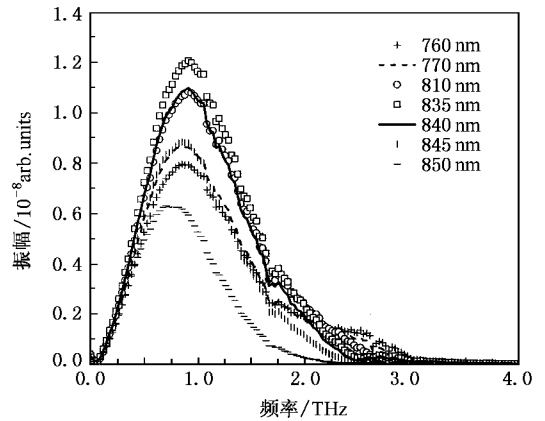


图 2 相同的抽运和探测功率下, 不同中心波长的飞秒脉冲激发 InAs 表面辐射出的 THz 波频谱图

同的, 激发波长越短, 载流子拥有的剩余能量 ΔE 越大, μ_e , T 就越大, Dember 电压也就越大, 短波长下透射深度 d 变短, 也增大了产生的 Dember 电场; 当在短波长激发下, 由于单个激发光子能量的增加, 使得相同激发功率下激发光子个数减少, 造成了(2)式和(3)式中 Δn 的减少, 使得产生的瞬态光电流 J 减小. 激发光中心波长的改变, 引起(3)式中 E_D , μ_e 和 Δn 的变化, 决定了(4)式中辐射出 THz 波电场的大小. 因此, 图 2 中相同的抽运和探测功率下, InAs 表面辐射出 THz 波的振幅-频率曲线, 在不同的中心波长飞秒脉冲激发下, 表现出不同的频谱分布和辐射强度特性.

图 3 中, 示出了 THz 信号在不同频率处的振幅大小随激发脉冲的中心波长变化的曲线. 因为不同波长下的 THz 信号, 都是在相同的抽运和探测功率下得到的, 因此图 3 中的曲线, 反映了在不同中心波长的飞秒脉冲激发下, InAs 辐射出 THz 波的振幅在

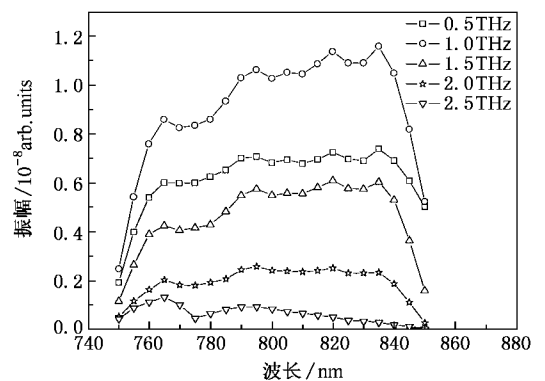


图 3 不同中心波长的激发脉冲激发 InAs 表面辐射出的 THz 信号在不同频率处的振幅

低频(0—1.0 THz)、中频(1.0—2.0 THz)和高频(2.0 THz 以上)区表现出不同的行为.从图 3 可以看出,短波长(750—765 nm)和长波长(840—850 nm)的激发脉冲作用下,InAs 辐射出的低频和中频 THz 信号的振幅比中心波长为 790—835 nm 的飞秒脉冲作用下辐射出的振幅要小,且短波长下波长越短振幅越小,长波长下波长越长振幅越小.790—835 nm 的激发光作用下,辐射出的 THz 信号在 0.5,1.0,1.5,2.0 THz 处的振幅大小基本不随波长的改变而变化. InAs 辐射出 2.5 THz 附近的高频信号,在短波长下振幅较大,长波长下振幅较小,840 nm 以上的激发光作用下,辐射出的 THz 信号基本没有在 2.5 THz 频率以上的高频辐射成分了.

相同的抽运功率下,短波长激发光作用下产生的载流子浓度 Δn 较低,但载流子拥有的剩余能量 ΔE 较大,穿透深度 d 较小,同时载流子的谷间散射^[4]也起了重要的作用.短波长激发光作用下,拥有较大剩余能量的载流子受到的谷间散射较多,使得其有效质量变大,导致较低的电子迁移率和较长的弛豫时间,从而使得在短波长的激发光作用下,辐射出的 THz 波振幅较小.随波长的增加,谷间散射效应减小,使得在此波段 InAs 表面辐射出的低中频 THz 波的振幅随波长的增加而增大.790—835 nm 的激发光作用下,波长的增加引起(1)式 T 的减小和(2)式中 d 增大,使得激发产生的 Dember 场减小,但波长的增加使得(3)式中 Δn 增大,综合起来(4)式中 THz 波的低中频电场振幅在此激发光波段随波长的变化基本保持不变.840—850 nm 的激发脉冲作用下,InAs 辐射出 THz 波的低中频振幅的变化规律,反映了随着波长的增加,虽然产生的载流子浓度增加了,但产生辐射出低中频 THz 波的载流子数目减少了,由于长波长下 μ_e , T 减小, d 增大,使得辐射出的 THz 波振幅较小,且在此波段随波长的增加振幅减小. InAs 辐射出的高频 THz 信号,在短波长下振幅较大,长波长下振幅较小,反映了短波长下光子能量较大,产生高频振荡的载流子数目相对较多,而长波长下光子能量较小,几乎不能产生辐射出高频 THz 波的载流子.

图 4 给出的是几个不同中心波长的飞秒脉冲照射到 InAs 表面上所辐射出 THz 波的归一化频谱图.从图中可以看出,短波长激发光作用下,辐射出 THz 波的高频(2.0 THz 以上)成分明显增多,这与上述分析一致.另外,从图 4 中还可以看出,760 nm 的激发

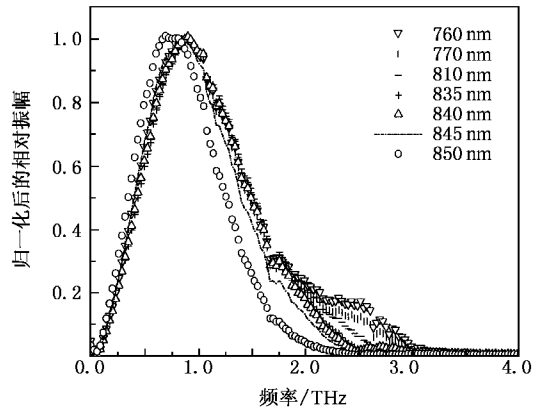


图 4 不同中心波长的飞秒脉冲激发(100)InAs 辐射出 THz 波的归一化频谱图

光作用下辐射出 THz 波的最高频率在 3.25 THz 附近,而 850 nm 的激发光下得到的 THz 波的最高频率位置在 2.25 THz 左右,THz 波的谱宽随激发光波长的增加呈现了变窄的趋势.

关于光谱宽度,很多文献中都取半极大全宽或极大值的 $1/e$ 作为谱宽来分析光谱宽度.对于 THz 光谱系统,这两种定义下的光谱宽度都限制了有效光谱分析的频率范围.通常测得的一些生物样品、毒品和爆炸物的 THz 波透射光谱有效谱宽都能达到 2.2 THz(0.2—2.4 THz)左右,而根据上述的两种定义,其有效光谱范围分别只有 1.0 THz(0.4—1.4 THz)和 1.3 THz(0.3—1.6 THz).因此根据不同波长下得到的 THz 波波形的特点及经验总结,我们把 THz 光谱的有效宽度定义为归一化相对幅值为 0.0138 的两端间的频率间隔,称为 THz 波的有效谱宽.

图 5 示出了 THz 波的有效谱宽与激发光波长的关系.可以理解,载流子的振荡频率决定了辐射出 THz 波的频率,处于某一振荡频率下的载流子数和

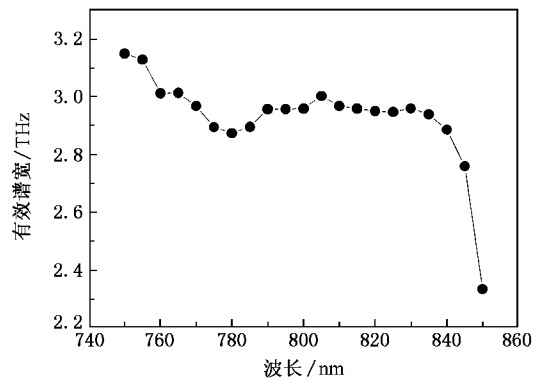


图 5 THz 波的有效谱宽与波长的关系

Dember 场的大小决定了辐射出的该频率 THz 波的振幅,两者共同决定了辐射出 THz 波的有效谱宽.图 5 中,在 750—765 nm 的激发光作用下,辐射出 THz 波的有效谱宽较宽的主要原因是 InAs 辐射出 THz 波的高频成分增多了,增加了 THz 波的有效谱宽.短波长作用下,产生的能辐射出 3.0 THz 附近电磁波的高频载流子数目相对较多,使得辐射出 THz 波的有效谱宽在短波长下较宽.在 780 nm 附近的激发光作用下,载流子的相对较高振荡频率以及较强的谷间散射效应,造成了光谱宽度较小.790—835 nm 的激发光下,THz 波的有效谱宽在 2.9 THz 附近,且基本不随波长的变化而改变,可看作是载流子数目和 InAs 表面的 Dember 场变化的综合作用,使得辐射出 THz 波的有效谱宽基本不变.840—850 nm 的激发光下,激发产生的高振荡频率的载流子随波长的增加急剧减少,高频辐射明显减少,造成了有效谱宽在这波段随激发光波长的增加迅速下降,从 2.9 THz 减小到 2.3 THz.

综上所述,实验结果表明:InAs 辐射出 THz 波的功率与激发脉冲的中心波长有密切的关系,短波长(750—780 nm)和长波长(840—850 nm)的激发光作用下,THz 波的振幅都比较小,790—835 nm 的激发光下,THz 波的振幅较大.不同中心波长的激发光下,InAs 表面辐射出的 THz 波在低、中、高频处的振幅大小与波长的依赖关系是不同的.750—765 nm 的激发光作用下,InAs 辐射出的高频 THz 波振幅较大,790—835 nm 的激发光下,InAs 辐射出的低中频

率的 THz 波振幅较大.在 750—765 nm 的激发光作用下,InAs 辐射出 THz 波的有效谱宽较宽,随波长的增加有效谱宽减小.790—835 nm 的激发光作用下,THz 波的有效谱宽基本不变,在 2.9 THz 附近.835—850 nm 的激发光作用下,THz 波的有效谱宽随波长的增加而急剧减小,850 nm 时降为 2.3 THz.

4. 结 论

本文从受激 InAs 辐射 THz 波的物理机理出发,定性分析了不同中心波长(750—850 nm)的激发光作用下 InAs 表面辐射出 THz 波的特性.实验表明,InAs 表面辐射出 THz 波的振幅大小、有效谱宽与激发脉冲的中心波长有着密切的关系.改变激发光的中心波长,InAs 表面产生的 Dember 电场、激发产生的载流子浓度、谷间散射效应以及产生的处于不同状态下载流子的数目这几个因素都会发生变化.不同中心波长的激发光作用下,这些变化因素起着不同的作用,这些因素的综合作用结果决定了 THz 波振幅大小和有效谱宽与激发脉冲的中心波长的关系.本工作的实验结果,不但有利于促进太赫兹时域光谱技术以及实验系统的优化,并且还进一步帮助我们认识了 InAs 受飞秒脉冲的激发辐射 THz 电磁波的超快过程中所涉及的物理机理,对激发 InAs 及类似材料产生 THz 辐射的理论和实验具有一定的指导意义.

-
- [1] Auston D H, Smith P R 1983 *Appl. Phys. Lett.* **43** 631
- [2] Wu L, Zhang X C, Auston D H 1992 *Appl. Phys. Lett.* **61** 1784
- [3] Zhang X C, Hu B B, Darrow J T, Auston D H 1990 *Appl. Phys. Lett.* **56** 1011
- [4] Gu P, Masahiko T, Shunsuke K, Kiyomi S 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 5533
- [5] Hangyo M, Migita M, Nakayama K 2001 *J. Appl. Phys.* **90** 3409
- [6] Heyman J N, Neocleous P, Hebert D *et al* 2001 *Phys. Rev. B* **64** 085202-1
- [7] Hasselbeck M P, Staknaker D, Schlie L A *et al* 2002 *Phys. Rev. B* **65** 233203-1
- [8] Johnston M B, Whittaker D M, Corchia A, Davies A G *et al* 2002 *Phys. Rev. B* **65** 165301-1
- [9] Hiroshi T, Sakai M, Alex Q, Ono Shingo *et al* 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 4545
- [10] Wang W N, Yue W W, Yan H T *et al* 2005 *Chin. Sci. Bulletin* **50** 1561
- [11] Yue W W, Wang W N, Zhao G Z *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3094 (in Chinese) [岳伟伟、王卫宁、赵国忠等 2005 物理学报 **54** 3094]
- [12] Li N, Sheng J L, Sun J H *et al* 2005 *Opt. Express* **13** 6750
- [13] Guo L T, Zhang L L, Wang X H *et al* 2005 *Chin. Opt. Lett.* **3** (suppl) S1
- [14] Wang W N, Yan H T, Yue W W, Zhao G Z *et al* 2005 *Science In China Ser. G* **35** 492 (in Chinese) [王卫宁、闫海涛、岳伟伟、赵国忠等 2005 中国科学 **G 35** 492]

The characteristics of terahertz radiation from InAs irradiated with femtosecond optical pulses of different wavelengths^{*}

Sun Hong-Qi Zhao Guo-Zhong[†] Zhang Cun-Lin Yang Guo-Zhen

(Key Laboratory of THz Spectroscopy and Imaging , Departments of Physics , Capital Normal University , Beijing 100037 , China)

(Received 25 April 2007 ; revised manuscript received 25 May 2007)

Abstract

The characteristics of terahertz (THz) radiation from the surface of an (100)p-InAs crystal excited by fs laser pulses of different wavelengths (from 750 to 850 nm) are investigated experimentally. The terahertz radiation can be interpreted as being emitted from accelerated photo-carriers in the Dember field and be detected by using the free-space electro-optic sampling method. A (110) ZnTe crystal was used as detector. The results of experiment show that the Dember field in the surface of InAs , concentration of excited carriers , intervalley scattering and the concentration of excited carriers of different states , all changed when the wavelength of excited pulse changed , so the radiant efficiency and the effective spectral width of terahertz wave were different. This investigation will be useful to the measure of time domain spectrum of samples and the optimization of experimental system. It also gives better physieal insight into the ultra-fast process of terahertz wave radiation from InAs excited by femtosecond pulses.

Keywords : THz wave , InAs , Dember field , intervalley scattering

PACC : 3200 , 3270 , 3270J

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10390160 , 10474067) , the Natural Science Foundation of Beijing , China (Grant No. 4073030) and the Science Foundation of Beijing Education Committee , China (Grant No. KM200510028003).

[†] Corresponding author. E-mail : guozhong-zhao@mail.cnu.edu.cn