

准二维电子系统的远红外栅压比谱*

胡灿明 陈张海 史国良 陆卫 张波 石晓红 刘普霖 沈学础

(中国科学院上海技术物理研究所, 中国科学院红外物理国家重点实验室, 上海, 200083)

摘要 讨论应用快扫描傅里叶变换光谱仪研究异质结表面及量子阱中二维电子气的高频动力学性质, 利用制备有金属栅极的异质结样品的肖特基场效应特性, 通过光谱仪控制栅压门电源交替选择栅压扫描, 获得了二维电子气的吸收栅压比谱, 由此观察到该低维系统的几类基本红外激发, 包括回旋共振、二维等离子激元及电子子能带间的共振跃迁。

关键词 二维电子气 红外激发, 傅里叶变换光谱.

半导体 0471.1

异质结

①

引言

现代半导体器件的设计越来越多地立足于具有二维空间电荷系统的半导体结构, 代表性的例子是硅的金属-氧化物-半导体场效应器件和分子束外延生长的 GaAs/AlGaAs 调制掺杂异质结构, 这几类准二维电子系统表现出许多引人注目的独特物理性质^[1]. 由于这类系统中的电激发通常具有 1~100meV 的特征能量, 对应于 10~1000cm⁻¹波段的红外光子频率, 红外光谱和红外磁光光谱自然地成为研究这类系统特性的有效实验手段.

本文报道傅里叶变换红外栅压比谱的实验系统, 通过光谱仪控制栅压门电源交替选择栅压扫描, 方便地获得了 GaAs/AlGaAs 异质结界面及 GaAs 量子阱中准二维电子气的栅压比谱, 观察到准二维电子气的回旋共振、二维等离子激元以及电子子能带间的红外共振跃迁, 由此讨论了这类准二维电子系统的高频动力学性质.

1 准二维电子气的几种红外激元

本文研究两种 GaAs/AlGaAs 异质结结构中的二维电子气, 一种是如图 1(a)和 1(c)所示的调制掺杂结构, 其 n 型掺杂的 AlGaAs 中的电子容易转移到未掺杂的 p 型 GaAs 中, 界面附近由于空间电荷分离而形成势阱, 使电子被束缚在界面附近 GaAs 一侧约 100Å 的薄层中, 形成二维电子气; 另一类是图 1(b)所示的背掺杂结构, 其 n 型掺杂层在远离(约 1μm)界面的 GaAs 一侧, 在表面制备栅极后, 相对于掺杂层加正向偏压, 可以使电子转移到 GaAs/AlGaAs 界面附近形成准二维电子气, 进一步增大栅压, 可以在 AlGaAs 层之间的 GaAs 量子阱中形成第二层准二维电子气, 从而可以在同一块样品中对比研究分别局限于异质结界面和量子阱中的二维电子气的性质, 这两类结构中准二维电子气具有回旋共振、二维子能带间的跃迁以及二维等离子激元等几种基本激发过程, 这几类激发过程可以通过红

*中国科学院留学回国人员择优支持经费资助项目

本文 1996 年 8 月 12 日收到, 修改稿 1996 年 10 月 18 日收到

外吸收谱研究. 制备有栅极的异质结样品可以作为多层光学系统, 采用经典的光传输矩阵的算法研究^[2]. 在光频小于 GaAs 声子频率 ($\hbar\omega < \hbar\omega_{LO}$) 的远红外波段, 容易导得样品的透射率为

$$T(\omega) = \frac{4}{|1 + \sqrt{\epsilon} + (\sigma_g + \sigma_{2D}(\omega))/\epsilon_0 C|^2}, \quad (1)$$

其中 $\epsilon=12.8$ 是 GaAs 的静态介电常数, σ_g 是透明金属栅极的电导, $\sigma_{2D}(\omega)$ 是二维空间电荷层的高频复数电导. 这样, 测量样品的透射率即可研究二维空间电荷层的高频电导谱, 而获得各种光电激发过程的信息. 下面讨论几种基本电子激发过程对高频电导的贡献.

1.1 二维等离子振荡

在平行于界面的 xy 方向, 电子作自由运动, 库仑作用使电子气关联, 引起平行于界面的纵向集体振荡, 即二维等离子振荡, 其量子激发称为二维等离子激发. 二维等离子激发的色散关系与三维情况不同, 即使在长波段也依赖于波矢 q , 可以近似地表示为

$$\omega_p = \sqrt{N_s e^2 q / 2\epsilon^* \epsilon_0 m^*}, \quad (2)$$

其中 N_s 是二维电子气密度, ϵ^* 是有效介电常数, m^* 是电子有效质量. 为了在红外波段激发二维等离子激发, 通常采用在样品表面制备周期化的金属光栅的办法以定义足够大的波矢 q . 波长为 λ 的红外光正入射到这种周期 $a \ll \lambda$ 的光栅后, 在空间被调制, 可以激发波矢为 $q = 2\pi n/a$ ($n=1, 2, \dots$) 频率为 ω_p 的二维等离子激发^[3], 这一响应过程可以用高频电导

$$\sigma_p = A \frac{N_s e^2 \tau}{m^*} \frac{1}{1 - \omega_p^2 / \omega(\omega - i/\tau)} \quad (3)$$

描述, 其中 A 是光栅频率, 与光栅结构、等离子激发波矢等条件有关, τ 是电子散射时间.

1.2 二维子能带间的跃迁

在垂直于界面的 z 方向, 电子由于被限制在界面附近约 100 \AA 尺度范围内运动, 其能态量子化, 具有子能带结构. 子能带间距与二维电子气浓度及样品的耗尽层电荷浓度有关, 改变栅压可以改变电子气的浓度, 引起子能带结构改变.

研究子能带结构的有效实验方法是测量电子在子带间的共振光吸收, 由于电子在子带

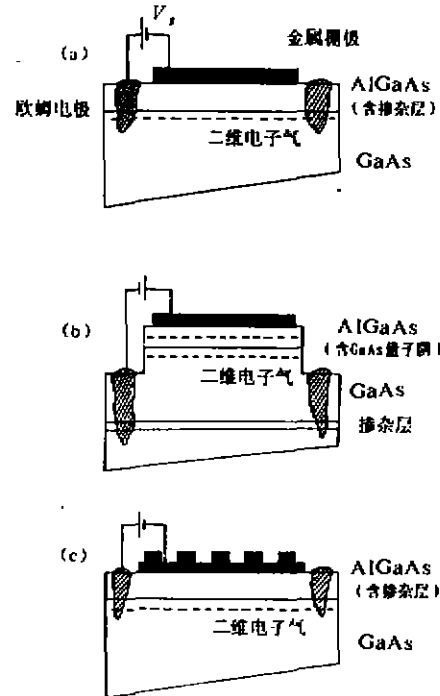


图 1 样品结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of the samples

间的跃迁对应于电子在 z 方向运动状态的改变,对于有抛物能带色散的电子系统,只有沿该方向的光电场才能产生这一激发.在通常的正入射条件下, z 方向的光电场分量也可以通过在样品表面制备周期化的光栅获得^[4].共振频率为 ω_m 的子带间跃迁光响应过程的高频电导可以表示为

$$\sigma_{IS} \propto \frac{|\langle Z_{ij} \rangle|^2}{\omega^2 - \omega_m^2 + i\omega/\tau} \quad (4)$$

其中 $|\langle Z_{ij} \rangle|^2$ 是子能带 $E_i \rightarrow E_j$ 跃迁的矩阵元.

1.3 二维电子气的回旋共振

当外加沿 z 方向的磁场时,电子在 x - y 平面内的运动也是量子化的,其能级为朗道能级.回旋共振是相邻朗道能级间的偶极跃迁,在抛物能带近似下,通过测定其共振频率 $\omega_c = eB/m^*$ 可以精细测定二维电子气在 x - y 平面运动的电子有效质量 m^* ^[5].对于圆偏振的入射光,回旋共振引起的动力学电导可以写为

$$\sigma_{CR}(\omega) = \frac{N_s e^2 \tau}{m^*} \frac{1}{1 + i(\omega \pm \omega_c)\tau} \quad (5)$$

利用式(1)和(5)拟合回旋共振线形是测定二维电子气浓度 N_s 和电子散射时间 τ (或迁移率 μ)的有效方法.

2 栅压比谱实验系统与测量方法

实验系统如图2所示,包括 Bruker IFS113V 快扫描傅里叶变换光谱仪,它配备有 Hg 灯光源和液 He 制冷的 Si 测辐射热计.在磁场下 Hg 灯的远红外光在经过光谱仪内的迈克尔逊干涉仪调制后被引入牛津公司 11/12T 超导磁体,我们在磁体内样品架底部另外安装了一个测辐射热计,其探测信号经导线引出到磁体外的低噪音前置放大器放大后被重新输入傅里叶光谱仪. IFS113V 傅里叶光谱仪具有选择样品通道的功能,本文利用该功能来控制多通道栅压门电源,这样,通过自动切换栅压通道,可以实现在测量过程中交替变换加到样品上的栅压大小^[6].

为了消除光谱仪光源、分束片及窗口等引起的频谱结构,对样品透射谱必须做比谱归一化.最通常的做法是取样品比谱 $T(S)/T(R)$,其中 $T(S)$ 和 $T(R)$ 分别为有样品和撤去样品测得的光谱,这种方法的缺点是换样品不方便,且衬底中的结构可能掩盖二维电子气层的信息.在磁场下通常的做法是取磁场比谱 $T(B)/T(0)$,其中 $T(B)$ 和 $T(0)$ 分别为有磁场及零磁场下的光谱,这种方法不需要换样品,但由于测辐射热计无法安装在远离磁场的位置,磁场对探测器响应率的影响必然会影响归一化比谱.在二维电子气远红外吸收谱的研究中,上述的缺点都可以采用栅压比谱 $T(V_g)/T(V_i)$ 的方法消除,即把在栅压 V_g 下测的光谱对门限栅压 V_i 下的光谱归一化.这是利用了二维电子气浓度随外加栅压可调的场效应特性,门限栅压 V_i 是使二维电子气完全耗尽时的栅压值.

栅压比谱的另一个优点是可以消除实验系统长时间漂移的影响,方法是分别在 V_g 和 V_i 交替扫描 N 次光谱,重复多个周期后将干涉图 $I(V_g)$ 和 $I(V_i)$ 分别在不同的文件内相加后再变换做比谱.这一方法对于需长时间扫描的小信号测量特别重要,图3给出该方法示意图.

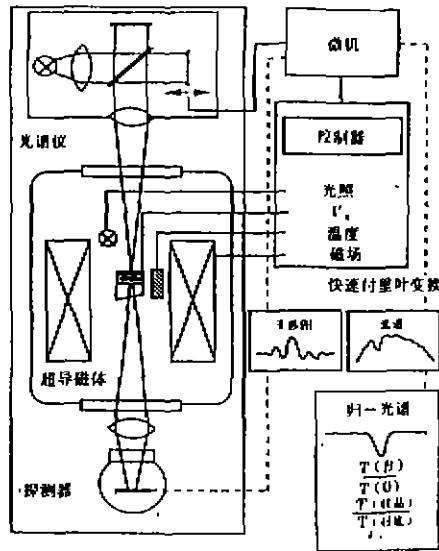


图 2 实验系统框图
Fig. 2 Schematic experiment setup

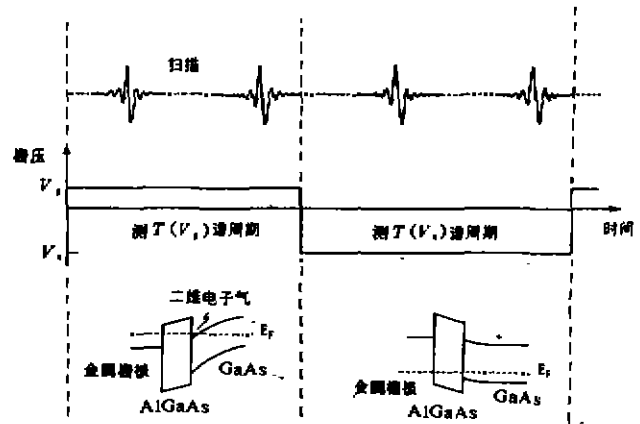


图 3 栅压交替扫描示意图
Fig. 3 Schematic measurement cycles with alternative gate voltages

本实验所用的 3 块样品都是生长在(100)GaAs 衬底上的分子束外延样品,参见图 1. 样品 1#(图 1(a))包括(从下到上)1 μm 的 GaAs 缓冲层,1000 \AA 的 AlGaAs 衬底层,400 \AA 的 AlGaAs 掺杂层($n=1\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$),340 \AA 的 AlGaAs 层,以及 300 \AA 的顶层,样品表面制备有 50 \AA 的 NiCr 半透明栅极,及 4 个 In 欧姆电极. 样品 2#(图 1(b))的主要结构是: 1. 5 μm 的 GaAs 缓冲层,其中含 300 \AA 的掺 Si 层($n=4\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$),其在两层 400 \AA 的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 层之间是 200 \AA 的 GaAs 量子阱.为了避免二维电子气与背掺杂层形成短路,制备 In 欧姆电极的样品区域自表面向下腐蚀去约 0.5 μm . 样品 3#(图 1(c))是与样品 1#相似的前调制掺杂结构,二维电子气浓度约 $5.6\times 10^{11}\text{cm}^{-2}$,样品表面除栅极外还制备有周期 $a\approx 0.5\mu\text{m}$ 的光栅结构.

3 实验结果与讨论

3.1 二维电子气的回旋共振

图 4 给出样品 1#在温度为 4.2K 磁场为 8T 下的二维电子气回旋共振.在图 4(a)中,我们比较了磁场比谱(虚线)和栅压比谱的测量结果,可看出:在磁场比谱中,远离共振区域的光谱线偏离 100%基线约有 5%左右,这一影响主要源自于探测器元在零磁场及 8T 磁场下不同的响应率,以及测量系统的长时间漂移,并非是二维电子气本身响应的反映.在栅压比谱(实线)中,由于磁场不须改变,样品谱和参照谱又采用了自动交替扫描(每周期各 20 次),这一影响即被完全消除.这里,测量参照谱时栅极电压取为 -4.8V,以确保电子气被完全耗尽.对共振线形作洛仑兹拟合可以得到电子有效质量 $m^*\approx 0.067m_0$,二维载流子浓度 $N_s\approx 6.5\times 10^{10}\text{cm}^{-2}$,电子迁移率 $\mu\approx 6\times 10^5\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ [7].

由于改变栅压可以改变载流子浓度,本实验中不须更换样品,即可方便地研究二维电子气性能随载流子浓度的变化.图 4(b)示出了 $T=4.2\text{K}$ 和 $B=8\text{T}$ 时 3 个不同栅压值下二维电子气的回旋共振,随栅压增大,共振线红移,这一现象反映的物理实质是随 N_s 增大,子能带能量增加,进而增加了导带非抛物性对有效质量值的贡献^[7].

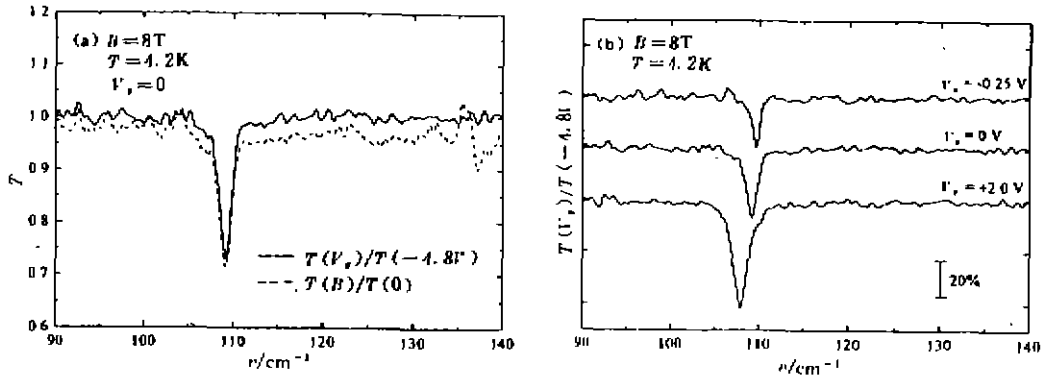


图 4 样品 1# 的回旋共振谱图
Fig. 4 CR spectra of sample 1 #

图 5 示出了 $T=7\text{K}$ 、 $B=12\text{T}$ 时,样品 2# 在不同栅压下二维电子气的回旋共振,与通常调制掺杂样品不同的是,在背掺杂结构样品中,不加栅压,样品中也不存在二维电子气.在加正向偏压后,电子从背掺杂处转移到 AlGaAs/GaAs 界面,首先在这里形成二维电子气,波数为 160cm^{-1} 处的共振峰即起源于这一异质结界面二维电子气的回旋共振响应.进一步增大栅压,越来越多的电子被转移到更近表面层的量子阱中,形成一种双层二维电子气结构.图中可见量子阱中电子回旋共振出现在 158cm^{-1} ,表明阱中电子有效质量大于异质结界面的电子有效质量,这是由于阱中电子子能带较高,电子有效质量受导带非抛物性影响较大所致.双层二维电子气结构具有一系列独特而又有趣的物理性质^[8],本文描述的栅压比谱实验方法在这方面的研究尚大有潜力.

3.2 二维等离子激元的红外吸收

图 6 示出了样品 3# 在无外加磁场和 $T=4.2\text{K}$ 时的栅压比谱,测量栅压取 0V ,参考栅压取 -1.25V .由于样品表面光栅的作用,沿 z 方向正入射的红外光电场在空间受到调制,取 x 方向为光栅平面内垂直于光栅条纹的方向,在离表面距离远小于入射光波长的异质结界面,光辐射电场可以表示为 $\vec{E}=(E_{0x}+E_{qx}, 0, E_{qz})$,其中 E_{0x} 代表无波矢电磁横波电场, E_{qx} 和 E_{qz} 分别代表光栅调制产生的平行于界面波矢 $q_n=2\pi n/a$ ($n=1, 2, 3, \dots$) 的纵波与横波. E_{qx} 能够激发二维等离子激元, E_{qz} 能产生子能带间的集体激发^[9].图 6 中在约 57cm^{-1} 处明显的共振吸收结构,即源于样品表面周期 $a\approx 0.5\mu\text{m}$ 的光栅所激发的波矢 $q=2\pi/a$ 的等离子激元吸收.取 $m^*\approx 0.07m_0$, $N_s\approx 5.6\times 10^{11}\text{cm}^{-2}$ 和 $\epsilon^*\approx 13.6$,根据式(2)容易算得 $\omega_p\approx 60\text{cm}^{-1}$,与实验符合很好.减小栅极电压,使二维载流子浓度降低,也能观察到该共振峰的红移.

3.3 电子子能带间的跃迁

如前所述,光栅产生的沿 z 方向的入射光电场分量 E_{qz} 能产生子能带间的跃迁,从而提

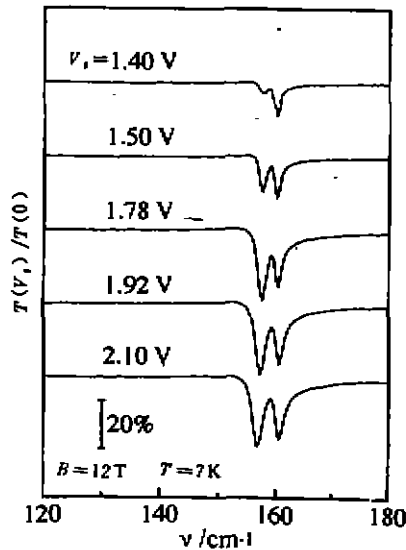


图5 样品2#的回旋共振谱图
(本工作与德国 Würzburg 大学合作完成)
Fig. 5 CR spectra of sample 2# (the measurement was performed in cooperation with the Würzburg University in Germany)

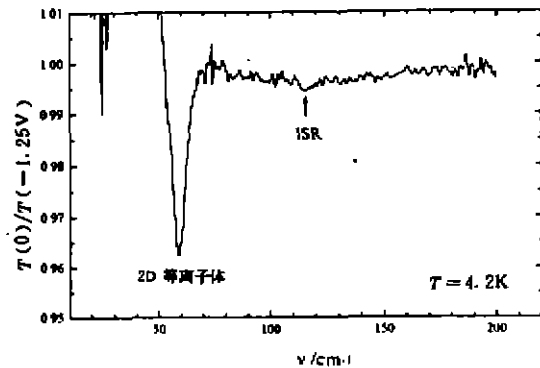


图6 样品3#在零磁场下的栅压比谱
Fig. 6 Gate-voltage ratio spectrum of sample 3# at zero magnetic field

供了一种研究界面势场情况及准二维电子气能带的有效实验手段. 图6中位于 120cm^{-1} 附近微弱的吸收结构即起源于这一共振吸收过程, 这一结构较宽, 部分原因可能是因为二维电子气浓度分布不均匀所致, 减小栅压使电子气逐渐被耗尽, 这一结构也逐渐消失. 严格地说, 光谱中观察到的是二维电子气子能带间的一种集体跃迁过程, 共振能量与子能带间的能量差并不完全一致, 需要计入所谓的退极化位移和类激子效应的修正^[1]. 对于存在有限波矢 q 的非垂直跃迁情况, 还要考虑子带间集体跃迁与二维等离子激元耦合等效应引起的修正^[1], 因此, 理论与实验的定量比较尚需要更细致具体的理论工作.

4 结语

本文讨论了远红外栅压比谱的方法在研究异质结与量子阱结构中二维电子系统动力学性质中的作用, 该方法利用傅里叶变换光谱仪快速扫描和自动选择样品通道的优点, 结合制备有栅极的异质结材料的场效应特点, 通过光谱仪控制栅压门电源在不同栅压下交替扫描取谱, 方便地获得了准二维电子气的栅压比谱. 观察到异质结界面及量子阱中准二维电子气的回旋共振、二维等离子激元以及二维电子气子能带间的集体跃迁. 实验表明, 远红外栅压比谱的方法, 不需更换样品或改变磁场即可获得比谱, 从而能有效地消除实验系统长时间漂移以及探测器受磁场干扰的影响, 十分适用于研究二维空间电荷层中一些元激发微弱的光谱响应及其对二维载流子浓度的依赖情况.

致谢 作者感谢德国 Würzburg 大学 E. Batke 教授的合作支持以及中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室郭少令高级工程师在实验中给予的帮助.

参考文献

- 1 Ando T, Fowler A B, Stern F. *Rev. Mod. Phys.*, 1982, **54**:437
- 2 Born M, Wolf E. *in Principle of Optics*, New York: Pergamon Press, 1975
- 3 Batke E, Heitmann D, Kotthaus J P. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **54**:2367
- 4 Pillath J, Batke E, Weimann G, et al. *Phys. Rev.*, 1989, **B40**:5879
- 5 Hu C M, Batke E, Kohler K. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**:1904
- 6 Batke E, Heitmann D. *Infrared Phys.* 1984, **24**:189
- 7 陈张海, 胡灿明, 刘普霖, 等. *红外与毫米波学报* 1997, **16**(2):107
- 8 Manoharan H C, Suen Y W, Santos M B, et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, to be published
- 9 Batke E, Weimann G, Schlapp W. *Phys. Rev.*, 1989, **B39**:11171

FAR-INFRARED GATE VOLTAGE RATIO SPECTRA OF QUASI TWO-DIMENSIONAL ELECTRON SYSTEMS*

Hu Canming Chen Zhanghai Shi Guolian Lu Wei Zhang Bo
Shi Xiaohong Liu Pulin Shen Xuechu

(Shanghai Institute of Technical Physics, National Laboratory for
Infrared Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract Rapid-scan Fourier transform spectroscopy was used to study the high frequency dynamic properties of the two-dimensional electron gases (2DEG) confined at the interface of heterojunctions or in a quantum well. By using a multi-channel voltage supply unit controlled by the spectrometer and accumulating alternately a certain number of scans at two different gate voltages, gate voltage ratio spectra were obtained on samples prepared with metallic front gates. Several fundamental infrared excitations, namely, cyclotron resonance, 2D plasmon and the collective intersubband resonance were observed in these low-dimensional systems.

Key words two-dimensional electron gas; infrared excitation; Fourier transform spectroscopy.

* The project supported by the fund for outstanding returned students of Chinese Academy of Sciences