

GaAs-Al_xGa_{1-x}As 异质结的热电子 磁声子共振测量*

程文超 李月霞 梁基本

(半导体超晶格国家重点实验室,中国科学院半导体研究所,北京)

1989年11月1日收到

在4.2K, 我们测量了GaAs-Al_xGa_{1-x}As异质结的二维热电子的磁声子共振。高电场下, SdH振荡消失以后, 在二维系统中, 除清楚地观察到LO声子振荡外, 还观察到X点双TA声子振荡。

主题词 磁声子共振, 二维系统, 热电子, GaAs-Al_xGa_{1-x}As 异质结

一、引言

在光学声子散射占主要优势的温区内, 如液N₂温度附近或更高, 由于非简并半导体样品的LO声子共振吸收, 人们可以在磁阻测量中, 观察到一系列振荡峰值, 这是发生在欧姆区的磁声子振荡, 也称为常规磁声子振荡。各种半导体材料的磁声子特性, 在理论上和实验上均被广泛的研究^[1]。

在二维系统中, Tsui等人^[2]首先观察到GaAs-Al_xGa_{1-x}As异质结和超晶格的磁声子共振现象。尔后, GaInAs-InP异质结^[3], GaInAs-AlInAs异质结^[4]和Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}-InP量子阱^[5]等的高温磁声子共振吸收现象均被观察和研究。高温时, 人们只能了解电子和LO声子的相互作用。为了研究电子发射声子过程以及和其他声子模的相互作用, Stradling和Wood低温下测量了GaAs体材料中热电子的LO声子发射过程, 并发现了低温下伴随有杂质原子1s和2s态的捕获电子过程^[6]; 在InSb中观察到X点双TA声子的振荡峰, 并给出了GaAs材料中X点双TA声子的振荡峰值位置^[7]。

在GaAs-Al_xGa_{1-x}As异质结的SdH振荡测量中, 增加电场, 升高电子温度, 可以减弱SdH振荡和增强磁声子振荡。在温电子情况下, 可以同时观测到这两种振荡周期^[8,9]。但是, 由于LO声子振荡信号很微弱和两种信号的混杂, 降低了数据的可靠性。

本文报告了高电场下GaAs-Al_xGa_{1-x}As异质结磁声子发射过程的测量。在热电子情况下, 进行磁阻测量, SdH振荡完全消失。相反, 磁声子振荡比温电子情况变得明显。因此在磁阻曲线上可以清楚地观察到电子-声子相互作用产生的磁声子共振。下面将详细

* 国家自然科学基金资助项目。

讨论测量和实验结果。

二、样品制备和测量

实验中的样品是使用 MBE 技术制造的。为了进行比较，我们制备了两种不同参数的样品，样品号分别是 BG043 和 BG061。首先在不掺杂的 GaAs 衬底上生长 $1\mu\text{m}$ 厚的外延层，然后生长厚度分别是 100\AA 和 300\AA ，不掺杂的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 隔离层，最后生长掺杂浓度 $N_D \simeq 10^{18}\text{cm}^{-3}$ ，厚度 600\AA 的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层。两个样品的 X 值也不同，分别是 0.4 和 0.3。从 SdH 振荡周期和零磁场电阻率，测得了载流子浓度和电子迁移率。BG061 的 $N_s = 3 \times 10^{11}\text{cm}^{-2}$ 和 $\mu = 1.2 \times 10^5\text{cm}^2/\text{V.s}$ 。样品 BG043 的 $N_s = 4 \times 10^{11}\text{cm}^{-2}$ 和 $\mu = 2 \times 10^4\text{cm}^2/\text{V.s}$ 。

使用常规的光刻工艺技术，样品制成长 $1600\mu\text{m}$ ，宽 $230\mu\text{m}$ 的导电沟道。电极是用 In 球烧结而成，在 N_2 气氛中 410°C 下，烧结 5 分钟制成良好的欧姆接触。

测量中为了只加热电子，而避免晶格加热，我们使用了宽度为 500ns ，周期大于 $500\mu\text{s}$ 和幅度可以任意调节的窄恒压脉冲。测量信号是由 Boxcar 平均器收集。详细的测量电路请看参考文献[10]。

三、实验结果和讨论

在垂直表面的磁场中，当一个平行于表面的电场加在样品两端时，导电沟道中的电子将连续地增加能量和电子将占据较高的 Landau 能级，高速运动的电子将和晶格发生碰撞，并发射声子，把能量传递给晶格和回落到低 Landau 能级，达到热平衡。

磁场扫描时，Landau 能级的能量将增加，当它的能量与 LO 声子能量相等时，发生磁声子共振。电子能量的损失，导致电导率改变，磁阻曲线上将出现极大值或极小值，其共振条件应满足：

$$\hbar\omega_{\text{LO}} = N\hbar\omega_c = N\hbar eB/m^*, \quad (1)$$

式中 ω_c 是迴旋频率， ω_{LO} 是 LO 声子频率， B 为磁场强度， m^* 是有效质量和 $N = 1, 2, 3 \dots$

作为一个例子，图 1 表示了样品 BG043 电导随磁场变化结果。虽然样品 BG061 与它的参数不同，基本上与它有相同的结果。我们的实验是由低电场开始，逐渐升高，图中表示了电场为 12.5V/cm 时的 SdH 振荡。在曲线上虽然也可以看到一些其他小的峰值，但很难正确确定声子的振荡峰值系列。当电场加到 62.5V/cm 时，基本上观察不到 SdH 振荡。电场继续增强，又有一些新的峰值明显显现出来，图中表示的是电场为 187.5V/cm 的情况。这些新的峰值正是由于电子-声子相互作用，产生磁声子共振的结果。对 GaAs 而言，Landau 能级量子数 $N = 1$ 的能级产生 LO 磁声子共振所需要的磁场大约是 $22 - 22.5\text{T}$ 。我们制作了 Landau 能级量子数与磁场强度倒数曲线（图 2），发现有两个共振系列。系列之一是：对于峰值的磁场位置是 $4.5, 3.7, 3.2, 2.8, 2.5, 2.2 \dots \text{T}$ 。它们分别相当于 $N = 5, 6, 7, 8, 9, 10 \dots$ 的 LO 磁声子共振。由此可以推出 $N = 1$ 时，共振磁场

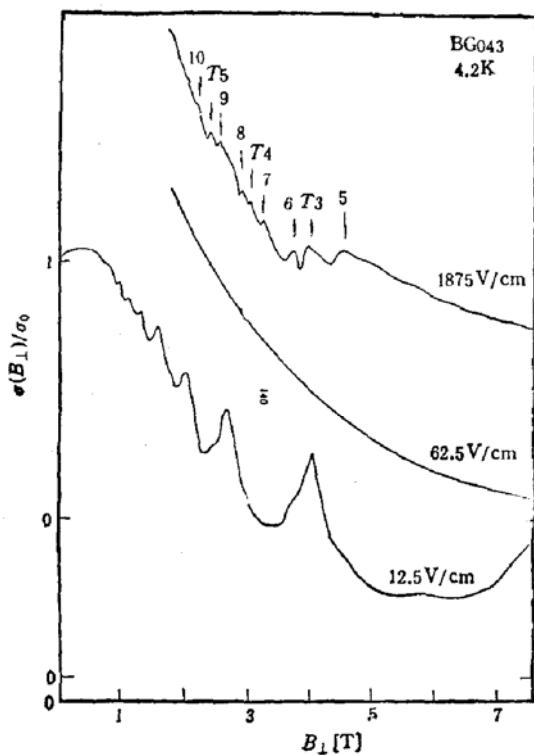


图1 不同电场下,电导随磁场变化结果和
磁声子共振位置

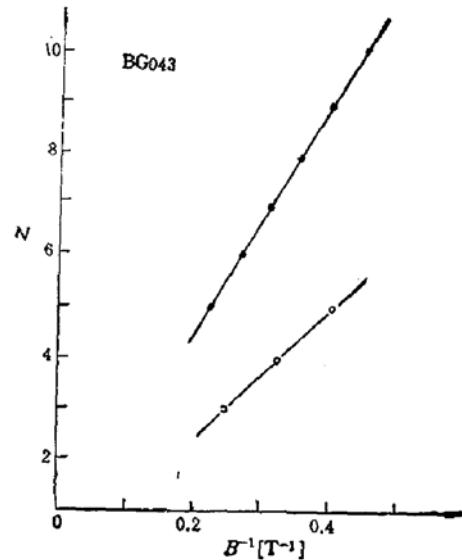


图2 Landau 能级量子数与磁场倒数关系。
圆表示 LO 声子振荡系列,圆圈表示 TA 声
子振荡系列

位置为 22.1 T, 求得电子的有效质量 m^* 为 $0.070 m_0$, 这与高温测量结果是一致的, 这个值稍大于导带边的电子有效质量 $0.066 m_0$, 其原因之一是共振时电子能量高于带边几十毫电子伏。关于有效质量的修正, 其他文章已有讨论^[11]。随着磁场的增加, 样品的电阻率变大, 电流密度下降, 导致电子温度下降, 振荡减弱和变得不明显, 这是我们没有清楚看到 $N = 4$ 峰值的原因, 也是这个测量技术的一个缺点。

在 GaAs-Al_xGa_{1-x}As 异质结中, 由于 GaAs 层中不掺杂, 虽然是在低温条件下测量, 并没有发现体材料中的浅杂质原子捕获载流子过程。这是异质结样品与体材料, 低温条件下测量的区别。

这里我们将讨论共振时在电导曲线上是极大值还是极小值的问题。人们知道样品的电阻与电导率 σ_{xx} 成反比, 二维情况下可以写成:

$$R(B) = \frac{L}{W} (\rho_{xx} + \sigma_{xy}^2 / \rho_{xx}) \quad (2)$$

在低磁场 $R(B)$ 与 ρ_{xx} 成正比, 在高磁场, 与 $1/\rho_{xx}$ 成比例, 当 $\rho_{xy} \geq \rho_{xx}$ 时, 发生振荡峰值反转。按照参考文献[12], 上面的条件可以近似的化简成 $\omega_c\tau \geq 1$, 对高迁移率样品而言, 反转时磁场很低, 一般可以不考虑它。对低迁移率样品, 能够利用上述条件估计反转时的磁场位置。在热电子情况下, 随着电场的增加, 电子迁移率迅速下降^[13]。尤其是在二维系统中发生载流子空间转移时, 迁移率下降的更多。当电场为 187.5 V/cm 时, 样品 BG043 的电子迁移率已降到很低, 用上面条件估价, 峰值反转位置已超过 10 T。因共振时电子能量的降低将导致迁移率的上升^[14], 电导曲线上将出现极大值。参考文献[12]中

还讨论了样品尺寸对反转极值的影响,因我们的样品长宽比较大,高磁场时,峰值变得已不明显,这里我们不再进行讨论。

曲线上我们还发现了另外一个系列的极值,它们的磁场位置分别是4.0,3.0和2.4,磁场倒数和Landau能级量子数之间满足线性关系,得到N=1的磁场位置是12T,这和GaAs体材料测得的值(11.9T)几乎完全一致^m。它们分别相当于N=3、4、5的X点双TA声子发射引起的振荡,其条件满足:

$$2\hbar\omega_{TA}(x) = N\hbar\omega_c \quad (3)$$

这是在二维系统中4.2K下首次观察到这个现象。

磁声子共振时,电阻的改变很小,在大多数实验中均观测其二阶微分。在高电场时,因电子温度较高,声子粒子数大大增加,振荡幅度改变稍大,加之样品电流变小,所以,可以直接观察到它的变化。但是,当样品电阻较低,电流较大时,也不易直接观测到它的变化。因此我们应当选择低载流子浓度和低迁移率的样品。对高迁移率样品,只有在很强的电场下,迁移率大幅度下降后,才能直接观察到磁声子共振现象。

四、结 论

下面简单地归纳一下GaAs-Al_xGa_{1-x}As异质结二维热电子磁声子共振测量结果。在低温,增加电场,升高电子温度,SdH振荡消失以后,可以在电导曲线上直接观测发射声子产生的振荡峰值。除了观察到LO声子共振系列外,还观察到X点双TA声子发射过程。在异质结样品中,没有发现杂质态俘获电子过程。

作者感谢郑厚植教授,周海平、杨富华和刘剑等同志对本工作给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] R. J. Nicholas, *Quantum Electron.*, **10**, 1(1985).
- [2] D. C. Tsui, T. H. Englert, A. Y. Cho and A. C. Gossard, *Phys. Rev. Lett.*, **44**, 341(1980).
- [3] R. J. Nicholas, M. A. Brummell, J. C. Portal, M. Razeghi and M. A. Poisson, *Solid State Comm.*, **43**, 825(1982).
- [4] M. A. Brummell, R. J. Nicholas, J. C. Portal, K. Y. Cheng, and A. Y. Cho, *J. Phys.*, **C16**, C579 (1983).
- [5] J. C. Portal, R. J. Nicholas, M. A. Brummell, L. C. Brunel, S. Huant, M. Razeghi and M. Laviron, *Semicond. Sci. Technol.*, **1**, 3(1986).
- [6] R. A. Stradling and R. A. Wood, *Solid State Comm.*, **6**, 701(1968).
- [7] R. A. Stradling and R. A. Wood, *J. Phys.*, **C3**, 2425(1970).
- [8] M. Inoue, H. Hida, M. Inayama, Y. Inuishi, K. Nanbu and S. Hiyamizu, *Physica*, **117B and 118B**, 720 (1983).
- [9] H. Sakaki, K. Hirakana, J. Yoshino, S. P. Svensson, Y. Sekiguchi, T. Hotta, S. Nishii and N. Miura, *Surf. Sci.*, **142**, 306(1984).
- [10] 程文超, A. Zrenner, 叶秋怡, F. Koch, *半导体学报*, **10**(12)885(1989)
- [11] M. A. Brummell, R. J. Nicholas, M. A. Hopking, J. J. Harris and C. T. Foxon, *Phys. Rev. Lett.*, **58**, 77 (1987).
- [12] T. P. C. Judd, M. Pepper and G. Hill, *Appl. Phys. Lett.*, **53**(1), 54(1988).
- [13] Jagdeep Shah, A. Pinczuk, H. L. Störmer, A. C. Gossard and W. Wiegmann, *Appl. Phys. Lett.*, **42**(1), 55(1983),

- [14] D. R. Leadley, M. A. Brummell, R. J. Nicholas, J. J. Harris and C. T. Foxon, *Solid State Electron.*, 31, 781(1988).

Measurements of Hot Electron Magnetophonon Resonance in GaAs/Al_xGa_{1-x}As Heterostructures

Cheng Wenchao, Li Yuexia and Liang Jiben

(National Laboratory for superlattices and Microstructures and
Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing)

Abstract

The magnetophonon resonance of 2D hot electrons in GaAs/Al_xGa_{1-x}As heterostructures is measured under high electric fields at 4.2 K. Besides LO phonon oscillation, double TA phonon oscillation has clearly been observed at X point, after SdH oscillation disappeared.

Key words Magnetophonon resonance, Two-dimensional system, Hot electron, GaAs-Al_xGa_{1-x}As heterostructure