

Si 调制掺杂 AlGa_N/Ga_N 异质结磁阻拍频现象^{*}

姚 炜¹⁾ 仇志军¹⁾ 桂永胜¹⁾ 郑泽伟²⁾ 吕 捷²⁾ 唐 宁²⁾ 沈 波²⁾ 褚君浩¹⁾

¹⁾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,上海 200083)

²⁾南京大学物理系,南京 210093)

(2004 年 7 月 12 日收到,2004 年 8 月 23 日收到修改稿)

在低温(1.5K—25K)和强磁场(0—10T)条件下,对二维电子气占据两个子带的 Si 调制掺杂 AlGa_N/Ga_N 异质结构进行磁输运测量.在一定温度范围内观察到磁阻拍频现象.根据 Sander 等人和 Raikh 等人给出的磁阻振荡的具体表达式,拟合实验结果表明磁阻拍频是由第一子带 SdH 振荡和磁致子带间散射引起的磁阻振荡导致的.

关键词:AlGa_N/Ga_N 异质结构, SdH 振荡, 磁致子带间散射, 磁阻拍频

PACC: 7200, 7215G, 7280E

1. 引 言

由于 III-V 族氮化物半导体具有宽的直接带隙(1.9—6.2eV),优异的物理、化学稳定性,高的饱和电子漂移速度,高击穿场强和高热导率等优越性能.近年来随着微电子技术的发展,III-V 族氮化物半导体以 Ga_N 为代表的第三代半导体材料在短波长光电器件以及高频、高温和高功率电子器件上得到迅猛发展.

在半导体异质结中,如果二维电子气占据两个或两个以上子带时,子带间散射会明显影响电子的迁移率. AlGa_N/Ga_N 与 AlGaAs/GaAs 相比,异质结界面导带具有大的能带偏移和极强的压电极化效应,可具有更高的二维电子气浓度,更易观察到多子带占据的现象.在磁场中,如果 AlGa_N/Ga_N 异质结界面中电子占据两个子带,那么每个子带都会分裂成一系列的朗道能级.由于 Ga_N 是宽禁带材料,不存在能带的非抛物性影响,第一子带和第二子带的有效质量相等.则在某些磁场下会导致两套朗道能级对齐,由于子带间散射只牵涉到电子动量转移而不发生能量变化,因此当两套朗道能级对齐时,子带间散射就会得到增强,于是产生了一组新的磁阻振荡,不同于 SdH 振荡,它对温度变化不敏感,也不依赖于费米能级.可以看出当能级的非抛物性比较强时就

不存在这种振荡,这是因为两套朗道能级不可能再一一对齐,实验上也证实了在窄禁带半导体中不存在子带间散射引起的磁阻振荡^[1].

Qiu 等人^[2]研究无 Si 调制掺杂层的 AlGa_N/Ga_N 异质结构二维电子气子带间散射对磁阻振荡的影响,在一定温度范围内观察到由第一子带 SdH 振荡和磁致子带间散射引起的磁阻振荡导致的磁阻拍频现象.本文通过在低温和强磁场下的磁输运测量,用相同的方法研究了 Si 调制掺杂 AlGa_N/Ga_N 异质结构二维电子气子带间散射对磁阻振荡的影响.同样在一定温度范围内观察到由第一子带 SdH 振荡和磁致子带间散射引起的磁阻振荡导致的磁阻拍频现象.两者符合相同的理论模型——弹性子带间散射模型.

2. 理论模型

Leadley 等人^[3]是最早通过磁阻振荡来研究 GaAs/AlGaAs 异质结中的磁致子带间散射,他们发现第一子带 SdH 振荡会受到磁致子带间散射引起的磁阻振荡的调制,并且调制幅度随温度升高而增强,他们把这种现象归因于声学声子辅助带间散射.但是,后来他们^[4]发现在实验温度范围内样品的零磁场电阻率不受声子散射的影响.随后 Coleridge^[5]也观察到类似的实验现象,提出一个完全不同的弹性

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目(批准号:001CB309506-2)资助的课题.

[†] E-mail: juchu@mail.sitp.ac.cn

子带间散射模型, Sander 等人^[6]和 Raikh 等人^[7]在这个模型基础上给出了磁阻振荡的具体表达式

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\rho_{xx}}{\rho_0} = & 2A_1 \frac{X}{\sinh X} \exp\left(-\frac{\pi}{\omega_c \tau_1}\right) \\ & \times \cos\left[\frac{2\pi(E_F - E_1)}{\hbar\omega_c} + \pi\right] \\ & + 2A_2 \frac{X}{\sinh X} \exp\left(-\frac{\pi}{\omega_c \tau_2}\right) \\ & \times \cos\left[\frac{2\pi(E_F - E_2)}{\hbar\omega_c} + \pi\right] \\ & + 2B_{12} \frac{2X}{\sinh 2X} \exp\left[-\frac{\pi}{\omega_c}\left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}\right)\right] \\ & \times \cos\left[\frac{2\pi(2E_F - E_1 - E_2)}{\hbar\omega_c}\right] \\ & + 2B_{12} \exp\left[-\frac{\pi}{\omega_c}\left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}\right)\right] \\ & \times \cos\left[\frac{2\pi(E_2 - E_1)}{\hbar\omega_c}\right], \quad (1) \end{aligned}$$

其中 $X = \frac{2\pi^2 k_B T}{\hbar\omega_c}$, $E_1(\tau_1)$ 和 $E_2(\tau_2)$ 分别是第一和第二子带的能级位置和量子散射时间, E_F 是费米能量, A_1 , A_2 和 B_{12} 是系数, 与子带内和子带间的散射概率 P_{ij} ($i, j = 1, 2$) 有关^[5]. 方程 (1) 右边第一、二项分别对应于第一、二子带的 SdH 振荡, 第三项和第四项来源于磁致子带间散射引起的磁阻振荡, 与第四项相比较, 第三项要弱得多, 通常可以忽略. 从方程中可以看出 SdH 振荡和磁致子带间散射引起的磁阻振荡都是阻尼项乘以余弦函数. 由 SdH 振荡和磁致子带间散射引起的磁阻振荡的余弦函数部分看出两者相位相差 $\Delta\phi = \pi$. SdH 振荡阻尼项与温度和磁场有关, 温度阻尼项为 $\frac{X}{\sinh X}$, 磁场阻尼项为 $\exp\left(-\frac{\pi}{\omega_c \tau_1}\right)$. 而磁致子带间散射引起的磁阻振荡阻尼项只与磁场有关与温度无关为 $\exp\left[-\frac{\pi}{\omega_c}\left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}\right)\right]$.

3. 样品结构和实验

本实验所用的 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 样品是采用金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 的方法生长的, 样品结构见图 1. 首先在 (0001) 蓝宝石衬底上生长一层 GaN 缓冲层, 生长温度为 488°C , 接着在温度为 1071°C 下生长一层非故意掺杂 GaN 层 (i-GaN), 然后

在样品上生长一层非故意掺杂的 AlGa_{0.22}N 隔离层和 Si 掺杂 AlGa_{0.22}N (n-AlGa_{0.22}N) 层, 生长温度为 1080°C , Si 掺杂浓度为 $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. 通过红外光照, 使样品中二维电子气占据两个子带, 其能带示意图见图 2. 样品采用硅铝丝形成良好的欧姆接触, 使用范德堡法进行磁输运测量, 最大磁场为 10T, 温度范围为 1.5K 到 25K. 样品中电子浓度 $n = 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 和迁移率 $\mu = 850 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, 在整个温度范围内没有明显变化.

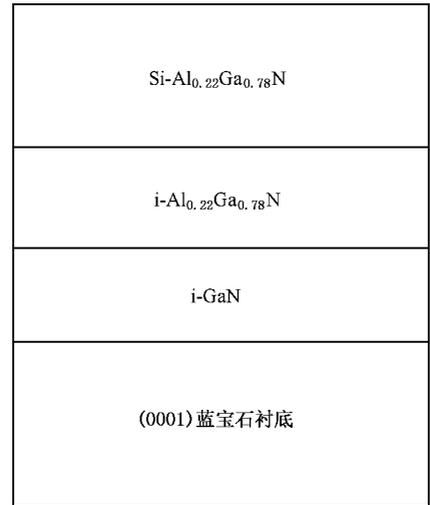


图 1 Si 调制掺杂 AlGa_{0.22}N/GaN 异质结样品结构示意图

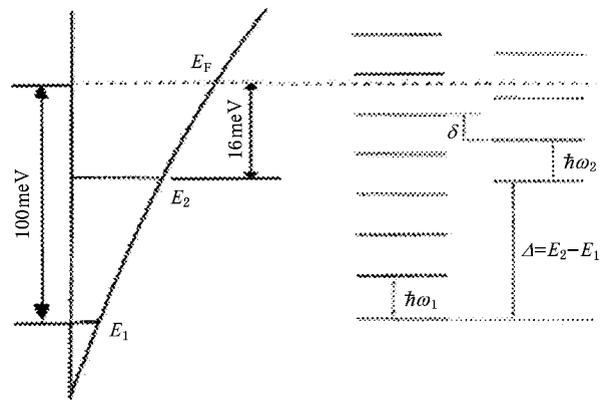


图 2 样品的能带示意图. 当 $\omega_c \approx \omega'_c$, $\delta \approx 0$ 两套朗道能级近似一一对齐, 导致磁阻的磁致子带间散射

4. 实验结果和讨论

滤除第二子带 SdH 振荡和磁致子带间散射会引起的磁阻振荡, 获得第一子带 SdH 振荡. 利用 SdH 振荡振幅温度的变化^[8] 得到第一子带电子有效质量 $m^* = 0.22m_0$. 对于带边有很好的抛物性的材料, 第

二子带电子与第一子带电子有相同的有效质量.

对磁阻进行 FFT 变换, 得到第一第二子带载流子浓度 $n_1 = 9.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $n_2 = 1.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ (如图 3 (由于样品中存在强烈的平行导电, 则 $n_1 + n_2 > n$). 由 $E_F - E_j = \frac{\pi \hbar^2 n_j}{m^*}$ 得 $E_F - E_1 = 100 \text{ meV}$, $E_F - E_2 = 16 \text{ meV}$ (见图 2)).

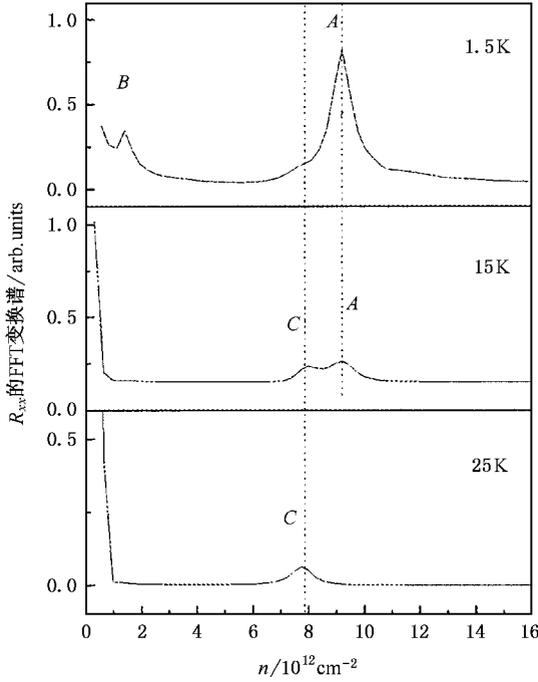


图 3 样品在 1.5K, 15K, 25K 温度的磁阻 FFT 变换谱, A 峰对应第一子带, B 峰对应第二子带, C 峰对应磁致子带间散射

图 4 比较了不同温度下样品的磁阻振荡实验值 (已扣除本底) 及利用 (1) 式得到的数值拟合曲线. 拟合结果给出 $A_1 = 1.5$, $A_2 = 0.23$, $B_{12} = 0.78$. 同时还可得到样品在不同温度下的量子散射时间拟合值, 如图 5 所示, 1.5K 时两个子带的量子散射时间拟合值分别为 0.130ps 和 0.140ps, 然后随温度升高衰减到 25K 时的 0.106ps 和 0.116ps, 这些数据与之前报道的实验结果相符合^[2,9-11].

图 4 中的实验和理论结果清楚表明了, 在 1.5K 时, 磁阻振荡主要来源于频率为 $f_1 = \frac{(E_F - E_1)m^*}{\hbar e}$ 的第一子带 SdH 振荡, 并受到频率为 $f_2 = \frac{(E_F - E_2)m^*}{\hbar e}$ 的第二子带弱 SdH 振荡调制. 随着温度升高到 15K, 与温度有关的第一子带 SdH 振荡幅度与磁致子带间散射引起的磁阻振荡幅度满足

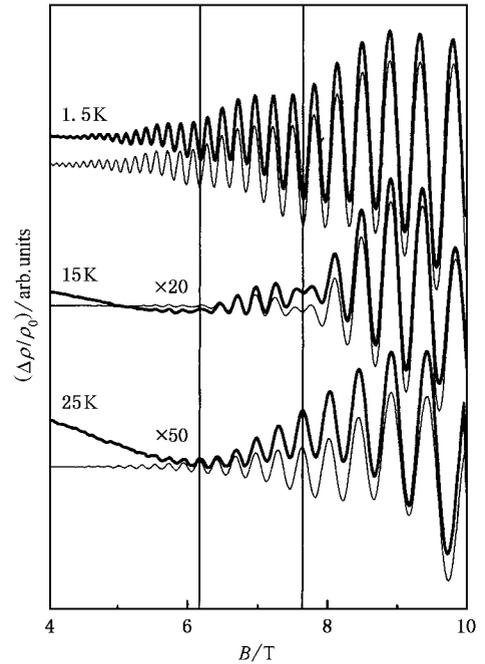


图 4 比较不同温度下样品的磁阻振荡实验值 (粗线) 和数值拟合曲线 (细线) (图中的垂直线表示拍频节点的位置)

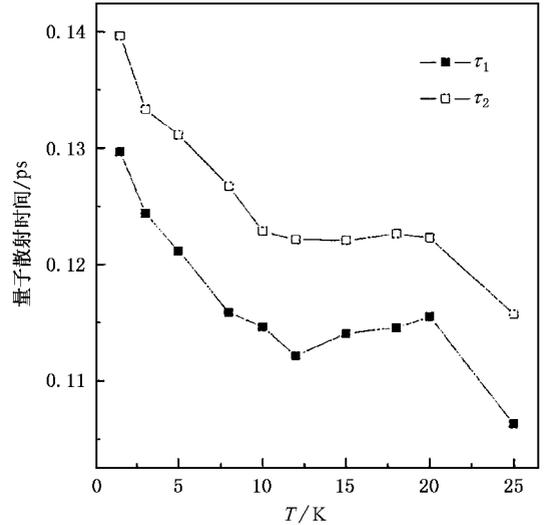


图 5 样品 B 中两个子带量子散射时间随温度的变化

$$A_1 \frac{X}{\sinh X} \exp\left(-\frac{\pi}{\omega_c \tau_1}\right) \approx B_{12} \exp\left[-\frac{\pi}{\omega_c} \left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}\right)\right]. \quad (2)$$

此时, 磁阻振荡主要是第一子带 SdH 振荡和磁致子带间散射引起的磁阻振荡的叠加, 由于第一子带 SdH 振荡与磁致子带间散射引起的磁阻振荡具有相近的振荡频率 f_1 和 $f_1 - f_2$ (因为 $f_2 \ll f_1$), 同时幅度相等, 所以导致磁阻出现强烈的拍频现象 (见

图 5). 当温度升到 25K 时, 由于温度的影响导致 SdH 振荡消失, 因此磁致子带间散射引起的磁阻振荡为主要的磁阻振荡机理. 从图中可以看出在某些特定的磁场处(垂线), 磁阻相位变化了 π (从 1.5K 到 25K) 对应于频率从 f_1 到 $f_1 - f_2$.

对磁阻进行 FFT 变换是分析磁阻振荡的常用手段, 能够揭示其中复杂的振荡行为, 并确定相应的频率范围. 图 3 给出了 1.5K, 15K, 25K 温度下的磁阻 FFT 变换谱. 已知在整个温度范围内二维电子气浓度为常数 ($\sim 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$), 然而在 25K 时, 只观

察到一个单峰 $7.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ (标记为 C). 很明显, 它不是由子带电子引起的 SdH 振荡, 而是来自于方程(1)所描述的磁致子带间散射引起的磁阻振荡. 在 1.5K 温度下, 出现的两个峰(A 和 B), 则是分别对应于第一和第二子带电子的 SdH 振荡. A 峰的幅度从 1.5K 到 20K 明显衰减了两个数量级, 然而对于 C 峰, 温度的影响比较弱. 总之, 从以上分析可知, 在低温下磁阻振荡以 SdH 振荡为主, 高温下则是磁致子带间散射引起的磁阻振荡, 而在此之间则形成磁阻拍频振荡现象.

-
- [1] Zhang X C, Pfeuffer-Jeschke A, Ortner K, Becker C R and Landwehr G 2002 *Phys. Rev. B* **65** 045324
- [2] Qiu Z J, Gui Y S, Zheng Z W, Tang N, Lu J, Shen B, Dai N and Chu J H 2004 *Solid State Commu.* **129** 187
- [3] Leadley D R, Nicholas R J, Harris J J and Foxon C T 1989 *Semicond. Sci. Technol.* **4** 885
- [4] Leadley D R, Fletcher R, Nicholas R J, Tao F, Foxon C T and Harris J J 1992 *Phys. Rev. B* **46** 12439
- [5] Coleridge P T 1990 *Semicond. Sci. Technol.* **5** 961
- [6] Sander T H, Holmes S N, Harris J J, Maude D K and Portal J C 1998 *Phys. Rev. B* **58** 13856
- [7] Raikh M E and Shahbazyan T V 1994 *Phys. Rev. B* **49** 5531
- [8] Elhamri S, Newrock R S and Mast D B 1998 *Phys. Rev. B* **57** 1374
- [9] Zheng Z W, Shen B, Zhang R, Gui Y S, Jiang C P, Ma Z X, Zheng G Z, Guo S L, Shi Y, Han P, Zheng Y D, Someya T and Arakawa Y 2000 *Phys. Rev. B* **62** R7739
- [10] Jiang C P, Guo S L, Huang Z M, Yu J, Gui Y S, Zheng G Z, Chu J H, Zheng Z W, Shen B and Zheng Y D 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 374
- [11] Zheng Z W, Shen B, Jiang C P, Gui Y S, Someya T, Zhang R, Shi Y, Zheng Y D, Guo S L and Arakawa Y 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 1651

Beating patterns in the oscillatory magnetoresistance of a Si modulation-doped AlGa_{0.22}Ga_{0.78}N/GaN heterostructure^{*}

Yao Wei¹⁾ Qiu Zhi-Jun¹⁾ Gui Yong-Sheng¹⁾ Zheng Ze-Wei²⁾ Lü Jie²⁾ Tang Ning²⁾ Shen Bo²⁾ Chu Jun-Hao^{1)†}

¹⁾(National Laboratory for Infrared Physics , Shanghai Institute of Technical Physics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 200083 , China)

²⁾(National Laboratory of Solid State Microstructures and Department of Physics , Nanjing University , Nanjing 210093 , China)

(Received 12 July 2004 ; revised manuscript received 23 August 2004)

Abstract

Magneto-transport measurements have been carried out on a Si modulation-doped Al_{0.22}Ga_{0.78}N/GaN heterostructure in a temperature range between 1.5 and 25 K under magnetic field up to 10T. Striking beating patterns in magnetoresistance vs magnetic field are observed in the vicinity of a specific temperature. Theoretical simulation is performed and the comparison between numerical simulations and the experimental data reveals that the beating patterns are due to the interference of the magneto-intersubband scattering and the SdH oscillator of first subband.

Keywords : AlGa_{0.22}Ga_{0.78}N/GaN heterostructure , SdH oscillator , magneto-intersubband scattering , beating patterns

PACC : 7200 , 7215G , 7280E

^{*} Project supported by the State key Development Program for Basic Research of China (Grant No.001CB309506-2).

[†]E-mail : juchu@mail.sitp.ac.cn