

Si δ 掺杂 GaAs 多量子阱的磁量子输运

韦亚一 郑国珍 郭少令 汤定元

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

彭正夫 张允强

(南京电子器件研究所, 江苏, 南京, 210016)

摘要 使用 MBE 技术低温生长了含有 3 个 Si δ 掺杂层的 GaAs 外延片, 形成三量子阱结构. 在 4.2~300 K 温区 0.1 T 的电磁铁上测量了样品载流子浓度和迁移率随温度的变化. 在 0.3~4.2 K (^3He 温区) 和 0~7 T 强磁场下测量了样品的横向磁阻、纵向磁阻和霍尔电阻. 观察到了横向磁阻的 SdH 振荡和纵向磁阻的抗磁 SdH 振荡. 根据实验结果着重讨论了纵向磁阻振荡的起源以及霍尔振荡的含义, 简单分析了 δ 掺杂二维电子气中磁致金属-绝缘体转变的实验条件.

关键词 δ 掺杂 GaAs 多量子阱, 磁量子输运, 抗磁 SdH 振荡.

引言

1986 年, A. Zrenner 和 F. Koch 等人首先报道了 Si 平面掺杂 (δ 掺杂) GaAs 形成的量子阱二维电子气存在纵向磁场下的磁阻振荡, 并将其称为抗磁 (diamagnetic) SdH 振荡^[1]. 这一实验结果引起了人们的广泛兴趣. 一般来说, 在磁量子输运上二维区别于三维的重要特征是只存在横向磁阻的 SdH 振荡而不存在纵向磁阻振荡, 这也是通常实验中区别二维和三维的方法之一. 现在已经知道 δ 掺杂二维电子气与异质结二维电子气存在两点较大的差别: 一是施主原子与电子气在空间是混合的, 所以电子迁移率较低, $\mu_{4.2\text{K}} \approx 4000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$; 二是被电子占据的子带较多, 平面掺杂浓度 $N_s = 4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 时, 已有 4 个子带被占据^[2], 正是这些特点使得 Si δ 掺杂 GaAs 具有不同于通常二维电子气 (2DEG) 的输运行为. 与异质结相比, 由于 δ 掺杂层迁移率较低, 相应磁量子输运的观测较为困难, 需要更低的温度和更强的磁场, 目前有关的实验报道并不很多^[3].

本文使用 MBE 技术在较低温度下生长了含有 3 层相同 Si 掺杂浓度且均匀间隔的 GaAs 外延片, 在低温和强磁场下测量了其输运参数, 从中分析出 δ 层 2DEG 的特性, 并试图探讨相邻 2DEG 层的耦合效应.

1 样品制备和实验结果

样品结构如图 1 所示, 是用 MBE 技术在 (100) 晶向的 GaAs 衬底上生长的, 生长

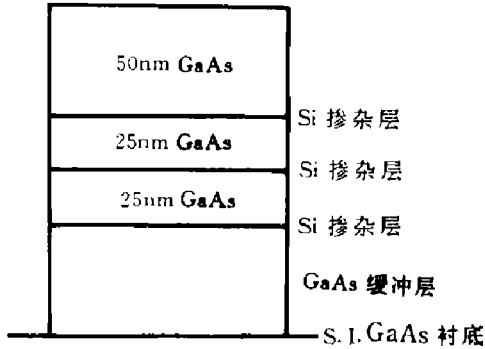


图 1 样品结构剖面图
Fig. 1 Depth-profile of
the sample structure

速度为 $1\mu\text{m}/\text{h}$. 平面掺杂 Si 是通过关闭 Ga 源 (此时 As 源仍打开不变), 打开杂质源一段时间来实现的, 平面掺杂浓度的高低通过控制杂质源打开的时间来控制. 样品的导带结构如图 2 所示. 3 个 δ 掺杂层的掺杂浓度相同, 均为 $1.09 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$. 外延时衬底温度控制为 550°C . 太高则会使 Si 掺杂层扩散加剧, 经验表明: 600°C 时, Si 平面原子层的扩散已达 12nm ; 太低则 Ga、As 原子的活性不够, 不能有效地形成外延层. 我们的工艺条件可以使 Si δ 掺杂层控制在 7nm 范围以内, 掺杂层宽用水银探针 $C-V$ 测量.

在 400°C 氢气氛保护下, 用 In 扩散获得电极的欧姆接触. 电极深度由 In 扩散时间控制. $I-V$ 测量表明电极为真正的欧姆接触.

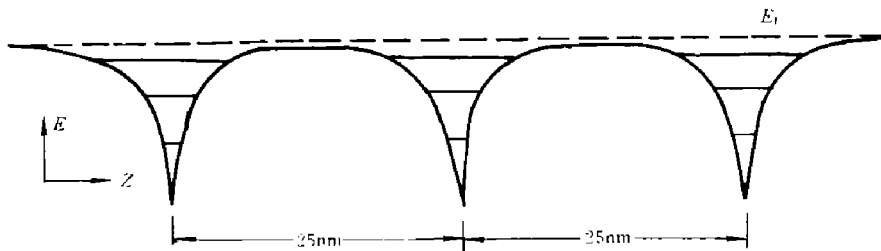


图 2 样品导带结构图
Fig. 2 The conduction band structure of the sample

预先在 $4.2 \sim 300 \text{K}$ 温区 0.1T 电磁铁上测得载流子浓度和迁移率随温度的变化曲线, 如图 3、4. 随温度降低, 载流子浓度也降低, 而迁移率增大; 到 4.2K 后载流子浓度趋于饱和. 分别有 $n_{4.2\text{K}} = 2.8 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 、 $\mu_{4.2\text{K}} = 4000 \text{cm}^2/\text{Vs}$; $n_{77\text{K}} = 3.6 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 、 $\mu_{77\text{K}} = 1000 \text{cm}^2/\text{Vs}$. 与异质结 2DEG 的有关参数相比^[4], 可以看到 δ 掺杂 2DEG 的迁移率较低, 而载流子浓度却较高.

磁阻测量实验在 L^3He 致冷系统内进行. ^3He 气体 (10L) 在样品空间冷凝, 改变吸附泵温度, 使吸附泵吸附能力达到最强, 通过吸附 ^3He 蒸气降压, 使样品室达到最低温度 0.3K . 增加吸附泵温度和用样品室电热丝, 可以获得 $0.3 \sim 1.2 \text{K}$ 温度. 对 ^4He 作降压降温, 可以获得 $1.2 \sim 4.2 \text{K}$ 温区. 温度由经定标的碳电阻温度计监控. 样品可与磁场垂直或平行放置.

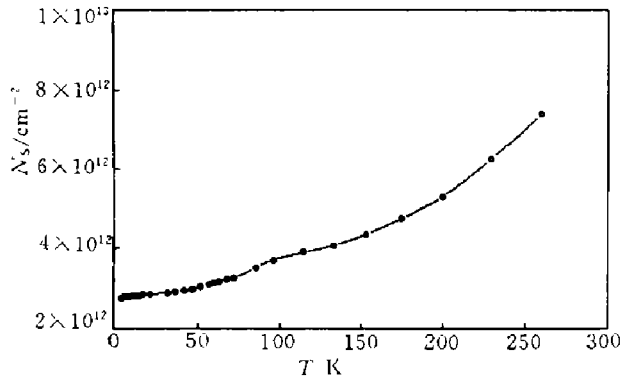


图 3 4.2~300 K 载流子浓度随温度的变化
Fig. 3 Variation of the carrier concentration with temperature from 4.2 K to 300 K

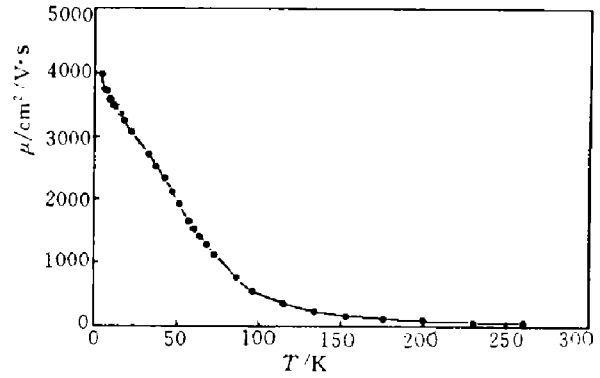


图 4 4.2~300 K 迁移率随温度的变化
Fig. 4 Variation of the mobility with temperature from 4.2 K to 300 K

图 5(a) 和 (b) 分别是样品横向微分磁阻和霍尔微分电阻与磁场的关系. 在图中可以看到: 0.3 K 和 1.2 K 时, SdH 振荡比较清晰, 表现出量子输运的特征; 随温度升高, 振荡逐步减弱; 到 4.2 K 时, 振荡完全消失, 变为经典行为.

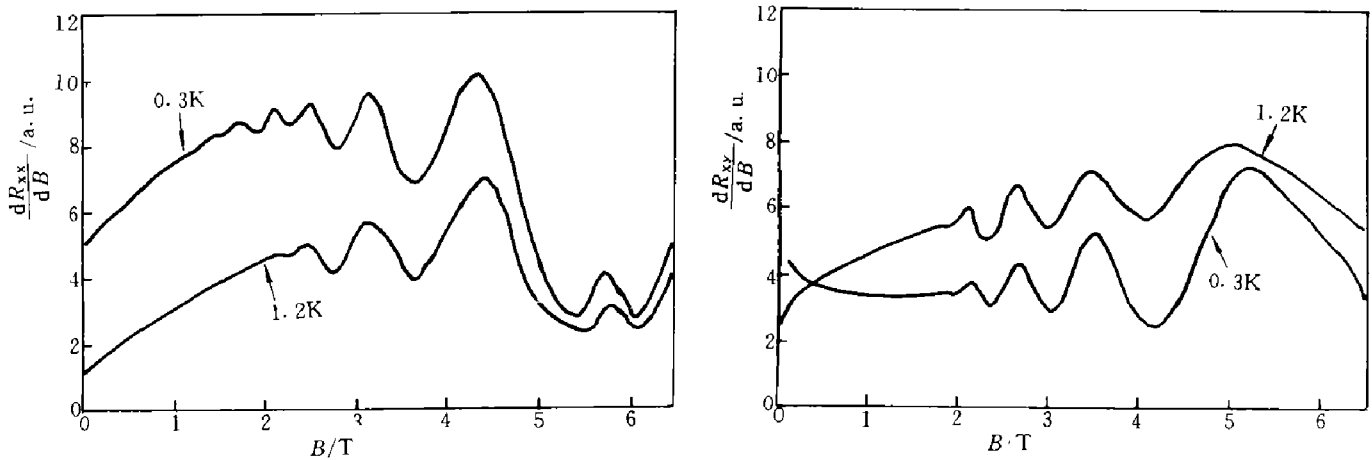


图 5 (a) 横向磁阻微分, (b) 霍尔电阻微分
Fig. 5 (a) The magnetic field derivative of transverse magnetoresistance, (b) the magnetic field derivative of Hall resistance

图 6 是样品在 0.3~4.2 K 温区纵向磁阻与磁场的关系. 随磁场增强, 纵向磁阻表现出清晰的振荡行为. 与横向磁阻的 SdH 振荡比较, 其振荡周期较长, 且温度升高到 4.2 K 振荡仍然出现. 在实验温区, 振荡周期基本不随温度变化.

2 分析和讨论

2.1 纵向磁阻振荡起源

图 6 中的纵向磁阻振荡与图 5 中横向磁阻的 SdH 振荡相比, 其周期要大得多. 这种纵向磁阻的振荡有其特殊性, 为此我们作一分析.

首先讨论只有一个 δ 掺杂层时的情况. 设外加磁场沿 Y 方向 (平行于 δ 层), 掺杂层 V 型势阱中电子的 Schrödinger 方程为

$$\left[\frac{P_y^2}{2m^*} + \frac{P_z^2}{2m^*} + \frac{(P_x + ezB)^2}{2m^*} + \varphi(z) \right] \Psi = E \Psi, \quad (1)$$

其中 $\varphi(z)$ 是平面掺杂施主电离后在导带上形成的 V 型势函数. $\varphi(z)$ 通过泊松方程

$$\frac{d^2\varphi(z)}{d^2Z} = -\frac{e^2 N_s}{\epsilon}, \quad (2)$$

由 2DEG 浓度 N_s 确定, 其中 ϵ 是 GaAs 的介电常数. 联立式 (1) 和 (2) 可以得到纵向磁场作用下 δ 掺杂 2DEG 中子能带公式

$$E = E_n(K_x, B, N_s) + \frac{\hbar^2 K_y^2}{2m^*}. \quad (3)$$

要获得式 (3) 的解析式是很困难的, 只能用自洽计算求数值解.

使用 H. Reisinger 等提出的简化模型^[5], 针对我们的样品条件 (取 $N_s = 2.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $m^* = 0.065m_0$) 对式 (1)、(2) 作数值计算, 得到结果如图 7 所示.

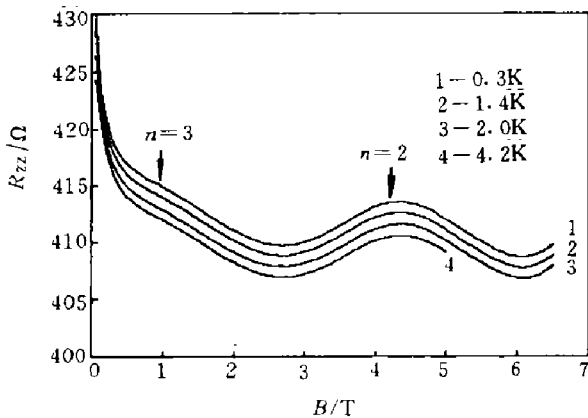


图 6 0.3~4.2 K 温区纵向磁阻随温度的变化
Fig. 6 Variation of the longitudinal magnetoresistance with magnetic field at 0.3 K to 4.2 K temperature region

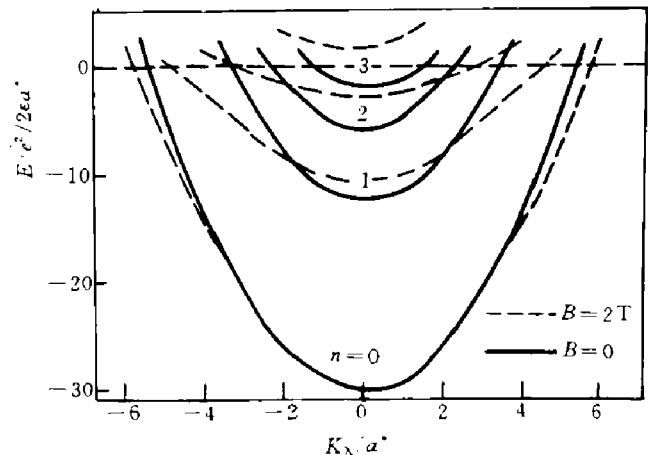


图 7 磁场作用下子能带的变化
Fig. 7 Variation of the subband under the applied magnetic field

从图 7 可知, 随磁场增强, 电子占据的子带数不断减少. 从物理意义上来说, 纵向磁阻振荡是由于子能带结构随磁场变化, 进而导致 N_s 在子带上的分布发生变化所致. 随磁场增强, 电子趋向于分布在更低的子带上. 当磁场增大使得某一子带底正好通过费密能级, 这时电子所受到的散射最强, 在 R_{zz} 上对应振荡峰.

由以上分析可知, 正是由于 δ 掺杂中多子带占据的特征, 使得纵向抗磁 SdH 振荡比较容易出现.

2.2 设计 δ 掺杂多量子阱样品的考虑

在样品中我们通过 In 的扩散, 使 3 个相同的 δ 掺杂量子阱 2DEG 层并联导电. 这样做的目的主要基于以下两个方面.

第一, 在不考虑相邻阱之间的耦合时, 在相同的温度下, 3 个 δ 掺杂层样品的纵向磁阻振荡要比相同平面掺杂浓度的单掺杂层样品强得多. 因为在磁场作用下, 3 个量子阱的对应子带 (本实验中 $n=3, 2$) 同时越过费密能级, 使得 R_{zz} 的振荡信号加强. 实验结果验证了我们的设想, 不需要对图 6 微分振荡就很清晰, 而文献 [5] 中报道的振荡不通过微分是看不出来的. 图 6 中标出了对应子带 $n=2, 3$ 越过费密能级的振荡峰, 图 6 中 $n=3$ 的振荡峰并不明显, 这是由于 $N_s=2.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 时, 电子只占据 $n=3$ 子带底部^[1], 在较小的磁场作用下, 子带底就会越出费密能级使电子不再占据, 所以振荡峰对应的磁场较小, 容易被覆盖.

第二, 希望能够测量到相邻 2DEG 之间的量子耦合效应. 从理论上来说, 相邻量子阱之间的间距越小, 耦合越强. 但由于 δ 掺杂层必然要扩散, 在生长时必须控制好条件使掺杂层的扩散尽可能小, 这样才能把阱间隔做小, 这在生长工艺中非常困难. 从另一个角度来看, 振荡峰的加强很可能会对耦合形成抑制. 有关的工作还在继续, 我们认为如果能将相邻阱之间的间隔缩小到 10 nm, 应该能观测到量子耦合效应.

2.3 横向和纵向振荡的对比

样品温度从 0.3 K 上升到 4.2 K, 横向磁阻振荡逐步消失, 而纵向磁阻振荡基本不随温度变化. 由这一温度行为的差异, 我们可以推断这两种振荡的机理是完全不同的. 图 6 中实验曲线的明显特征是随温度升高形状基本不变, 只是略微向下移动. 这说明了在 0.3~4.2 K 温区, 电子在子带上的填充状况基本上不随温度变化, 而磁场对其影响较大.

纵向磁阻振荡的周期远大于横向振荡的周期, 并且不再等于 $\Delta(1/B)$. 由图 5(a) 可以看到, 随磁场从 0 增大到 7 T, 横向磁阻振荡有 4~5 个峰, 比纵向多. 这说明: 尽管纵向磁场可以通过改变子能带结构来调制电子在子带上的分布, 但比起横向磁场通过改变子带底与费密能级之间的距离来影响电子的分布要弱得多.

2.4 霍尔振荡及其含义

为了便于分析, 我们分别将 R_{xx} 、 R_{xy} 对 B 求导, 得到图 5(a) 和 (b). 从图 5 可以清楚地看到 dR_{xx}/dB 和 dR_{xy}/dB 振荡周期相同, 相差 90° 的相位, 并且这一特征基本不随温度而变化. 我们知道, 在 GaAs/ $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 异质结 2DEG 中的量子霍尔效应 (QHE) 就存在这一 90° 相位差的特征^[6]. 即随磁场的变化, E_F 位于局域态中时, 散射被削弱, R_{xx} 极小, 此时对应霍尔平台, $R_{xy}=h/ve^2$ (v 是整数填充因子), 求导后出现 90° 相差. 也就是说, 异质结 2DEG 中的 90° 相差是系统存在局域态进而引入迁移率隙的证据之一. 基于 QHE 的理论, 对照我们的实验结果, 我们认为异质结 2DEG 中的局域态和迁移率隙的概念在 δ 掺杂形成的量子阱 2DEG 中也适用.

1988 年, A. Zrenner 等报道在 δ 掺杂 2DEG 中, 在磁场高于 10 T 时, 观察到了发育很好的量子霍尔平台^[7]. 我们分析图 5(a) 中, $B > 5$ T 后磁阻的陡降预示着量子霍尔平台的到来, 但我们的 ^3He 系统超导磁体只能提供 7 T 的最大磁场.

2.5 掺杂量子阱中发生磁致金属-绝缘体转变 (MIT) 的可能性

由于 δ 掺杂量子阱的特点之一是施主原子与 2DEG 是混合的, 所以有人提出可以用 δ 掺杂样品来研究二维中的磁致 MIT, 并预期它比异质结 2DEG 更容易观察到磁致 MIT^[8]. 基于大量的实验数据, 我们认为, 要想在 δ 掺杂量子阱中观察到横向磁场下的 MIT, 样品必须是低掺杂的. 因为掺杂浓度较高, 就意味着施主原子靠得很近, 要使杂质电子波函数完全束缚在施主原子上、相邻电子波函数不交迭的磁场就更强、就要求更低的温度.

基于磁冻结模型, 我们用二维 Mott 判据^[9]简单估算 $T=0$ 时的 MIT 临界磁场.

$$N_D \cdot a_{\perp}^2 = \delta^2, \quad (4)$$

其中, N_D 是施主浓度; δ 是常数, 取值为 0.35; a_{\perp} 是垂直磁场方向类氢施主的等效玻尔半径, 有

$$a_{\perp} = 2L = 2 \left(\frac{\hbar}{eB} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

如果掺杂浓度 $N_D = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, 计算得 $T=0$ 时的 MIT 临界磁场为 $B_{\text{MI}} = 21 \text{ T}$. 考虑温度的影响, B_{MI} 会有所增大.

3 结语

δ 掺杂形成的量子阱 2DEG 具有载流子浓度高和迁移率低的特点, 这一特点决定了它在深低温、强磁场下有不同于通常 2DEG 的输运现象. 许多问题还有待进一步的实验数据来验证. 另外, 基于 δ 掺杂的新结构 (例如 δ 掺杂 GaAs/Al_{1-x}Ga_xAs 异质结) 有可能为我们研究量子干涉提供样品条件.

参考文献

- 1 Zrenner A, Koch F *et al.* *Phys. Rev.*, 1986,**33**,5607
- 2 Ploog K. *J. Crystal Growth*, 1987,**81**:304-313
- 3 Mezrin O *et al.* *Superlattices Microstruct.* 1991,**10**:107
- 4 Hiyamizu S. *Semiconductors and Semimetals*, 1990,**30**:53
- 5 Reisinger H *et al.* *Surface Science*, 1986,**170**:397-401
- 6 Prange R E, Girvin S M. *The Quantum Hall Effect*, New York: Springer-Verlag, 1987.
- 7 Zrenner A *et al.* *Semicond. Sci. Technol.*, 1988,**3**:1132-1135
- 8 Shik A Ya. *Sov. Phys. Semicond.*, 1992,**26**(7):649
- 9 Mott N F, Kaveh M. *Advances in Physics*, 1985,**34**:350

QUANTUM MAGNETOTRANSPORT OF Si δ -DOPING GaAs MULTIPLE QUANTUM WELL

Wei Yayi Zheng Guozhen Guo Shaoling Tang Dingyuan

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

Peng Zhengfu Zhang Yunqiang

(Nanjing Institute of Electronic Devices, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract By using the MBE technique, a GaAs film which contained three Si δ -doping layers was fabricated at low temperature, and triple QWs structure was formed. The transverse magnetoresistance, longitudinal magnetoresistance and Hall resistance were measured from 0.3 K to 4.2 K at high magnetic field up to 7 T. The SdH oscillation of the transverse magnetoresistance and the "diamagnetic" SdH oscillation of the longitudinal magnetoresistance were observed. Based on the experimental results, the mechanisms of the longitudinal oscillation and the Hall oscillation are discussed. The possibility of the magnetic-induced metal-insulator transition is briefly analyzed.

Key words δ -doping GaAs MQW, quantum magnetotransport, diamagnetic SdH oscillation.