

# In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As 量子阱 中的正磁电阻效应\*

商丽燕<sup>1)</sup> 林 铁<sup>1)</sup> 周文政<sup>1,2)</sup> 李东临<sup>3)</sup> 高宏玲<sup>3)</sup>  
曾一平<sup>3)</sup> 郭少令<sup>1)</sup> 俞国林<sup>1)</sup> 褚君浩<sup>1)†</sup>

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) 广西大学物理科学与工程技术学院, 南宁 530004)

3) 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

(2007 年 12 月 3 日收到, 2008 年 3 月 25 日收到修改稿)

在低温强磁场条件下, 对 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As 量子阱中的二维电子气进行了磁输运测试. 在低磁场范围内观察到正磁电阻效应, 在高磁场下这一正磁电阻趋于饱和, 分析表明这一现象与二维电子气中的电子占据两个子带有关. 在考虑了两个子带之间的散射效应后, 通过分析低磁场下的正磁电阻, 得到了每个子带电子的迁移率, 结果表明第二子带电子的迁移率高于第一子带电子的迁移率. 进一步分析表明, 这主要是由两个子带之间的散射引起的.

关键词: 二维电子气, 正磁电阻, 子带散射

PACC: 7360L, 7210, 7280E

## 1. 引 言

在弱无序的二维电子气体中, 通常会观察到电阻率随磁场的增加而减小(或增加), 即负磁电阻(或正磁电阻)效应. 负磁电阻效应与电子波函数的量子相干散射引起的弱局域化有关, 而正磁电阻效应与电子自旋-轨道相互作用引起的反弱局域化有关<sup>[1-3]</sup>. 最近的研究表明, 在半经典输运范围内, 记忆效应(memory effect)同样会引起正、负磁电阻效应, 其正、负性取决于散射势的类型<sup>[4-6]</sup>. 而对 GaAs 量子阱中二维空穴气的研究表明, 低磁场范围的正磁电阻效应与空穴占据了轻、重空穴带以及这两个子带间的散射有关<sup>[7,8]</sup>. 由此可见, 分析磁电阻效应对研究二维电子气的自旋-轨道相互作用、散射机制等输运特性是非常重要的.

本文对 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As 单量子阱中二维电子气进行了磁输运测试, 分析了低磁场下的正磁电阻效应, 研究了二维电子气中的电子占据两个

子带时子带之间的相互作用对输运特性的影响.

## 2. 理论模型

当二维电子气占据两个子带时, 子带之间的散射会影响二维电子气的输运特性. 低温下, 电子受到的散射以杂质的弹性散射为主, 如果考虑子带间散射的影响, 通过求解 Boltzmann 方程得到纵向磁电阻为<sup>[7]</sup>

$$\frac{\Delta\rho_{xx}(B)}{\rho_{xx}(0)} = \frac{\rho_{xx}(B) - \rho_{xx}(0)}{\rho_{xx}(0)} = \text{Re} \left[ \frac{\text{Tr} [NK^{-1}]}{\text{Tr} [N(K - i\omega_c I)^{-1}]} \right] - 1, \quad (1)$$

式中  $\rho_{xx}(0)$  和  $\rho_{xx}(B)$  分别为零磁场和在磁感应强度为  $B$  的磁场下的电阻率;  $N$  是一个与浓度相关的矩阵, 其矩阵元  $N_{ij} = \frac{k_i k_j}{2\pi} = \sqrt{n_i n_j}$ , 其中  $k_i$  和  $n_i$  分别为第  $i$  个子带的费米波矢和电子浓度;  $I$  为单位矩阵;  $\omega_c = eB/m^*$  为电子的回旋频率;  $K$  为一个散射

\* 国家自然科学基金(批准号 60221502) 国家重点基础研究发展规划(批准号 2007CB924901) 资助的课题.

† E-mail: jhchu@mail.sitp.ac.cn

矩阵,其矩阵元与子带内和子带间的散射概率有关.当二维电子气占据两个子带时,有

$$K = \begin{bmatrix} K_1 & K_3 \\ K_3 & K_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}^{(0)} - P_{11}^{(1)} + P_{12}^{(0)} & -P_{12}^{(1)} \\ -P_{12}^{(1)} & P_{22}^{(0)} - P_{22}^{(1)} + P_{22}^{(0)} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $P_{ij}^{(m)}$  是第  $i$  和第  $j$  个子带之间的散射概率以散射角  $\phi$  做傅里叶展开时的系数,其中  $m$  为傅里叶展开的级数.(2)式表明,矩阵元  $K_3$  为负值.这里,第  $i$  个子带的散射时间  $\tau_i$  和散射矩阵  $K$  有关,

$$\begin{pmatrix} K_1 & K_3 \\ K_3 & K_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 \tau_1 \\ k_2 \tau_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

这时,纵向磁电阻为

$$\frac{\Delta\rho_{xx}(B)}{\rho_{xx}(0)} = \frac{r\sigma_1\sigma_2(\mu_1 - \mu_2)B^2}{\sigma_0^2 + (ren\mu_1\mu_2B)^2}, \quad (4)$$

式中  $\sigma_i$  为第  $i$  个子带的零场电导; $\sigma_0 = n_1e\mu_1 + n_2e\mu_2$ ;  $i\mu_i = e\tau_i/m^*$  为第  $i$  个子带电子的迁移率; $r = (\bar{\tau}_1 \bar{\tau}_2) / (\tau_1 \tau_2)$ ,其中  $\bar{\tau}_1$  和  $\bar{\tau}_2$  是散射矩阵  $K$  的本征值; $n$  为总的电子浓度.由(4)式得到,第一子带和第二子带电子被散射的概率  $P_1, P_2$  可以分别表示为

$$P_1 \propto \frac{1}{\tau_1} = \frac{K_1 K_2 - K_3^2}{K_2 - K_3 \frac{k_2}{k_1}}, \quad (5)$$

$$P_2 \propto \frac{1}{\tau_2} = \frac{K_1 K_2 - K_3^2}{K_1 - K_3 \frac{k_1}{k_2}}. \quad (6)$$

### 3. 样品结构和实验

实验所用的  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  量子阱结构样品是由分子束外延设备生长的.其生长过程如下:首先在半绝缘的  $\text{InP}$  衬底上生长 327 nm 的  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ ,接着依次生长 20 nm 的  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  沟道层,4 nm 的  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  隔离层,Si 的  $\delta$  掺杂层(掺杂浓度为  $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ),21 nm 的  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  势垒层,最后是 15 nm 的  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  帽层.整个样品的生长温度均为 440 °C,而且在生长过程中由反射高能电子衍射监测.测试的样品被切割成 5 mm × 5 mm 的正方形,用  $\text{In}$  形成良好的欧姆接触.在磁感应强度为 0—8 T 的范围内,采用范德堡法测量样品的纵向电阻率和霍尔电阻率.

### 4. 结果及讨论

图 1 所示是温度为 1.5 K 时样品纵向电阻率的测试结果.在低磁场下观察到正、负磁电阻效应,而在高磁场范围内观察到明显的 Shubnikov-de Haas (SdH) 振荡.如果存在较强的自旋-轨道相互作用,在低磁场下应该先观察到由反弱局域效应引起的正磁电阻,随磁场的增加,磁散射时间随之减小,当自旋-轨道散射时间与磁散射时间接近相等时,出现由弱局域效应引起的负磁电阻.而在图 1 中,先观察到由弱局域效应引起的负磁电阻,然后才出现正磁电阻效应.因此,图 1 所示的正磁电阻效应与自旋-轨道相互作用引起的反弱局域化无关.记忆效应对经典 Drude 电导的修正同样会引入正磁电阻效应,然而在高磁场下这一正磁电阻是非饱和的.而图 1 所示的正磁电阻效应,在高磁场范围,随磁场的增加不再增加,即趋于饱和(如图 1 中虚线所示).

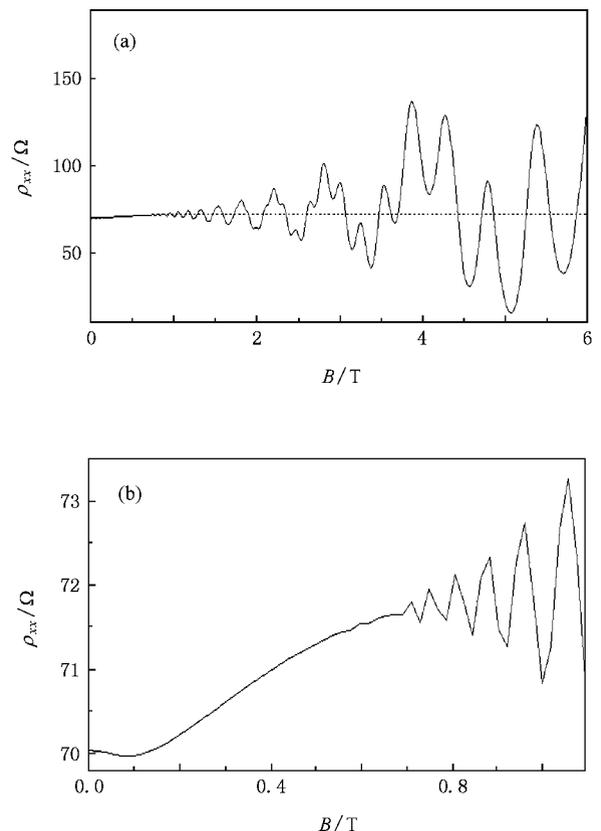


图 1 温度为 1.5 K 时样品纵向电阻的测试结果 (a) 在磁感应强度为 0—6 T 的范围内纵向电阻的测试结果 (b) 在磁感应强度为 0—1.1 T 的范围内纵向电阻的测试结果

图 2 所示为 SdH 振荡的快速傅里叶变换得到的结果.从图 2 中可以观察到两个明显的峰( A 峰和 B 峰),表明二维电子气占据了两个子带. A 峰、B 峰的横坐标分别对应于第一子带、第二子带的振荡频率  $f_1$ 、 $f_2$ , C 峰对应的频率为  $f_1 - f_2$ ,这一差频是由于子带之间的散射引起的<sup>[9]</sup>.根据振荡频率与电子浓度的关系  $n_i = ef_i / (\pi h)$ ,得到第一子带和第二子带的电子浓度分别为  $1.92 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  和  $0.49 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ,其和与霍尔浓度  $2.44 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  一致,所以这里不存在平行电导效应.因此,图 1 所示的正磁电阻效应主要是由于电子占据两个子带引起的.

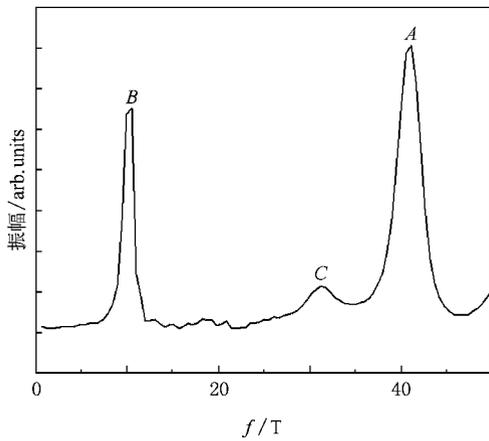


图 2 SdH 振荡快速傅里叶变换的结果

图 3 给出了不同温度下测得的正磁电阻效应.由(4)式对测得的正磁电阻进行拟合,其结果也在图 3 中给出.每个子带的电子浓度已经在上述快速傅里叶变换结果中得到,零磁场下的电导直接由实验结果给出.因此,在拟合过程中,子带电子浓度和零磁场下的电导作为不变的参数,而由零磁场下电导公式  $\sigma_0 = n_1 e\mu_1 + n_2 e\mu_2$  可知,拟合参数  $\mu_1$  和  $\mu_2$  也并不是完全独立的.通过对测得正磁电阻的拟合,可以获得第一子带和第二子带的迁移率以及与散射概率相关的散射矩阵  $K$ .

图 4(a)给出了在测量的温度范围内每个子带的迁移率对温度的依赖关系.图 4(a)表明,在温度低于 80 K 时,这两个子带的迁移率随着温度的升高几乎不发生变化.如果在沟道层与掺杂层之间存在一个隔离层(如本实验的样品),低温下远程电离杂质对电子的散射将大大减弱,而且低温下声子散射也很弱,因此这时影响电子迁移率的主要散射是合金无序散射. Qiu 等<sup>[10]</sup>从实验上表明,低温下受合金

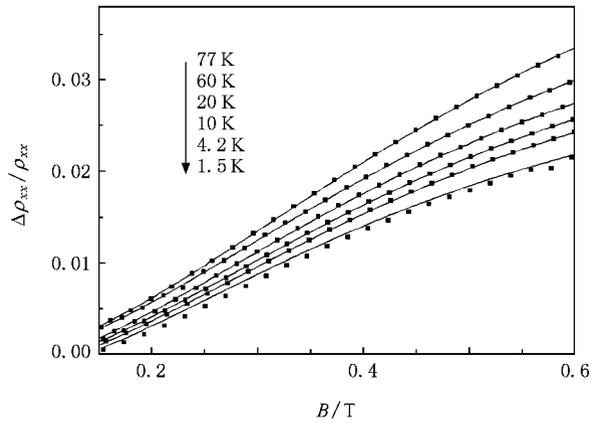


图 3 不同温度下的正磁电阻效应.数据点为实验结果,曲线为拟合结果

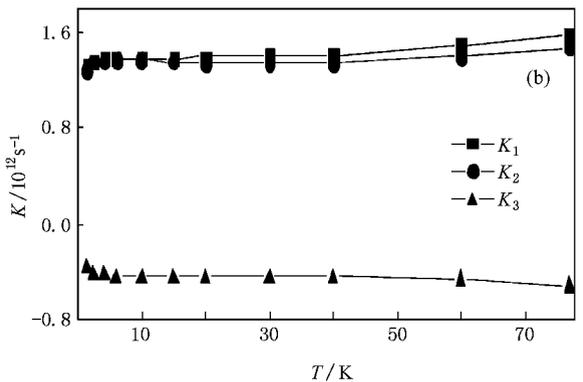
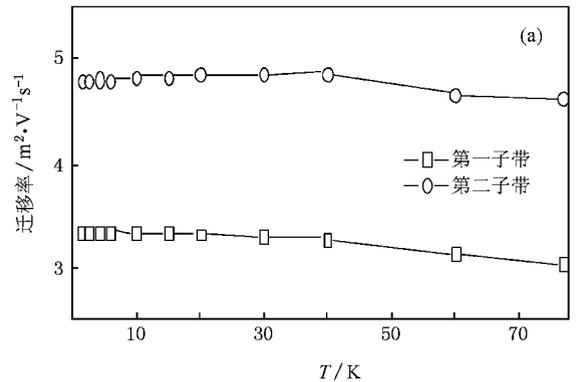


图 4 第一子带和第二子带电子迁移率以及散射矩阵  $K$  的矩阵元对温度的依赖关系 (a)第一子带和第二子带电子迁移率对温度的依赖关系 (b)第一子带和第二子带电子散射矩阵元对温度的依赖关系

无序散射影响的电子迁移率基本上不随温度变化.图 4(a)还表明,在所测试的整个温度范围内,第一子带的迁移率低于第二子带的迁移率,这是由于子带

之间的散射引起的. 为了确证这一结论, 在图 4(b) 中给出了拟合得到的散射矩阵  $K$  中各个矩阵元随着温度的变化规律. 由图 4(b) 可以看到,  $K_1$  和  $K_2$  接近相等, 而  $K_3$  确实为一负值. 根据(5)和(6)式, 在  $K_1$  和  $K_2$  接近相等的条件下, 每个子带电子被散射的概率主要由与子带之间的散射概率相关的散射矩阵元  $K_3$  决定, 而且这一项与两个子带电子的费米波矢之比  $k_i/k_j$  有关. 由于每个子带的费米波矢由浓度决定, 即  $k_i = \sqrt{2\pi n_i}$ , 快速傅里叶变换的结果表明第一子带电子的浓度远大于第二子带. 从(5)和(6)式可知, 在考虑子带电子之间的散射效应后, 第一子带电子受到的散射概率大于第二子带, 因此第一子带电子的迁移率低于第二子带.

## 5. 结 论

通过磁输运测试, 对  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  量子阱中二维电子气的输运特性进行了研究. SdH 振荡的快速傅里叶变换结果表明, 二维电子气占据了两个子带, 而且这两个子带之间存在较强的散射. 研究表明, 低磁场下观察到的正磁电阻效应由电子占据两个子带引起. 在考虑了子带间的散射效应后, 通过分析低磁场下观察到的正磁电阻效应, 得到了第一子带和第二子带电子的迁移率以及散射矩阵的矩阵元. 由于子带间散射的存在, 使得第一子带电子被散射的概率大大增加, 因此第二子带电子的迁移率高于第一子带电子的迁移率.

- [ 1 ] Koga T, Nitta J, Akazaki T, Takayanagi H 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 046801
- [ 2 ] Miller J B, Zumbuhl D M, Marcus C M, Lyanda-Geller Y B, Goldhaber-Gordon D, Campman K, Gossard A C 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 076807
- [ 3 ] Golub L E 2005 *Phys. Rev. B* **71** 235310
- [ 4 ] Cho H I, Gusev G M, Kvon Z D, Renard V, Lee J H, Portal J C 2005 *Phys. Rev. B* **71** 245324
- [ 5 ] Renard V, Kvon Z D, Gusev G M, Portal J C 2004 *Phys. Rev. B* **70** 033303
- [ 6 ] Mirlin A D, Polyakov D G, Evers F, Wolfle P 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 126805
- [ 7 ] Zaremba E 1992 *Phys. Rev. B* **45** 14143
- [ 8 ] Yaish Y, Prus O, Buchstab E, Shapira S, Yoseph G B, Sivan U, Stern A 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4954
- [ 9 ] Zhou W Z, Yao W, Zhu B, Qiu Z J, Guo S L, Lin T, Cui L J, Gui Y S, Chu J H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2044 ( in Chinese ) [ 周文政、姚 炜、朱 博、仇志军、郭少令、林 铁、崔利杰、桂永胜、褚君浩 2006 物理学报 **55** 2044 ]
- [ 10 ] Qiu Z J, Jiang C P, Gui Y S, Shu X Z, Guo S L, Chu J H, Cui L J, Zeng Y P, Zhu Z P, Wang B Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2879 ( in Chinese ) [ 仇志军、蒋春萍、桂永胜、疏小舟、郭少令、褚君浩、崔利杰、曾一平、朱战平、王保强 2003 物理学报 **52** 2879 ]

# Positive magnetoresistance in $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ quantum well<sup>\*</sup>

Shang Li-Yan<sup>1)</sup> Lin Tie<sup>1)</sup> Zhou Wen-Zheng<sup>1,2)</sup> Li Dong-Lin<sup>3)</sup> Gao Hong-Ling<sup>3)</sup>  
Zeng Yi-Ping<sup>3)</sup> Guo Shao-Ling<sup>1)</sup> Yu Guo-Lin<sup>1)</sup> Chu Jun-Hao<sup>1)†</sup>

<sup>1)</sup> *National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*

<sup>2)</sup> *College of Physical Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China*

<sup>3)</sup> *Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*

( Received 3 December 2007 ; revised manuscript received 25 March 2008 )

## Abstract

Magnetotransport measurements have been carried out on  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  quantum wells in a temperature range between 1.5 and 77 K. We have observed a large positive magnetoresistance in the low magnetic field range, but saturating in high magnetic fields. The magnetoresistance results from two occupied subbands in the two-dimensional electron gas. With the intersubband scattering considered, we obtained the subband mobility by analyzing the positive magnetoresistance. It is found that the second subband mobility is larger than that of the first due to the existence of the intersubband scattering.

**Keywords** : two-dimensional electron gas, positive magnetoresistance, intersubband scattering

**PACC** : 7360L, 7210, 7280E

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60221502 ) and the State Key Development Program for Basic Research of China ( Grant No. 2007CB924901 ).

<sup>†</sup> E-mail : jhchu@mail.sitp.ac.cn