

文章编号: 1001-9014(2004)05-0329-04

掺杂 InGaAs/InAlAs 单量子阱中电子对称态 和反对称态磁输运研究

仇志军¹, 桂永胜¹, 崔利杰², 曾一平², 黄志明¹,
疏小舟¹, 戴宁¹, 郭少令¹, 褚君浩¹

(1. 中国科学院上海技术物理所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院北京半导体所, 北京 100083)

摘要: 利用变温 Hall 测量研究了重掺杂 InGaAs/InAlAs 单量子阱中二维电子气, 发现在量子阱中由于存在电子对称态和反对称态导致纵向电阻出现拍频现象。通过分析拍频节点位置, 得到电子对称态和反对称态之间的能级间距为 4meV。此外, 通过迁移率谱方法和多载流子拟合过程研究了不同迁移率电子的浓度和迁移率随温度的变化关系。

关键词: InGaAs/InAlAs 量子阱; 磁输运; 对称态; 反对称态
中图分类号: O482.5 **文献标识码:** A

MAGNETO - TRANSPORT OF ELECTRON SYMMETRIC AND ANTISYMMETRIC STATES IN HIGHLY DOPED InGaAs/InAlAs SINGLE QUANTUM WELL

QIU Zhi-Jun¹, GUI Yong-Sheng¹, CUI Li-Jie², ZENG Yi-Ping²
HUANG Zhi-Ming¹, SHU Xiao-Zhou¹, DAI Ning¹, GUO Shao-Ling¹, CHU Jun-Hao¹

(1. National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Beating patterns in longitudinal resistance caused by the symmetric and antisymmetric states were observed in a heavily doped InGaAs/InAlAs quantum well by using variable temperature Hall measurement. The energy gap of symmetric and antisymmetric states is estimated to be 4meV from the analysis of beating node positions. In addition, the temperature dependences of the subband electron mobility and concentration were also studied from the mobility spectrum and multicarrier fitting procedure.

Key words: InGaAs/InAlAs quantum well; magneto-transport; symmetric state; antisymmetric state

引言

如何利用电子的量子效应来设计新的器件, 一直是材料器件物理研究的热点。根据 Datta 等人^[1]的自旋场效应晶体管模型, Hu 和 Heitmann^[2]提出了利用耦合双量子阱中电子对称态和反对称态之间的干涉效应来制作新的场效应晶体管, 电子的干涉效应受外加栅压的控制。

然而, 最近, 我们^[3]发现在双 δ 掺杂 InGaAs 单量子阱中同样也存在电子对称态与反对称态, 这是因为在单量子阱中由于两个近邻 δ 掺杂层电子之间的耦合相互作用, 导致量子阱基态电子劈裂成两个能级相近的电子态, 即电子对称态与反对称态。与耦合双量子阱相比, 单量子阱结构在器件工艺技术上显然具有更大的优势。因此, 本文着重研究不同温度下双 δ 重掺杂 InGaAs 单量子阱中电子对称态与反

收稿日期: 2003-10-22, 修回日期: 2004-05-25

Received date: 2003-10-22, revised date: 2004-05-25

基金项目: 国家重点基础研究项目(2001GB309506)和自然科学基金项目(60221502, 10374094)

作者简介: 仇志军(1977-), 男, 江西上饶人, 现在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攻读博士学位, 专业为微电子与固体电子学, 研究方向为半导体材料电学性质研究。

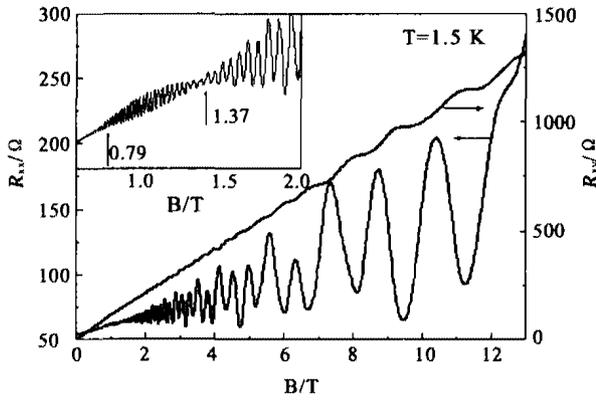


图1 1.5K下纵向电阻 R_{xx} 和霍尔电阻 R_H 随磁场的变化,插图显示了 $B < 2T$ 时, SdH 振荡的拍频现象,箭头指向节点的位置
 Fig. 1 The magnetic-dependence of longitudinal resistance R_{xx} and Hall resistance R_H at 1.5K. The beating patterns in SdH oscillations for $B < 2T$ are shown by the inset, and node positions are marked by arrows.

对称态的磁输运现象,并且利用迁移率谱和多载流子拟合过程来分析不同子带电子的输运参数随温度的变化关系.

1 样品结构和实验

$In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As$ 量子阱样品是在 GEN II 分子束外延系统上生长的,以半绝缘 InP 为衬底,首先生长 327nm 的 $In_{0.52}Al_{0.48}As$ 缓冲层,然后对称掺杂浓度为 $3 \sim 4 \times 10^{12} cm^{-2}$ 的 Si/ δ 掺杂层和 6nm 的 $In_{0.52}Al_{0.48}As$ 隔离层, $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 量子阱宽度为 20nm,最后是 30nm 的 $In_{0.52}Al_{0.48}As$ 势垒层和 20nm 的 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 覆盖层. 整个样品生长过程由高能电子衍射 (RHEED) 监测.

测量用的样品被切割成 $5 \times 5 mm^2$ 的正方形,样品的四个角蒸 In 形成良好的欧姆接触. 在 0 - 13 T 磁场范围内,采用范德堡法测量样品在不同温度 (1.5—225 K) 下的纵向电阻和 Hall 电阻.

2 结果和讨论

图 1 显示了 1.5K 下二维电子气的纵向电阻和 Hall 电阻,在 0.8T 以上可以很清楚的分辨出量子 Hall 平台,说明样品生长质量较好,电子具有较高的迁移率. 在低场情况下 ($< 1T$),纵向电阻的 Shubnikov-de Haas (SdH) 振荡出现了拍频现象,节点位置分别在 0.79T 和 1.37T 附近. SdH 振荡出现拍频现象表示在二维电子气中存在两个能量相近的子带,或者一个电子子带发生零场自旋分裂形成两个不同

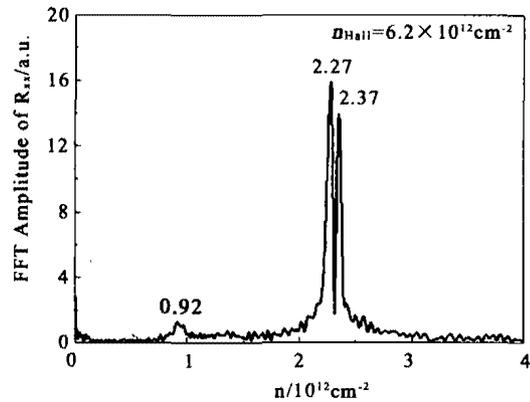


图2 图 1 中 R_{xx} 的快速傅里叶 (FFT) 变换
 Fig. 2 Fast Fourier transformation (FFT) spectrum corresponding to R_{xx} in Fig. 1

极化方向的能带. 虽然目前有很多小组报道了在 In-GaAs/InAlAs 量子阱中由于电子零场自旋分裂形成 SdH 振荡的拍频现象^[4],但是通过比较低场电子 Hall 浓度和由 SdH 振荡得到的子带电子总浓度就可以判断出磁阻拍频振荡的来源. 图 2 给出了 SdH 振荡的 FFT 变换,横坐标以电子浓度为单位 (考虑电子的自旋简并),得到电子的子带总浓度为 $5.6 \times 10^{12} cm^{-2}$,与从 Hall 电阻得到的电子浓度 $6.2 \times 10^{12} cm^{-2}$ 较为符合,如果考虑拍频现象是由于电子零场自旋分裂引起的,那么得到的子带电子总浓度仅为 Hall 浓度的一半,所以可以推断出 FFT 上两个主峰来源于电子的对称态与反对称态,电子浓度分别为 $2.37 \times 10^{12} cm^{-2}$ 和 $2.27 \times 10^{12} cm^{-2}$.

对于窄禁带半导体,较高的电子浓度对导带的非抛物性影响很大. 从 SdH 振荡幅度随温度的变化

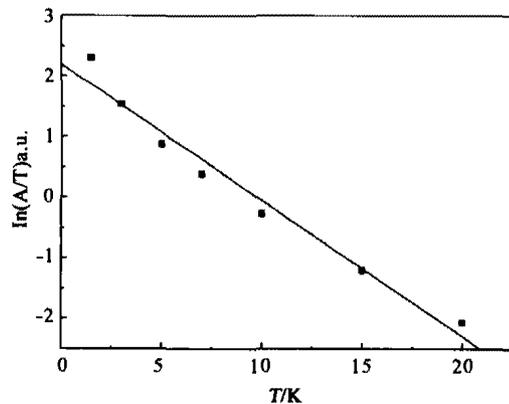


图3 $B = 5.6T$ 时 $\ln(\frac{A}{T})$ 与温度 T 的拟合曲线图
 Fig. 3 Numerical simulation of $\ln(\frac{A}{T})$ vs. temperature at $B = 5.6T$

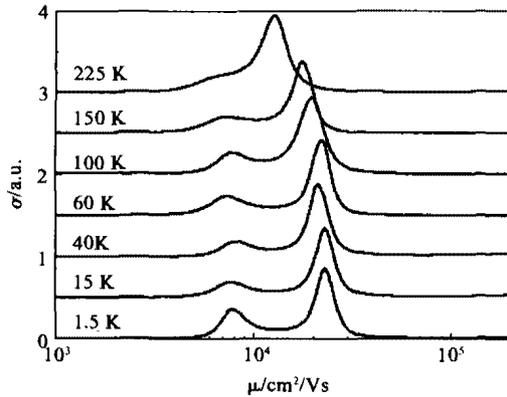


图4 不同温度下的迁移率谱
Fig. 4 Mobility spectra at various temperatures

关系, 可以推出费米能级处电子的有效质量,

$$\ln = \left(\frac{A}{T} \right) = C_1 - \frac{2\pi^2 k_B m^*}{e \hbar B} T \quad (1)$$

其中 C_1 是与温度无关的项, A 为振荡的幅度, 通过线性拟合 $\ln(\frac{A}{T})$ 与温度 T 的关系, 就可以确定费米面处电子的有效质量. 图3为 $B = 5.6 \text{ T}$ 时 $\ln(\frac{A}{T})$ 与温度 T 的拟合曲线, 得到费米面电子的有效质量 $m^* = (0.060 \pm 0.008) m_0$, 由于能带非抛物性的影响, 此数值远远大于 InGaAs 带边有效质量 $0.045 m_0$.

类似于电子自旋分裂引起的磁阻拍频振荡^[4], 由电子对称态和反对称态导致的拍频振幅调制也可以表示为:

$$A \sim \cos(\pi \nu) \quad (2)$$

$\nu = \Delta_{\text{SAS}} / \hbar \omega_c$, $\hbar \omega_c$ 为 Landau 能级间距, 当 ν 为半整数 ($\nu = N + 1/2$, $N = 0, 1, 2, \dots$) 时 $A = 0$, 也就是在 SdH 振荡中出现了拍频节点, 通过比较相邻节点处磁场大小: $B_{\nu+1/2} : B_{\nu+3/2} = (2N+3) : (2N+1)$, 可以确定整数 N . 从图1可以计算出最后两个拍频节点处磁场大小比值约为 1.7, 因此可以断定它们所对应节点的位置分别为 $\nu = 3/2$ 和 $5/2$, 并由此得到电子能级间隔 Δ_{SAS} 为 4 meV . 但是在图1中没有观察到对应于 $\nu = 1/2$ 的最后一个拍频节点, 这可能是由于磁阻拍频振荡受其他电子子带振荡的影响.

对于材料器件研究来说, 电子的迁移率是一个很重要的参数. 由于 FFT 峰的半高宽与电子的量子迁移率成反比^[5],

$$\Delta n \times \mu = \frac{2\sqrt{3}e}{\hbar} \quad (3)$$

Δn 为 FFT 电子浓度的半高宽, μ 为电子量子迁移

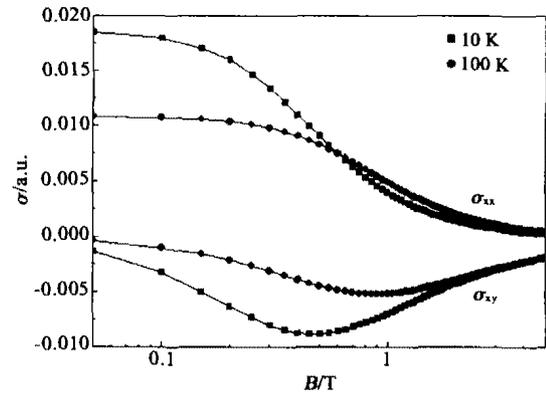


图5 10K 和 225K 下电导率实验值(点)和拟合值(实线)

Fig. 5 Experimental (Scatters) and simulations (Solid lines) conductivity at $T = 10 \text{ K}$ and 225 K

率. 因此从图2可以看出电子的对称态和反对称态的迁移率非常接近而且远远高于另外一个子带电子的迁移率. 通过方程(3)得到它们的量子迁移率依此为 $2.0, 2.1$ 和 $0.54 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. 因此在迁移率谱上出现两个明显的峰(如图4所示), 它们所对应的迁移率分别为 $2.5 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 和 $7 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ (此处的迁移率为输运迁移率, 不同于上面的量子迁移率^[6]), 从图中可以看到当温度高于 100 K 时, 由于晶格散射的影响, 高迁移率电子峰位开始向低迁移率方向移动, 低迁移率电子峰位逐渐趋于消失.

由于迁移率谱只能半定量的给出不同载流子的迁移率, 因此需要在此基础上, 对电导率进行多载流子拟合才能定量的给出不同载流子浓度和迁移率(见图5). 图6是在不同温度下, 通过迁移率谱和多载流子拟合过程得到的不同载流子浓度和电子迁移率, 所有结果的绝对误差均小于 5%. 从图中可以看出高迁移率载流子浓度 ($4.7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$), 与从 SdH 振荡得到的对称态和反对称态的电子总浓度 ($4.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) 相一致. 在低温下 ($T < 100 \text{ K}$), 二维电子气载流子浓度不随温度发生变化, 然而在高温下由于热激发, 导致高迁移率电子浓度增加 ($\sim 10\%$), 然而低迁移率电子浓度几乎没有发生变化. 在 $T < 100 \text{ K}$ 温度下, 二维电子气主要受无序合金势散射的影响, 电子迁移率基本不随温度变化^[7], 但是当温度升高时, 电子受晶格散射的影响增大, 电子迁移率呈 $T^{-1.5}$ 的规律下降.

3 结语

我们在重掺杂 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 单量

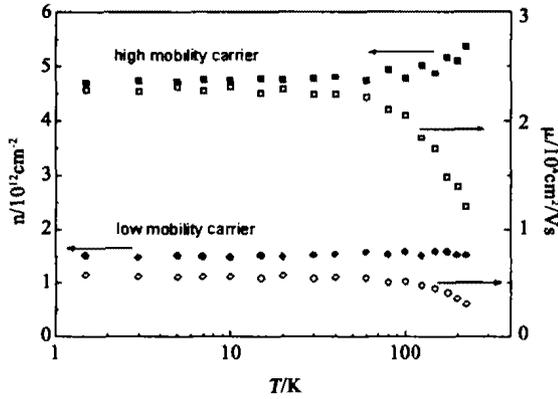


图6 不同子带电子浓度(实心)和迁移率(空心)随温度的变化

Fig.6 The temperature-dependence of subband concentrations (solid symbols) and mobilities (open symbols)

子阱中发现由电子对称态和反对称态引起的 SdH 振荡拍频现象,通过对拍频节点位置的确定,得到电子对称态和反对称态之间的能级间距为4meV.通过迁移率谱方法和多载流子拟合过程研究了不同迁移率电子浓度和迁移率随温度的变化关系,发现低温下电子迁移率主要受无序合金势散射的影响,在高温下,晶格散射起了主导作用.

(上接第328页)可更有效更直观地对外延层中的应力状况作出评价,研究结果显示,对于低失配的 $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ 衬底,外延层中的应力部分弛豫,若将衬底组分 y 精确地调整至3.6%左右,组分为0.23~0.24的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 外延层才不会有应力存在;而对于 GaAs 衬底,由于外延层与衬底晶格常数存在着大的偏差,11.8微米厚的外延层通过位错增殖后已处于无应变的完全弛豫状态,与此同时,位错增殖将导致摇摆曲线半峰宽的展宽.

REFERENCES

[1] Varesi J B, Bornfreund R E, Childs A C, et al. Fabrication of high-performance large-format MWIR focal plane arrays from MBE-Grown HgCdTe on 4" silicon substrates [J].

REFERENCES

- [1] Datta S, Das B. Electronic analog of the electro-optic modulator [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(7): 665—667.
- [2] Hu C M, Heitmann D. Bilayer quantum transistor [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(10): 1475—1477.
- [3] Gui Y, Guo S, Zheng G, et al. Electron transport in the AlGaAs/InGaAs double-heterostructure pseudomorphic high-electron-mobility transistor [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**(10): 1309—1311.
- [4] Das B, Miller D C, Datta S, et al. Evidence for spin splitting in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ heterostructures as $B \rightarrow 0$ [J]. *Phys. Rev. B*, 1989, **39**(2): 1411—1414.
- [5] Skuras E, Kumar R, Williams R L, et al. Subband dependent mobilities and carrier saturation mechanisms in thin Si doping layers in GaAs in the high density limit [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 1991, **6**(6): 535—546.
- [6] Brana A F, Diaz-Paniagua C, Batallan F, et al. Scattering times in AlGaIn/GaN two-dimensional electron gas from magnetoresistance measurements [J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, **88**(2): 932—937.
- [7] Basu P, Nag B. Estimation of alloy scattering potential in ternaries from the study of two-dimensional electron transport [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43**(7): 689—691.

- Journal of Electronic Materials*, 2001, **30**: 566—573.
- [2] Fewster P F. *X-ray scattering from semiconductors* [M]. London: Imperial College Press, 2000.
- [3] Lam T T. Shear deformation and strain relaxation in HgCdTe on (211) CdZnTe [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2000, **29**: 804—808.
- [4] Bartels W J, Nijman W. X-ray double-crystal diffractometry of Ga $_1-x$ Al $_x$ As epitaxial layers [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1978, **44**: 518—525.
- [5] Capper Peter. *Properties of narrow gap cadmium based compounds* [M]. England: Short Run Press Ltd, 1994, 399—412 & 41—43.
- [6] Berding M A, Nix W D, Rhiger D R, et al. Critical thickness in the HgCdTe/CdZnTe system [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2000, **29**: 676—679.
- [7] Nagai H. Structure of vapor-deposited Ga $_x$ Al $_{1-x}$ As crystals [J]. *Journal of Applied Physics*, 1974, **45**: 3789—3794.