

单边掺杂 InAlAs/InGaAs 单量子阱中二维电子气的磁输运特性*

周文政^{1,2)†} 姚 炜¹⁾ 朱 博¹⁾ 仇志军¹⁾ 郭少令¹⁾
林 铁¹⁾ 崔利杰³⁾ 桂永胜¹⁾ 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) 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)

(2005 年 7 月 5 日收到, 2005 年 10 月 19 日收到修改稿)

研究了双子带占据的 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 单量子阱中磁电阻的 Shubnikov-de Haas (SdH) 振荡效应和霍耳效应, 获得了不同子带电子的浓度、迁移率、有效质量和能级位置. 低磁感应强度 ($B < 1.5 \text{ T}$) 下由迁移率谱和多载流子拟合相结合的方法得到的各子带电子浓度与通过 SdH 振荡得到的结果一致. 在 $d^2\rho/dB^2 - 1/B$ 的快速傅里叶变换谱中, 观察到除了通常强烈依赖温度的对应于各子带的频率 f_1 和 f_2 以及 f_1 的倍频 ($2f_1$) 外, 还观察到对温度不敏感的频率 $f_1 - f_2$. 这是由于量子阱中不同子带的电子具有相近的有效质量, 两个子带之间发生了强烈的磁致子带间散射.

关键词: InAlAs/InGaAs 单量子阱, SdH 振荡, 二维电子气, 磁致子带间散射

PACC: 7360L, 7340H, 7200, 7280E

1. 引 言

基于 InP 基的 InAlAs/InGaAs 高迁移率晶体管与 AlGaAs/GaAs 高迁移率晶体管相比, 具有良好的高频、低噪声特性^[1,2]. 特别是基于 InP 基、点阵适配的高迁移率晶体管, 由于具有优良的性能而被用于毫米波低噪声放大器^[2,3]. 尽管已经用霍耳测量研究了 Si 高 δ 掺杂、基于 GaAs 基的 InAlAs/InGaAs 膜型高迁移率晶体管的二维电子气^[4], 但是对于 InAlAs/InGaAs 高迁移率晶体管的电学性能的研究还需要深入. 传统的霍耳测量只能对单子带占据的情况给出精确的结果^[5]. 对于多子带占据的情况, 传统的霍耳测量只能给出载流子浓度和迁移率的平均值, 因此不能知道单个子带载流子的信息. 然而, 对于 Si 高 δ 掺杂的量子阱样品, 电子占据了多个子带. 在电路器件设计中, 为了优化器件的性能, 必须优化器件的结构, 因此精确了解二维电子气的输运行为是

极为重要的.

在用磁输运测量表征半导体载流子的输运性能中, Shubnikov-de Haas (SdH)^[6] 振荡测量是一种有效的方法. SdH 振荡能给出各个子带二维电子气的精确信息^[7]. 本文在磁感应强度 0—10 T、温度 1.5—60 K 的条件下, 测量了 Si 高 δ 掺杂的 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 单量子阱. 通过对实验数据的快速傅里叶变换 (FFT) 分析, 得出了各个子带电子的浓度. 在低磁场下用迁移率谱 (MS)^[5] 和多载流子拟合 (MCF) 相结合的方法得出了二维电子气的浓度和迁移率随温度的变化关系. FFT 和 MS + MCF 方法给出的子带电子浓度能很好符合.

2. 样品结构和实验

$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 量子阱的结构设计如图 1 所示. 样品是在中国科学院半导体研究所 GEN II 型分子束外延系统上生长的, 以半绝缘 InP 为衬

* 国家重点基础研究发展规划 (批准号: 2001CB309506-2) 资助的课题.

† E-mail: zhouwz@mail.sitp.ac.cn

底,首先生长 327 nm 的 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 缓冲层,接着是宽度为 20 nm 的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 量子阱,然后是 6 nm 的 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 隔离层和单边掺杂浓度为 $(2.5\text{--}3.0)\times 10^{12}\text{ cm}^{-2}$ 的 Si δ 掺杂层,最后是 30 nm 的 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 势垒层和 20 nm 的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 覆盖层. 整个样品生长过程由高能电子衍射监测.

样品被切割成 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的正方形,在磁感应强度 $B = 0\text{--}10\text{ T}$ 的范围内,采用范德堡法测量样品在不同温度 $T(1.5\text{--}60\text{ K})$ 下的纵向电阻和霍尔电阻.

$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 覆盖层	20 nm
$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	30 nm
Si δ 掺杂(约 $(2.5\text{--}3.0)\times 10^{12}/\text{cm}^2$)	
$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	6 nm
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	20 nm
$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	327 nm
半绝缘 InP 衬底	

图 1 Si δ 掺杂 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 量子阱样品结构示意图

3. 结果及讨论

图 2 是在温度为 1.5 K 下,样品的纵向电阻 R_{xx} 和霍尔电阻 R_{xy} 随磁场的变化. 纵向电阻出现 SdH 振荡,霍尔电阻出现明显的霍尔平台. 由霍尔电阻求得

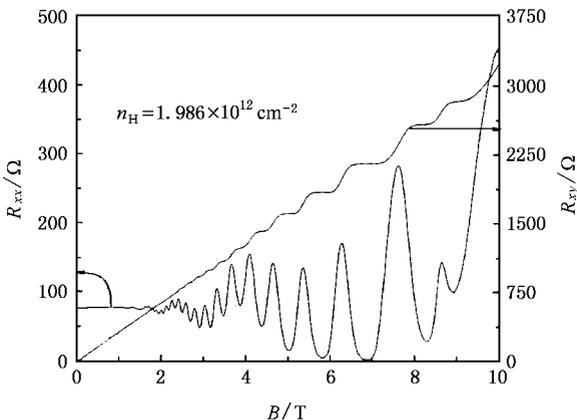


图 2 1.5 K 下样品纵向电阻的 SdH 振荡和霍尔电阻平台

样品中电子的霍尔浓度为 $n_H = 1.986 \times 10^{12}\text{ cm}^{-2}$.

图 3 是在不同温度下,样品纵向电阻的 SdH 振荡. 随着温度的升高, SdH 振荡振幅逐渐减小. 60 K 时, SdH 振荡已经很弱.

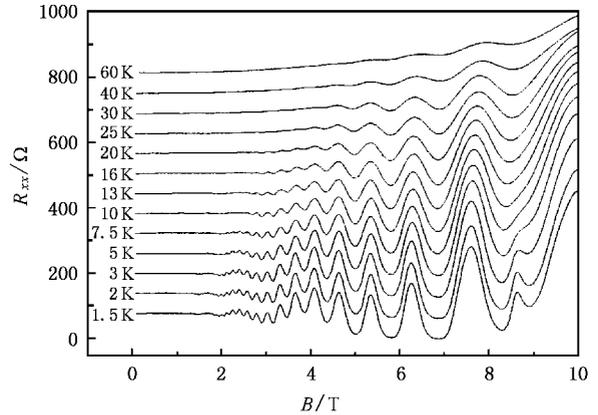


图 3 样品纵向电阻在不同温度下的 SdH 振荡, 曲线在垂直方向进行了平移

样品纵向电阻发生 SdH 振荡时,考虑自旋分裂和能带的非抛物性^[8,9],磁电阻随磁感应强度的变化为

$$\frac{\Delta\rho_{xx}}{\rho_0} = \sum_0^{\infty} \left(\frac{5}{2}\right) \left(\frac{Rf}{2B}\right)^{1/2} \frac{\beta T m' \cos(R\pi\nu)}{\sin(\beta T m' / B)} \times e^{-R\beta T_D m' / B} \cos 2\pi(R/fB - 1/8 - R\gamma), \quad (1)$$

式中 ρ_0 是零磁场下的电阻率, R 是傅里叶求和项的系数, $m' = m^*/m_0$ 是有效质量和自由电子质量之比, $\beta = 2\pi^2 k_B / h e = 14.70\text{ K} (T/K)$ 是个常数, T_D 是 Dingle 温度,含 T_D 的项则计入了能带的碰撞增宽效应, f 是 SdH 振荡的频率, γ 是 Onsager 相位因子, ν 是一个与有效 g 因子 g^* 有关的量, $\nu = m' g^* / 2$. SdH 振荡受温度的影响主要表现在因子 $A = x / \sinh x$ 中 ($x = 2\pi^2 k_B T / h\omega$),该因子随温度的增高而衰减. 可见在温度很高时,纵向电阻振荡将消失.

图 4 是样品纵向电阻率在不同温度下的 FFT 谱,电子占据了两个子带,其中位于 6.15 和 34.906 T 的两个峰对应这两个不同的子带. 位于 41.665 T 的峰是这两个子带的和频,而位于 69.71 T 的峰是第一子带(34.906 T)的倍频. 位于 28.85 T 的峰随温度的升高始终不消失,这是磁致子带间散射造成的两个子带间散射峰^[10].

对于磁致子带间散射模型,有^[11,12]

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

式中, $E_1(\tau_1)$ 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 是费米能级, 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. $A = x/\sinh x$ 就是 SdH 振荡的温度阻尼项, 而 $\exp\left[-\frac{\pi}{\omega_c}\left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}\right)\right]$ 为磁致子带间散射引起的磁电阻振荡阻尼项, 它只与磁场有关, 与温度无关.

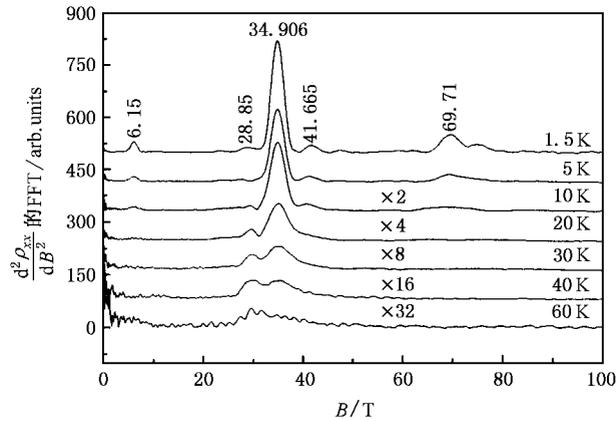


图 4 样品纵向电阻率在不同温度下的 FFT 谱. 曲线在垂直方向进行了平移, 10—60 K 的曲线进行了不同倍数的放大.

每一子带的电子浓度与 SdH 振荡频率 f 的关系为^[13]

$$n = 2ef/h, \quad (3)$$

式中, n 为电子浓度, e 为电子电量, h 为普朗克常数. 频率 $f = 1/\Delta\left(\frac{1}{B}\right)$ 即图 4 的横坐标. 由此计算的两个峰电子浓度分别为 1.688×10^{12} 、 $2.976 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, 两者之和与电子的霍尔浓度 ($n_H = 1.986 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) 完全一致. 除了磁致子带间散射峰以外, 由于 SdH 振荡随着温度的升高逐渐衰减, 所以 FFT 谱的峰随着温度的升高逐渐消失.

对 SdH 振荡进行滤波, 可以得到样品各个子带的振荡 (图 5).

对每一子带, 有

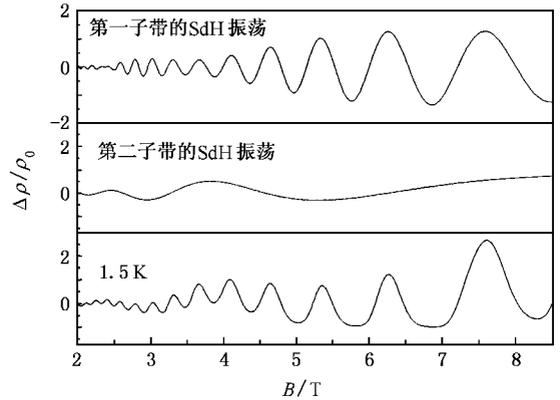


图 5 1.5 K 时, 样品 SdH 振荡通过滤波得到的第一、第二子带的振荡.

$$\ln \frac{A}{T} = C - \frac{2\pi^2 k_B m^*}{ehB} T, \quad (4)$$

式中, $A = x/\sinh x$ 即每一子带 SdH 振荡在某一磁感应强度 B 下的振幅, m^* 是该子带电子的有效质量,

$$c = \ln \frac{4\pi^2 k_B m^*}{ehB}.$$

在不同的温度点对 SdH 振荡进行滤波后, 可以得到每个子带在某一磁感应强度 B 下的 $\ln \frac{A}{T}-T$ 关系图.

图 6 是第一子带的 $\ln \frac{A}{T}-T$ 关系, 由此得到第一子带电子的有效质量 $m_1^* = 0.052m_0$. 对第二子带做相同的处理, 得 $m_2^* = 0.049m_0$. 对于非简并半导体, 在温度范围为 1.4—50 K 的低温, 有

$$E_F - E_i = \frac{\pi \hbar^2 n_i}{m^*}, \quad (5)$$

式中, E_F 为费米能级, E_i, n_i 分别为第 i 子带的能量和电子浓度. 由此得到 $E_F - E_1 = 77.6 \text{ meV}$, $E_F - E_2 = 14.5 \text{ meV}$. 第一、第二子带能级间隔为 $E_2 - E_1 = 63.1 \text{ meV}$.

低磁感应强度 ($B < 1.5 \text{ T}$) 下没出现量子效应, 在这个范围内对样品进行迁移率谱分析 (图 7), 清楚地表明有两种电子参与导电, 这进一步说明电子确实占据两个子带. 迁移率谱得到的只是载流子浓

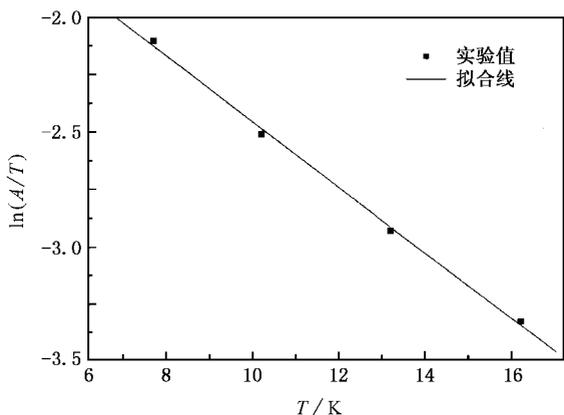


图 6 第一子带 SdH 振荡振幅随温度的变化(振幅所对应的磁感应强度 $B = 5.34 \text{ T}$)

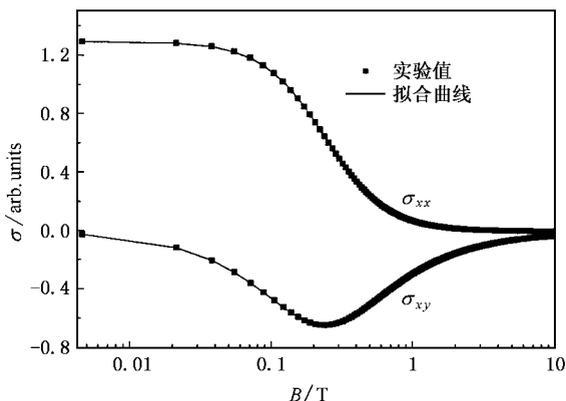


图 8 1.5 K 时样品电导的实验值和拟合曲线

度 n 和迁移率 μ 的近似值, 以此值为初值对该温度下的电导 σ 进行拟合, 可以求得载流子浓度 n 和迁移率 μ 的确定值. 图 8 是 1.5 K 时样品电导 σ 的实验值和拟合曲线. 1.5 K 时第一子带电子的浓度和迁移率分别为 $1.65 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 和 $3.93 \times 10^4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, 第二子带电子的浓度和迁移率分别为 $2.89 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 和 $5.45 \times 10^4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$. 这与用 FFT 求得的第一、第二子带电子浓度 $1.688 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 、 $2.976 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 很好相符.

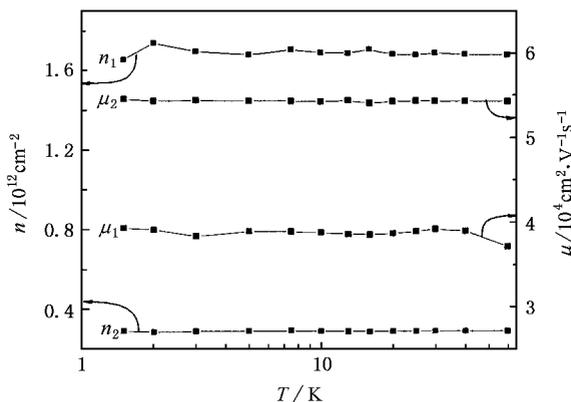


图 9 样品载流子浓度和迁移率随温度的变化

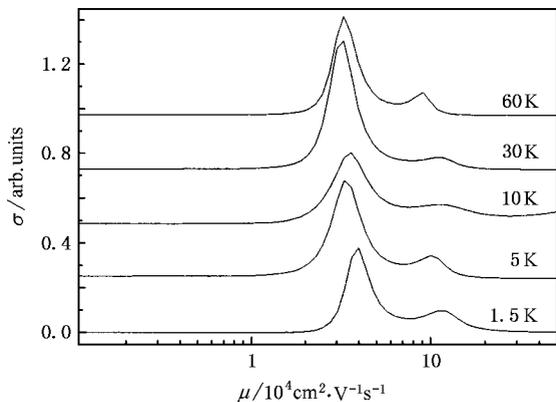


图 7 低场下 ($B < 1.5 \text{ T}$) 样品的电导迁移率谱

图 9 是通过对各个温度进行拟合得到的样品载流子浓度和迁移率随温度变化的关系, 电子浓度和迁移率几乎不随温度变化. 电子浓度不随温度变化正反映了二维电子气的性质. 在 $T < 100 \text{ K}$ 下, 二维电子气主要受无序合金散射势的影响, 所以电子迁移率也几乎不发生变化^[14,15].

电子总浓度为 $1.986 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 小于样品的掺

杂浓度(约 $(2.5-3.0) \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$), 这可能是因为掺杂电子没有完全进入量子阱.

4. 结 论

Si 高 δ 掺杂的 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 单量子阱在 1.5—60 K 范围内, 磁电阻发生了 SdH 振荡. FFT 分析表明, 电子占据了两个子带, 两个子带之间发生了磁致子带间散射. 通过对 SdH 振荡进行滤波, 求得第一、第二子带电子的有效质量分别为 $m_1^* = 0.052m_0$, $m_2^* = 0.049m_0$, 两个子带能级与费米能级的距离分别为 $E_F - E_1 = 77.6 \text{ meV}$, $E_F - E_2 = 14.5 \text{ meV}$. 低磁感应强度 ($B < 1.5 \text{ T}$) 下的 MS + MCF 方法求得的两子带电子浓度与 FFT 分析的结果一致. 载流子浓度和迁移率在 1.5—60 K 范围内几乎不随温度变化, 此时的二维电子气主要受无序合金散射势的影响.

- [1] Ng G I , Pavlidis D , Quillec M *et al* 1988 *Appl. Phys. Lett.* **52** 728
- [2] Chao P C , Tessmer A J , Duh K H G *et al* 1990 *IEEE Electron. Dev. Lett.* **11** 59
- [3] Mishra U K , Brown A S , Rosenbaum S E *et al* 1988 *IEEE Electron. Dev. Lett.* **9** 647
- [4] Bollaert S , Cordier Y , Hoel V *et al* 1999 *IEEE Electron. Dev. Lett.* **20** 123
- [5] Beck W A , Anderson J R 1987 *J. Appl. Phys.* **62** 541
- [6] Shubnikov L de Haas W J 1930 *Leiden Commun. A* **207** 3
- [7] Yao W , Qiu Z J , Gui Y S *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2247 (in Chinese) [姚 炜、仇志军、桂永胜等 2005 物理学报 **54** 2247]
- [8] Adams E N , Holstein T D 1959 *J. Phys. Chem. Solids* **10** 254
- [9] Roth L M , Argyres P N 1966 *Semiconductors and Semimetals* (Vol. 1) (New York : Academic) p159
- [10] Leadly D R , Nicholas R J , Harris J J *et al* 1989 *Semicond. Sci. Technol.* **4** 885
- [11] Sander T H , Holmes S N , Harris J J *et al* 1998 *Phys. Rev. B* **58** 13856
- [12] Raikh M E , Shahbazyan T V 1994 *Phys. Rev. B* **49** 5531
- [13] Das B , Miller D C , Datta S *et al* 1989 *Phys. Rev. B* **39** 1411
- [14] Basu P , Nag B 1983 *Appl. Phys. Lett.* **43** 689
- [15] Bastard G 1983 *Appl. Phys. Lett.* **43** 591

Magneto-transport characteristics of two-dimensional electron gas for Si δ -doped InAlAs/InGaAs single quantum well^{*}

Zhou Wen-Zheng^{1,2,†} Yao Wei¹⁾ Zhu Bo¹⁾ Qiu Zhi-Jun¹⁾ Guo Shao-Ling¹⁾
Lin Tie¹⁾ Cui Li-Jie³⁾ Gui Yong-Sheng¹⁾ Chu Jun-Hao¹⁾

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

2) *College of Physics Science and Engineering Technology , Guangxi University , Nanning 530004 , China)*

3) *Institute of Semiconductors , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100083 , China)*

(Received 5 July 2005 ; revised manuscript received 19 October 2005)

Abstract

Magneto-transport measurements have been carried out on a Si heavily δ -doped $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ single quantum well in the temperature range between 1.5 and 60 K under magnetic field up to 10 T. We studied the Shubnikov-de Haas (SdH) effect and the Hall effect for the $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ single quantum well occupied by two subbands, and have obtained the electron concentration, mobility, effective mass and energy levels respectively. The electron concentrations of the two subbands derived from mobility spectrum combined with multi-carrier fitting analysis are well consistent with the result from the SdH oscillation. From fast Fourier transform analysis for $d^2\rho/dB^2 - 1/B$, it is observed that there is a frequency of $f_1 - f_2$ insensitive to the temperature, besides the frequencies f_1, f_2 for the two subbands and the frequency doubling $2f_1$, both dependent on the temperature. This is because that the electrons occupying the two different subbands almost have the same effective mass in the quantum well and the magneto-intersubband scattering between the two subbands is strong.

Keywords: InAlAs/InGaAs single quantum well, SdH oscillation, two-dimensional electron gas, magneto-intersubband scattering

PACC: 7360L, 7340H, 7200, 7280E

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

[†] E-mail : zhouwz@mail. sip. ac. cn