

赝形 $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ 渐变异质结中的 零磁场自旋分裂

桂永胜 郑国珍 郭少令 褚君浩 汤定元

(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)

陈建新 李爱珍

(中国科学院上海冶金研究所功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

(1998 年 6 月 22 日收到)

在赝形渐变 $\text{InGaAs}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 异质结的二维电子气中, 发现了自旋方向向上的电子
和自旋向下的电子在零磁场下存在着自旋分裂. 利用 Shubnikov-de Haas 振荡研究了异质结
中的自旋分裂行为, 通过振荡中的拍频现象, 发现了零磁场下的自旋分裂量为 8.76 meV .

PACC: 7170; 7215G; 7155E

1 引 言

长期以来, 微电子学主要是以研究、控制和应用半导体中载流子的输运特性为内容,
在这里载流子的输运过程仅利用它的荷电性由电场来控制, 载流子的自旋状态是不予考
虑的, 实际上, 利用载流子的自旋性同样也能操纵它的输运过程^[1-3]. 自旋极化场效应管
正是基于这一思想由 Datta 等人提出的一种器件模型, 它与器件中二维电子气的零磁
场自旋分裂密切相关^[4,5], 有关研究表明, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 异质结构有可
能用来制备这种器件.

本文将主要研究赝形 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 异质结中二维电子气的零磁场自旋
分裂与晶格匹配的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 异质结构相比, 赝形 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/$
 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 异质结通过增加 InGaAs 沟道中 In 的组份, 引入晶格应变, 并增加了限制效
应, 从而在沟道中获得了极高的电子浓度和较高的迁移率^[6,7]. 虽然光学测量是可以用来
研究电子的零磁场自旋分裂^[8,9], 但是最直接和有效的办法就是利用 Shubnikov-de Haas
(SdH) 振荡效应来研究这种现象. 由于自旋方向不同的电子, 具有相同的振幅和相近的周
期, 在 SdH 振荡中会出现拍频现象, 利用这些拍频的结点, 就可以获得零磁场下电子的自
旋分裂量.

2 实 验

实验所采用的样品为气态源 MBE 生长的赝形 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 异质结, 其

衬底为 Fe 掺杂的半绝缘 InP. 样品的具体结构为: 50 nm 未掺杂的 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 缓冲层, 然后是 20 nm 未掺杂的 $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 层和 6 nm 未掺杂的 $\text{In}_{0.80}\text{Ga}_{0.20}\text{As}$ 沟道, 接着是 6 nm 未掺杂的 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 隔离层, Si δ -掺杂 ($N_d = 5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$) $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 层, 20 nm 未掺杂的 $\text{In}_{0.40}\text{Al}_{0.60}\text{As}$ 层, 最后是一层 13 nm 的 Si 掺杂 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 层, 用于制备欧姆电极. 在 4.2—40 K 温度范围内, 对样品进行了 SdH 测量. 77 K 时, 常规的霍尔测量获得的载流子浓度为 $3.0 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$.

3 结果与讨论

为了确定上述赝形体系中的二维子能带结构, 我们根据文献[10], 获得了各层中的相对介电常数、导带失配、禁带宽度以及电子有效质量样品等结构参数. 联立求解 Schrödinger 方程和 Poisson 方程, 自洽计算可获得 4.2 K 时样品的能带形状、载流子浓度分布以及二维子能带位置和电子波函数. 图 1 给出了有关计算结果. 从图中可以看出, 在样品 $\text{In}_{0.80}\text{Ga}_{0.20}\text{As}$ 沟道中, 只存在基态电子(能级位于费米能级以下 146 meV 处), 其波函数基本被限制在沟道中; 同时, 第一激发态的能级位于费米能级以下 20 meV 处, 已高

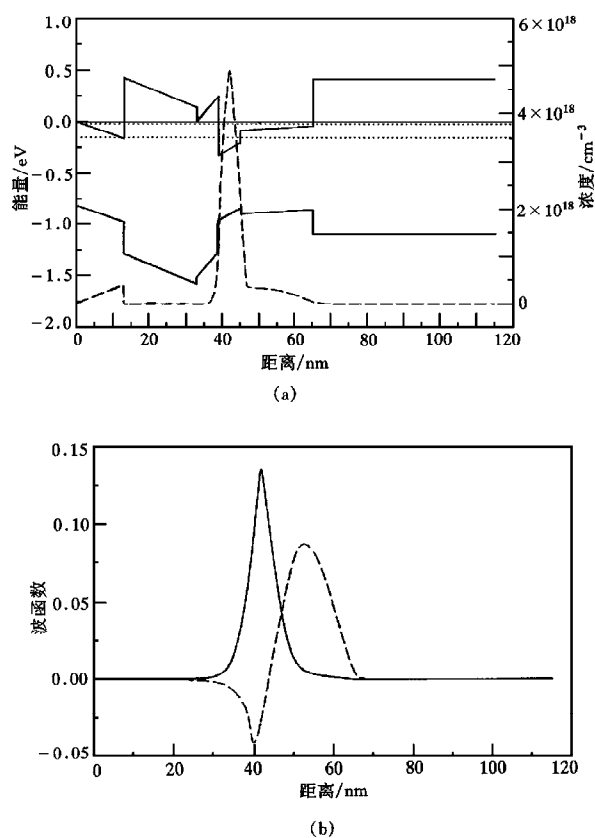


图 1 (a) 样品能带形状、二维子能带结构、费米能级位置、电子气浓度空间分布;
(b) 基态(实线)以及第一激发态(虚线)子带电子的波函数

出 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 的导带底, 其波函数主要分布在 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 浅势阱中.

在低温下, 简并的半导体中, 随着磁场强度的增加, 分裂的朗道能级相继穿过费米能级, 引起了样品电阻的突变, 就形成了 SdH 振荡. 考虑自旋分裂及能带的非抛物性, 如果认为费米能级 E_F 不随磁场强度而变化, 并且忽略朗道能级上的散射, 纵向磁阻随磁场强度的变化 $\Delta\rho$ 满足下式^[11-13]:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \sum_{R=1}^{\infty} \left(\frac{RP}{2B} \right)^{1/2} \frac{\beta T m' \cos(R\pi \nu)}{\sinh(R\beta T m' / B)} e^{-R\beta T m' / B} \cos 2\pi(R/PB - 1/8 - R\gamma), \quad (1)$$

式中 ρ_0 为零磁场下的电阻率, R 为傅里叶的求和系数, B 是 z 方向磁场强度, T 是样品温度, $m' = m^* / m_0$ 是载流子有效质量与自由电子的质量之比, $\beta = 2\pi^2 k_B m_0 / \hbar e = 14.707$ (T/K), P 是 SdH 振荡的周期, T_D 是 Dingle 温度, $\nu = \delta / \hbar \omega_c$ 是一个与自旋分裂 δ 和回旋频率 ω_c 有关的量.

图 2 为样品 1.6 K 时的电阻率随磁场强度的变化, 图中出现了明显的拍频现象, 箭头

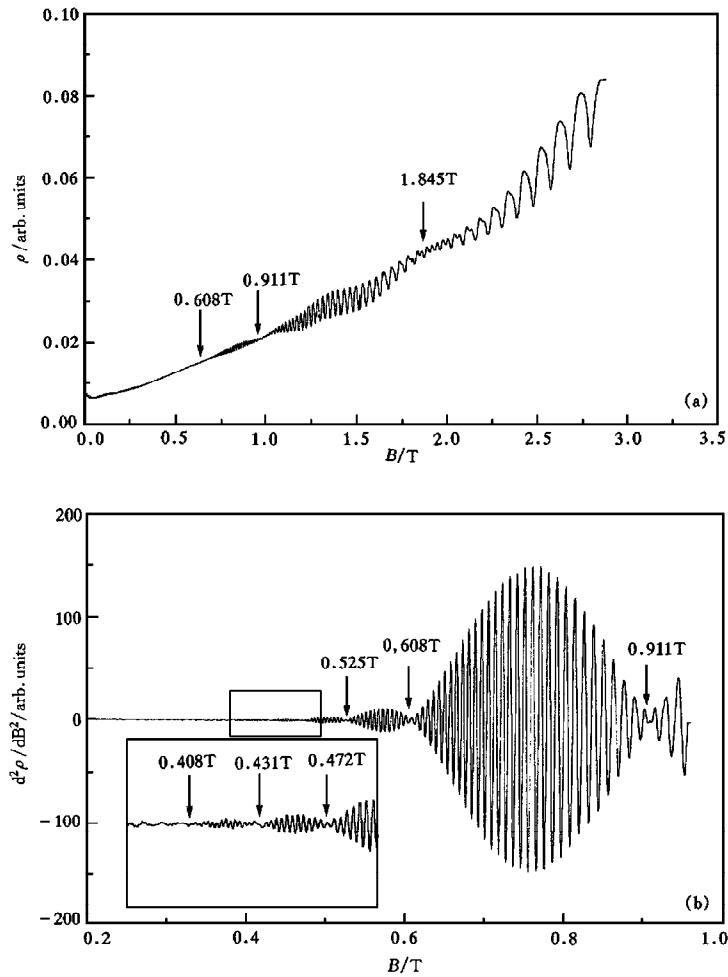


图 2 1.6 K 时, 样品电阻率随磁场强度的变化, 箭头所指的位置为拍频的结点

所指的位置为拍频的结点.造成拍频现象的原因是 SdH 振荡中有振幅相同而频率相近的两组振荡,这两组振荡有两种可能的来源,① 势阱中两个不同的能级上的电子,它们的浓度 n_1 和 n_2 与 SdH 振荡周期的关系为

$$n_{1(2)} = 2 \frac{e}{h} P_{1(2)}. \quad (2)$$

② 同一能级自旋方向不同的电子,它们的浓度 $n_{\uparrow}$ 和 $n_{\downarrow}$ 与 SdH 振荡周期的关系为

$$n_{\uparrow(\downarrow)} = \frac{e}{h} P_{\uparrow(\downarrow)}. \quad (3)$$

图 3 为 SdH 振荡的傅里叶变换谱,谱中有两个靠得非常近的峰,它们对应着 SdH 振荡中的基频,对应的电子的浓度分别为 $1.54 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 和 $1.59 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$.对照霍尔测量获得的浓度,我们排除了第一种可能性,因此, SdH 振荡中的拍频现象是由自旋方向不同的电子引起的,对应样品中第一激发态电子的峰在傅里叶变换谱中并不明显,一种可能就是温度的展宽以及基态振荡掩盖了它的影响.

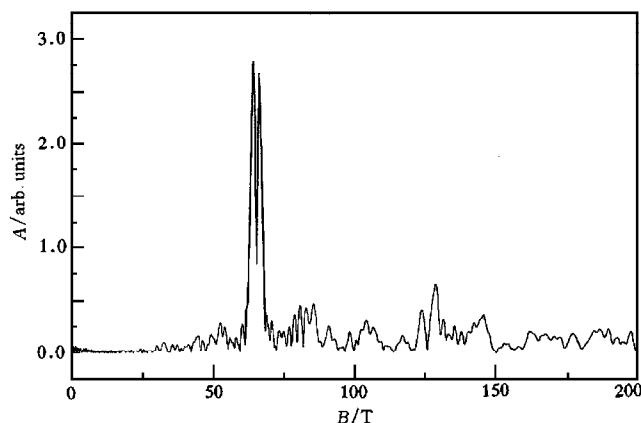


图 3 SdH 振荡的傅里叶变换谱

利用(1)式从 SdH 振荡中可以估计二维电子气中的自旋分裂,由自旋分裂引起两套振幅相同而频率相近的振荡将对 SdH 振荡的振幅进行调制

$$A \sim \cos(\pi \nu). \quad (4)$$

当 ν 为半整数时, $A \rightarrow 0$,也就是说在 SdH 振荡中形成了结点.一般认为二维电子气中总的自旋分裂 δ 满足^[1]

$$\delta = \delta_0 + \delta_1 \hbar \omega_c + \delta_2 (\hbar \omega_c)^2 + \dots, \quad (5)$$

上式中 δ_0 为零磁场下的自旋分裂, δ_1 为线性分裂量,当磁场强度很大时,二次项及其他高次项的影响很大,而在低场下,只要考虑(5)式中的右边的前两项就可以.如果 $\delta_0 = 0$,则 $A \sim \cos \pi \delta_1$,由于 $\cos \pi \delta_1$ 只是一个与磁场强度 B 无关的常数,此时不可能发生拍频现象;当 $\delta_0 \neq 0$ 时,随着磁场强度 B 的增强, ν 减小,就引起了振幅 A 的振荡,最后一个结点发生在 $|\nu| = 0.5$,因此,我们就可以根据(5)式计算结点发生时,总的自旋分裂量 δ .

图 4 为总的自旋分裂量 δ 与 $\hbar \omega_c$ 的关系,在低场范围 ($< 1 \text{T}$) 进行线性拟合,我们获

得了 $\delta_0=8.76\text{ meV}$, 在这里电子的有效质量取为 $0.060\text{ }m_0$, 由 SdH 振荡的振幅随温度的变化获得.

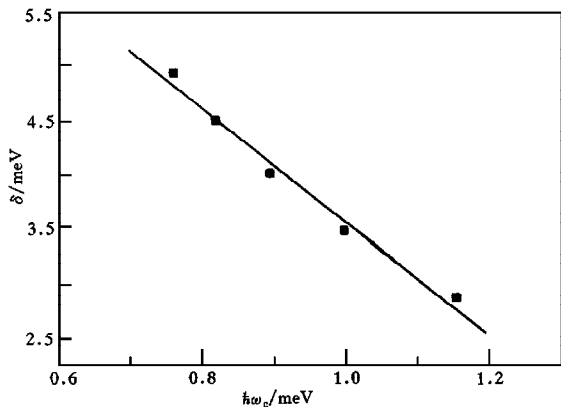


图 4 总的自旋分裂量随 $\hbar\omega_c$ 的变化, 在低场 ($<1\text{T}$) 条件下, 利用线性回归可以外推零磁场下的自旋分裂

4 结 论

在膜形渐变的 InGaAs/In_{0.52}Al_{0.48}As 异质结中, 自旋向上的电子和自旋向下的电子存在零磁场自旋分裂. 我们发现 SdH 振荡中由于存在着两组振幅相同、频率相近的振荡, 形成了拍频现象, 利用拍频的结点, 获得了异质结中零磁场下的自旋分裂量, 这对于今后研制自旋极化场效应管有着积极意义.

[1] Cai Jian-wang, Zhao Jian-gao, Zhan Wen-shan, Shen Bao-gen, *Progress in Physics*, **17**(1997), 119 (in Chinese).
[2] M. Johnson, *Science*, **260**(1993), 320.
[3] S. Datta and B. Das, *Appl. Phys. Lett.*, **56**(1990), 665.
[4] B. Das, D. C. Miler, S. Datta, R. Feifenberger, *Phys. Rev.*, **B39**(1989), 1411.
[5] J. Nitta, T. Akazaki, H. Takayanagi, *Phys. Rev. Lett.*, **78**(1997), 1335.
[6] C. Peng, S. Sinha, H. Morkoc, *J. Appl. Phys.*, **62**(1987), 2880.
[7] W. P. Hong, G. I. Ng, P. K. Bhattacharya, D. Pavlidis, S. Willing, B. Das, *J. Appl. Phys.*, **64**(1988), 1945.
[8] B. Jusserand, D. Richards, H. Peric, Etienne, *Phys. Rew. Lett.*, **69**(1992), 848.
[9] Y. F. Chen, J. L. Shen, T. D. Dai, F. F. Fang, *Phys. Rev.*, **B52**(1995), 4692.
[10] G. I. Ng, D. Pavlidis, M Jaffe, J. Singh, H. F. Chu, *IEEE Tans-Electron Devices*, **36**(1989), 2249.
[11] E. N. Adams, and T. D. Holstein, *J. Phys. Chem. Solids*, **10**(1959), 254.
[12] L. M. Roth and P. N. Argyres, *Semiconductors and Semimetals*, vol. 1 Edited by R. K. Willardson and A. C. Beer, (New York: Academic), 1966, p. 159.
[13] R. J. Justice, *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A6**(1988), 2779.

SPIN SPLITTING IN PSEUDOMORPHIC InGaAs/InAlAs GRADED HETEROSTRUCTURES AS $B \rightarrow 0$

GUI YONG-SHENG ZHENG GUO-ZHEN GUO SHAO-LING CHU JUN-HAO TANG DING-YUAN

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

CHEN JIAN-XIN LI AI-ZHENG

(*National Laboratory of Functional Materials for Informatics,
Shanghai Institute of Metallurgy, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050*)

(Received 22 June 1998)

ABSTRACT

The spin splitting in zero magnetic field between the up- and down-spin electrons in a two-dimensional electron gas is obtained for a pseudomorphic InGaAs/In_{0.52}Al_{0.48}As graded heterostructure. We have studied the spin splitting in the heterostructure by means of the Shubnikov-de Haas oscillations. By analyzing the characteristic beating pattern of the oscillations, a spin splitting of 8.76 meV was determined as $B \rightarrow 0$.

PACC: 7170; 7215G; 7155E