

研究简报

# Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As-InP 异质结界面二维电子气

郑有炓 黄善祥

(南京大学物理系)(南京固体器件研究所)

Y. H. Chang, J. P. Cheng, and B. D. McCombe

(Department of Physics, State University of New York at Buffalo)

1986年10月20日收到

本文报道了氯化物汽相外延生长 Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As-InP 异质结输运性质研究结果。4.2K 下 Shubnikov-de Haas 测量, Van de Pauw Hall 测量和迴旋共振测量表明这种异质结界面存在高电子迁移率二维电子气。二维电子气浓度为  $1.7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ , 电子迁移率为  $3.3 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。并观察到迴旋共振, 给出电子有效质量为  $m_e^* = 0.046 m_e$ 。

## 一、引言

Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As 是一种直接带隙的合金半导体材料, 室温带隙为 0.75eV, 是目前用于长波光通信器件的重要材料。由于 Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As 在室温下具有高的电子迁移率和高的漂移速度。又是发展高速场效应器件有希望的材料。最近, 人们对 Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As-InP 异质结界面和超晶格量子阱输运性质的研究引起了很大兴趣<sup>[1-4]</sup>, 在选择掺杂的 Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As-InP 异质结界面观察到高电子迁移率二维电子气。因此, 像选择掺杂的 GaAs-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 异质结一样, Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As-InP 异质结又有可能用于发展高电子迁移率器件(如 HEMT), 而深受人们的重视。

本文报道在 AsCl<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>/Ga/In 体系中, 采用 Ga/In 合金源法的氯化物汽相外延生长技术在掺 Fe 的 InP 衬底上生长的 Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As-InP 异质结界面二维电子气性质的研究结果。

## 二、样品制备

研究用的样品是掺 Fe 的 InP(100) 单晶衬底, 在 AsCl<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>/Ga/In 体系中, 采用 Ga/In 合金源法新技术<sup>[5]</sup>氯化物汽相外延生长 Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As 外延层形成的 Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As-InP 异质结。

掺 Fe 的 InP 衬底为弱N型, 其室温下的材料参数为: 电子浓度为  $1.65 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 电阻率为  $2.59 \times 10^7 \Omega\cdot\text{cm}$ , 迁移率为  $1.46 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。Fe 作为补偿杂质在 InP 中起电子陷阱作用。未掺 Fe 的 InP 单晶为N型, 电子浓度一般在  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ — $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  之间。

氯化物汽相外延生长的 GaInAs 外延层组份为  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ , 厚度为  $4.0\text{--}4.3\mu\text{m}$  范围。 $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  外延层为 N型, 室温电子浓度为  $N_d = N_s = 1.2 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 。

外延生长  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  前, 对掺 Fe 的 InP 单晶衬底表面进行 HCl 高温汽相腐蚀。在 HCl 腐蚀过程中, InP 衬底表面上包括由表面层外扩出来的 Fe 与 HCl 反应生成的  $\text{FeCl}_3$  而被气流带走。因此, 经 HCl 腐蚀后, 不仅可获得一光亮的生长表面, 而且在

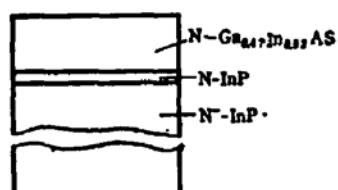


图 1

掺 Fe 的 InP 衬底表面形成一层 N型 InP 过渡层, 尔后就在这个 N型 InP 过渡层表面外延生长  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  层。这样, 用高阻掺 Fe 的 InP 衬底, 经过 HCl 汽相腐蚀和氯化物汽相外延生长, 就可以在 Fe-InP 衬底上获得 N型 InP- $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  异质结构。实验用滚球染色分析技术分析了样品的剖面结构, 先用 2% 高碘酸显示出  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  层, 然后用铁氰化钾溶液显示 InP 层, 可以清楚地观察到

在  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  外延层与掺 Fe 的 InP 衬底之间存在一层 N型 InP 过渡层, 如图 1 所示。N型 InP 过渡层宽度为  $2200\text{--}3000\text{\AA}$  之间。根据样品电学测量需要, 在  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  外延层表面, 用合金法做上四个欧姆接触电极。

### 三、结果与讨论

#### 1. Shubnikov-de Haas 测量

对  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ -InP 异质结样品进行 4.2K 下的 Shubnikov-de Haas 振荡测量。测量

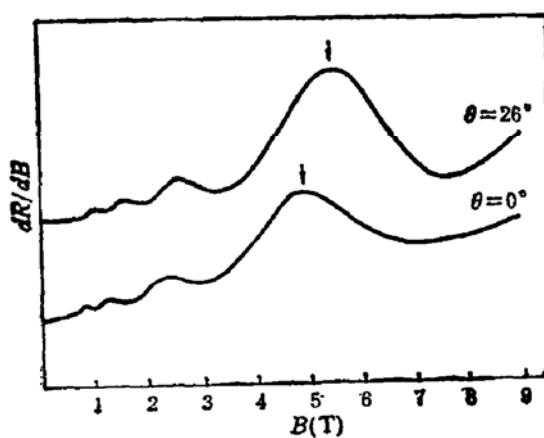


图 2

用的扫描磁场为从 0 到 9T, 连续可变的超导线圈磁场, 用磁场调幅/相敏检测技术测量样品磁阻微分讯号  $\frac{dR}{dB}$  随磁场强度 B 的变化。

当磁场垂直于异质结界面时, 观察到明显的 Shubnikov-de Haas 振荡, 如图 2 中的  $\theta = 0^\circ$  曲线。为弄清楚产生 Shubnikov-de Haas 振荡 (S-dH 振荡) 的电子气性质, 倾斜样品的方向, 使磁场偏离样品法线方向  $26^\circ$ , 这时仍然观察到明显的 S-dH 振荡, 如图

2 中  $\theta = 26^\circ$  曲线。与  $\theta = 0^\circ$  情况相比较，可以看到 S-dH 振荡峰点位置朝高磁场方向移动，并符合  $B \cos \theta$  关系。这种振荡依赖于磁场方向的特征表明所观察到的 S-dH 振荡是由于  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As-InP}$  异质结界面存在二维电子气所引起的。

$\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As-InP}$  异质结界面二维电子气浓度可由 S-dH 振荡周期。利用关系式<sup>[6]</sup>求得

$$N_i = \frac{e}{\pi \hbar P_i \left( \frac{1}{B} \right)}. \quad (1)$$

式中  $N_i$  为单位面积二维电子气浓度，

$$P_i \left( \frac{1}{B} \right) \text{ 为 S-dH 振荡周期. } (T^{-1})$$

由图 2 中  $\theta = 0^\circ$  的振荡曲线，可给出 S-dH 振荡的磁场倒数  $\frac{1}{B}$  值与振荡指数  $n$  的关系，如图 3 所示。由图 3 可求得振荡周期为  $P_i \left( \frac{1}{B} \right) = 0.29 T^{-1}$ 。

将所得到的振荡周期  $P_i \left( \frac{1}{B} \right)$  值代入关系式(1)，即可求得在 4.2K 下  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As-InP}$  异质结界面二维电子气密度为  $N_i = 1.7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 。

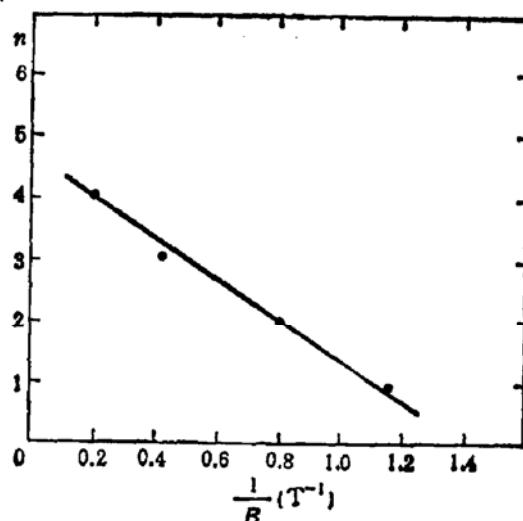


图 3

## 2. Van de Pauw Hall 测量

为进一步弄清上面 S-dH 振荡测量所观察到  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As-InP}$  异质结界面存在的二维电子气。又对样品进行了 Van de Pauw Hall 测量，给出了 4.2K 下的电子浓度和 300

表 1  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As-InP}$  异质结 Van de Pauw 测量结果

电子浓度 $n(\text{cm}^{-2})$ , 4.2K		电子迁移率 $\mu(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$		
Hall 测量	S-dH 测量	300K	77K	4.2K
$3.8 \times 10^{11}$	$1.7 \times 10^{11}$	$9.7 \times 10^3$	$3.7 \times 10^4$	$3.3 \times 10^4$

K, 77K, 4.2K 下的电子迁移率。见表 1。

以上测量结果进一步表明： $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ -InP 异质结界面存在高电子迁移率的二维电子气。在 4.2K 下二维电子气浓度为  $3.8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ , 迁移率为  $3.3 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。这里 Hall 测量给出的二维电子气浓度稍高于由 S-dH 测量给出的值。可能是 Van de Pauw 测量包括几乎所有的电子，而 S-dH 测量着重于那些高迁移率的电子。另外，也可能与  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  层低温下可能存在一些体电导的贡献有关。

### 3. 远红外磁谱测量

为测量  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ -InP 异质结界面二维电子气的电子有效质量，还对样品进行远红外磁谱测量。测量采用带有超导磁场系统和液氮冷却的光导探测器的远红外傅利叶变

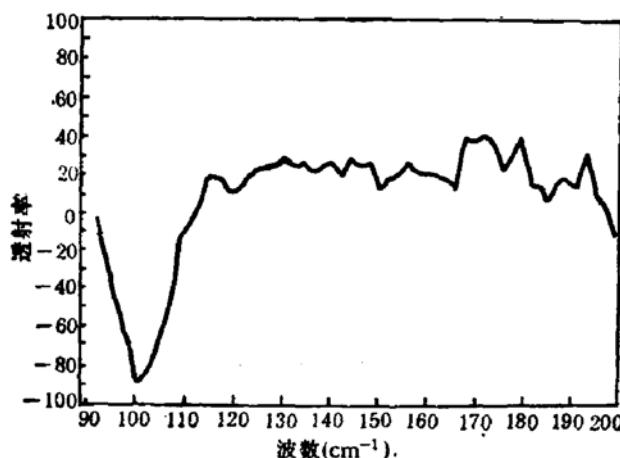


图 4

换透射光谱仪进行的。测量时样品保持在 4.2K。图 4 是磁场强度  $B = 5\text{T}$  时的测量结果。可以清楚看到在  $100\text{cm}^{-1}$  处存在一很强的迴旋共振吸收峰。由此求得对应的电子有效质量为  $m_e^* = 0.046m_0$ ,  $m_0$  为自由电子有效质量。还测量了磁场强度分别为 6T, 7T, 8T 和 9T 时的迴旋共振吸收谱。也都得到相同的  $m_e^*$  值 ( $0.046m_0$ )。这表明我们样品的电子有效质量为  $m_e^* = 0.046m_0$ 。这个值稍高于体  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  材料导带边缘的电子有效质量  $m_e^* = 0.041m_0$ <sup>[2]</sup>。两者间的差别是由于  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  体材料明显的非抛物线型导带所引起的。但我们所测得的  $m_e^*$  值与所报道<sup>[2]</sup>的 MOCVD 生长的  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ -InP 样品的  $m_e^*$  值 ( $0.047 \pm 0.001m_0$ ) 很相近。

以上测量结果表明：我们用 HCl 气相腐蚀氯化物气相外延生长的  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ -InP 异质结界面存在高电子迁移率二维电子气。这种异质结二维电子气的形成，可以认为与调制掺杂  $\text{GaAs}-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  异质结相类似。在  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ -InP 结构中， $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  是窄带隙材料。InP 是宽带隙材料，在 4.2K 时它们的带隙分别为 0.81eV 和 1.42eV<sup>[3]</sup>。由于 InP 的导带底比  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  的高，价带顶比  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  的低，因而 n 型 InP 中的电子将转移到  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  中。离化了的施主杂质却在 n 型 InP 中，在界面的  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  表面形成一电子势阱。如图 5 所示。实验上所观察到的二维电子气的就是局域在  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  表面势阱中的电子。这些电子由于薄势阱的量子尺寸效应，使之成为二个

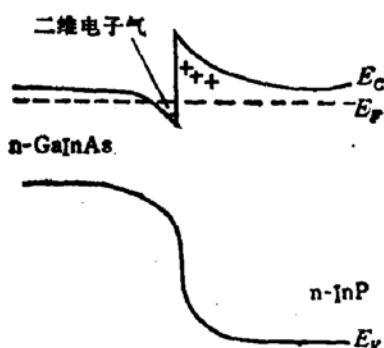


图 5

自由度的二维电子气。而且由于这些电子与它的母体杂质(离化了的施主杂质)实现空间上的分离。排除母体杂质对电子的散射。从而使这些电子具有高的迁移率。

### 参 考 文 献

- [1] J. Kimemo, M. Takikawa and M. Ozeki, *Electron. Lett.*, **19**, 473 (1983).
- [2] Y. Guldner, J. P. Vieren, P. Voisin and M. Vool *Appl. Phys. Lett.*, **40**, 877, (1982).
- [3] M. Razegni and J. P. Duchemin, *J. Crystal. Growth*, **70**, 145 (1984).
- [4] J. H. Marsh, J. S. Roberts and R. A. Clartton, *Appl. Phys. Lett.*, **46**, 1161 (1985).
- [5] 黄善祥, 固体电子学研究与进展, **6**, 150(1986).
- [6] D. C. Tsui, *Phys. Rev.*, **B8**, 2657 (1973).
- [7] R. J. Nicholas, S. J. Sessions and J. C. Portal, *Appl. Phys. Lett.*, **37**, 178 (1980).
- [8] R. E. Nahorg, M. A. Plack, W. D. Johnston and R. L. Barnes. *Appl. Phys. Lett.*, **33**, 659 (1978).

## Two-Dimensional Electron Gas at a $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ -InP Heterojunction Interface

Zheng Youdou

(Department of Physics, Nanjing University)

Huang Shanxiang

(Nanjing Solid State Devices Research Institute)

Y. H. Chang, J. P. Cheng and B. D. McCombe

(Department of Physics, State University of New York at Buffalo)

### Abstract

An electrical transport study of  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ -InP heterojunction grown by chloride vapor phase epitaxy is reported. Shubnikov-de Haas Oscillation, Van de Pauw Hall and cyclotron resonance measurements demonstrate that the existence of high-mobility, two-dimensional electron gas at the heterojunction interface at 4.2 K. Two-dimensional electron concentration is equal to  $1.7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ , and the electron mobility is equal to  $3.3 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ . The cyclotron resonance is observed, giving electron effective mass  $m_e^* = 0.046m_e$ .