

# 调制掺杂 GaAs/N-AlGaAs 异质结的 制备及输运性质

周均铭 黄 绮 孟庆惠 程文芹

吴永生 李永康 杨中兴

(中国科学院物理研究所)

1985 年 4 月 3 日收到

## 提 要

本文报道利用垂直束源式的分子束外延设备,生长了高质量的调制掺杂 GaAs/N-AlGaAs 异质结构,液氮温度下的二维电子迁移率达  $4.26 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  (非光照)、 $5.9 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  (光照)。用脉冲磁场下的磁声子共振测量,得到了二维电子的有效质量,并研究了异质结构中二维电子的低场迁移率增强特性及低温强磁场下的量子霍尔效应。

## 一、引 言

在半导体材料中,载流子往往是通过掺入的杂质离化来获得的,而载流子的寿命及散射率又受到电离杂质散射的限制。Dingle 等人<sup>[1]</sup>实现的调制掺杂技术就是设法使提供载流子的杂质与载流子在空间上分离,以减少其散射,使载流子寿命在低温下有极大增强,以提高低温迁移率。

广泛运用的调制掺杂材料是 GaAs/AlGaAs 异质结构。图 1 给出样品各层的参数。由于 GaAs 与 AlGaAs 禁带宽度不同,在界面处出现带边的不连续性。将 N 型杂质(如硅)

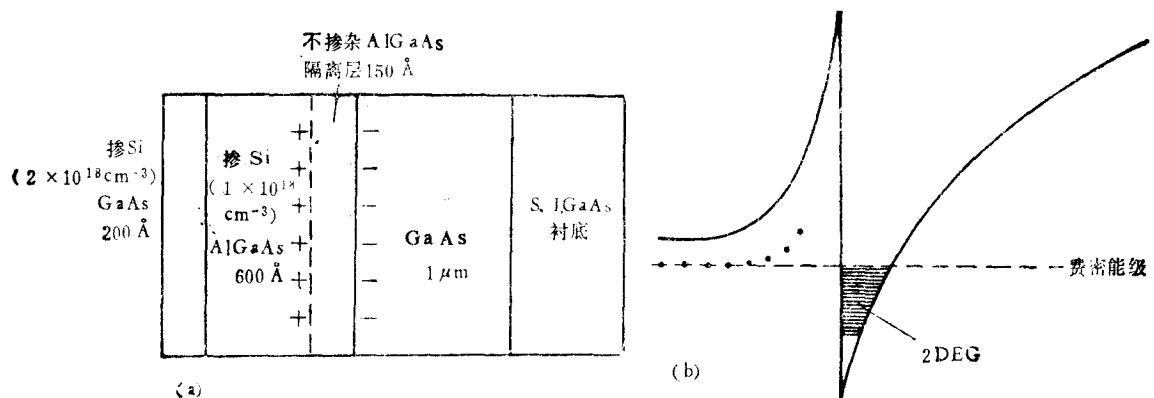


图 1 调制掺杂 GaAs/N-AlGaAs 结构与带边不连续性示意图

掺入宽禁带的 AlGaAs 中,由施主提供的电子将从 AlGaAs 向不掺杂的 GaAs 一侧转移,并被限制在界面处宽度约  $100 \text{ \AA}$  的近似三角势阱里,形成在准二维平面内自由运动的二维电子气.在无杂质存在条件下,理想低温迁移率极限为  $5 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ,实验上已获得大于  $1 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  (光照条件下)的结果,从而为低维凝聚态物理提供了一类理想的研究系统,在这个系统内发现了包括分数量子霍尔效应在内的一些新的物理现象<sup>[2]</sup>,同时也为研制新颖器件创造了条件<sup>[3]</sup>.

本文报道我们制备的调制掺杂 GaAs/N-AlGaAs 异质结构生长实验,通过脉冲强磁场下的磁声子共振测量,得到了二维电子的有效质量.此外还测量了低场迁移率的增强特性及低温强磁场下的量子霍尔效应.

## 二、样品制备

本工作所用的第一台国产分子束外延设备,束源是垂直配置的,细节见文献[4]的描述,不同之处是本实验中,在生长室内增设了大型液氮冷屏,以改善生长时的气氛,提高外延膜质量.所有的坩锅均采用热解氮化硼材料,尺寸为  $11 \times 11 \text{ (mm}^2)$  掺 Cr 半绝缘 GaAs (001) 衬底,按常用方法<sup>[5]</sup>进行清洗、腐蚀、钝化,然后用高纯铟粘在钼块上,样品在进样室内 ( $10^{-7} \text{ Torr}$ ) 被加热到  $300\text{--}400^\circ\text{C}$  进行预处理,从而避免了加热除气对生长室的污染,然后再进入生长系统.在生长室内,将衬底加热至  $600^\circ\text{C}$  左右,使覆盖在 GaAs 表面的氧化膜蒸发掉,通过反射高能电子衍射 (RHEED) 图形的变化,判断确以得到清洁表面后,即可打开快门,开始外延.生长 GaAs 缓冲层时,衬底温度为  $560^\circ\text{C}$  左右,生长速率为  $0.7 \mu\text{m/h}$ ,而生长  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  层时,衬底温度为  $650^\circ\text{C}$  左右,生长速率为  $0.46 \mu\text{m/h}$ ,Al 的克分子数  $x$  取 0.3.

图 1 (a) 所示的各层厚度为 GaAs 缓冲层  $0.7\text{--}1 \mu\text{m}$ , 掺硅  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$   $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  厚度为  $600 \text{ \AA}$  左右,两层之间是不掺杂的隔离层  $150 \text{ \AA}$ ,它的作用是减弱掺杂层的离化杂质与转移到 GaAs 层中的电子间的库仑相互作用.为了减少 GaAs/AlGaAs 异质结之间的应力,采用  $\text{AlGaAs}(15 \text{ \AA})\text{--GaAs}(20 \text{ \AA})\text{--AlGaAs}(30 \text{ \AA})\text{--GaAs}(20 \text{ \AA})\text{--AlGaAs}(45 \text{ \AA})$  的多层结构作为隔离层<sup>[6]</sup>.顶层是掺硅  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  GaAs 厚度为  $200 \text{ \AA}$ ,用于改善测量电极的欧姆性和防止 AlGaAs 氧化.

## 三、结果与讨论

### 1. 迁移率增强效应

这一效应是获得二维电子系统的重要判据.因为在均匀掺杂的半导体材料中,声子和离化杂质散射是重要的,它们分别在高温 ( $> 50 \text{ K}$ ) 和低温 ( $< 50 \text{ K}$ ) 下起主要作用.通常迁移率值在  $50\text{--}100 \text{ K}$  附近,随着温度继续下降,迁移率降低.而在调制掺杂样品中,由于载流子与离化杂质的空间分离,低温迁移率会继续增加<sup>[7]</sup>.

在  $4.2\text{--}200 \text{ K}$  温度范围内,用范德堡方法测量了样品的霍尔迁移率  $\mu_{\text{H}}$  和温度  $T$  的变化关系(见图 2).表 1 列出一组样品在  $4.2 \text{ K}$ ,  $77 \text{ K}$  的  $\mu_{\text{H}}$  和  $n$  的测量结果.

表 1

样品号	4.2 K		77 K	
	$\mu_{H1}$ ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )	$n(\text{cm}^{-2})$	$\mu_{H1}$ ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )	$n(\text{cm}^{-2})$
850214-2	$3.15 \times 10^5$	$4.17 \times 10^{11}$	$1.27 \times 10^4$	$4.4 \times 10^{11}$
850212-4	$2.53 \times 10^5$	$4.43 \times 10^{11}$	$1.14 \times 10^4$	$4.58 \times 10^{11}$
850307-3	$2.04 \times 10^5$	$3.65 \times 10^{11}$	$8.6 \times 10^4$	$4.22 \times 10^{11}$
850312-3	$1.98 \times 10^5$	$4.14 \times 10^{11}$	$9.3 \times 10^4$	$4.01 \times 10^{11}$

迁移率在低温下增强受到限制的主要因素是 GaAs 层的本底杂质。本工作所用的 MBE 设备是垂直配置的束源结构, 由于会引入交叉污染, 以及较低的热炉真空度  $2 \times 10^9$  Torr (不计 As 炉), 比国外设备低一个数量级, 影响了 GaAs 层的纯度。由于对工艺作了重要改进, 液氮温度下  $4.26 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  (非光照) 和  $5.9 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  (光照) 的迁移率是迄今国内报道的最好结果, 也是用垂直束源配置的分子束外延装置得到的最好数据。

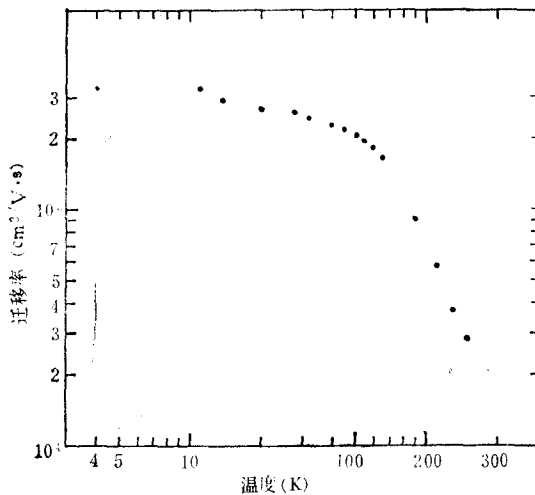


图 2 GaAs/N-AlGaAs 实验观测迁移率和温度关系  
● 为体调制掺杂 ( $n = 4.17 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ )

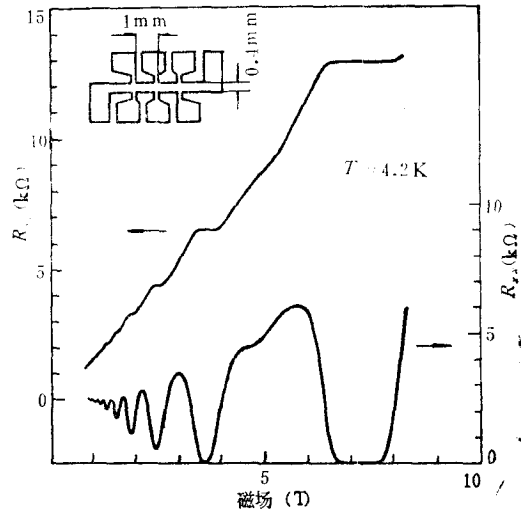


图 3 调制掺杂 GaAs/AlGaAs 单界面霍尔电阻  $R_{xy}$  和平行电阻  $R_{xx}$  的量子霍尔效应观察

## 2. 量子霍尔效应<sup>[8]</sup> 测量

在低温 (2.4—4.2 K), 强磁场 (0—10 T) 条件下, 对 GaAs/AlGaAs 异质结构中的二维电子气的输运特性进行了测量。外延片经光刻后, 制成图 3 左上角所示的霍尔桥样品。当所加磁场垂直于结平面时, 电子的二维运动进一步量子化, 电子处于分立的朗道能级, 其简并度为  $eB/hc$ , 随着磁场的增加, 简并度增加, 由于电子浓度  $n$  固定, 填充能级数目减少。当电子恰好填满若干朗道能级时, 霍尔电阻  $R_{xy}$  取确定的量子化值,  $R_{xy} = h/ie^2$ ,  $i$  为量子数,  $h$  为普朗克常数,  $e$  为电子电荷。

图 3 给出对一个  $\mu_{H1} = 8.2 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  (4.2 K),  $n = 3.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  样品的测量结果。在磁场为 2.44、3.63、7.25 T 处出现明显的霍尔电阻  $R_{xy}$  的“平台”。表 2 给出各

平台处的  $R_{xy}$  测量结果. 图 3 也给出磁阻  $R_{xx}$  随  $B$  的变化曲线, 表现出 Shubnikov-dc Hass 振荡 (SdH). 与  $R_{xy}$  “平台”位置相对应,  $R_{xx}$  出现极小. 从 4T 以下 SdH 振荡周期推算出界面处载流子浓度  $n = 3.6 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ , 与霍尔测量结果一致.

表 2

	量子数	$R_{xy}(\Omega)$	$h/ie^2(\Omega)$	$B(\text{T})$	$\Delta B(\text{kG})$
$i =$	$2(N=0)$	$12906.2_{-0.2}^{+0.3}$	12906.40	7.25	2.6
	$4(N=1)$	$6455.6_{-0.6}^{+0.7}$	6453.2	3.63	1.8
	$6(N=2)$	4313	4302.13	2.44	1.5

### 3. 磁声子共振测量

在磁场作用下, 纵向光学声子与处于朗道能级的电子共振散射, 吸收或放出声子, 产生磁声子共振效应, 在磁阻上出现振荡现象<sup>[9]</sup>. 共振散射条件为

$$N\hbar\omega_0 = \hbar\omega_c \quad N = 1, 2, 3, \dots$$

其中  $\omega_c = eB/m_c$  为回旋共振频率,  $\hbar\omega_0$  为 LO 声子能量. 磁声子共振散射引起的磁阻可表示为  $\Delta\rho = \exp(-\gamma B_0/B) \cos(2\pi B_0/B)$ ,  $B_0 = m^*\omega_0/e$ , 由于声子频率已知, 由磁声子共振效应可确定极化子质量  $m^*$ . 表 3 给出目前国际上三家做磁声子共振测量的数据比较.

表 3

研究单位	电子面密度 ( $\times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ )	迁移率 ( $\times 10^4 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ )	共振磁场					有效质量	磁场	温度 (K)
			1	2	3	4	5			
Bell Lab	0.25	2.5 (LHe)		12.1	8.2	6.1	4.9	$0.077 \pm 0.004$	线扫	180
Max-Planck 学会固体所	0.25	2.5 (LHe)		12.4	8.3	6.1				
东京大学实验	0.5	1.6 (LN <sub>2</sub> )	$24.9 \pm 0.03$	12.1	$8.0 \pm 0.2$	$6.0 \pm 0.2$		0.0764	脉冲 35T	180
修 正			$23.6 \pm 0.5$	$11.8 \pm 0.5$	$7.9 \pm 0.2$	$5.9 \pm 0.2$		0.0745		
计 算			23.8	11.7	7.9	5.9				
物理所实验	0.5	3.0 (LN <sub>2</sub> )	$23.2 \pm 0.3$	$12.1 \pm 0.2$	$8.0 \pm 0.1$	$6.1 \pm 0.1$	$4.8 \pm 0.1$	0.0747	脉冲 35T	182
修 正			$23.2 \pm 0.2$	$11.9 \pm 0.1$	$7.8 \pm 0.1$	$6.0 \pm 0.1$	$4.7 \pm 0.1$			

这里得到的  $m^*$  值比带边有效质量大是由于声子的相互作用及异质结处二维电子系统非抛物型能量色散关系引起的.

本工作中, 冯亚明、蔡丽红在样品清洗和生长工艺方面做出了贡献.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] R. Dingle, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **33**(1978), 665.
- [ 2 ] D. C. Tsui, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **48**(1982), 1559.
- [ 3 ] T. Mimura *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **19**(1980), L225; W. T. Tsang, *Appl. Phys. Lett.*, **39**(1981) 786; F. Capasso, *J. Vac. Sci Technol.*, **B1**, (1983), 457.
- [ 4 ] 周均铭等, 物理学报, **33**(1984), 1240.
- [ 5 ] A. Y. Cho, *et al.*, *Electronics Lett.*, **16** (1980), 72.
- [ 6 ] W. T. Mazselink, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **44** (1984), 435.
- [ 7 ] H. L. Stormer, *Surf. Sci* **132** (1983), 519.
- [ 8 ] K. Von Klitzing *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **45** (1980), 498.
- [ 9 ] Giyuu Kido, *et al.*, *J. Phys. Society of Japan*, **51** (1982), 2168.

## GROWTH AND TRANSPORT PROPERTIES OF MODULATION DOPED GaAs/AlGaAs HETEROSTRUCTURES

ZHOU JUN-MING   HUANG YI   MENG QING-HUI   CHENG WEN-QIN

WU YONG-SHENG   LI YONG-KANG   YANG ZHONG-XING

*(Institute of Physics, Academia Sinica)*

### ABSTRACT

The high quality modulation doped GaAs/N-AlGaAs heterostructures have been grown by a vertical molecular beam epitaxy system (MBE). Electron mobility of two dimensional electron gas (2DEG) at 4.2 K has reached as high as  $4.26 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  (in the dark) and  $5.9 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  (under light illumination). The polaron mass of 2DEG was determined by analysis of oscillatory resistance change of magnetophonon resonance in pulsed magnetic field. The mobility enhancement of 2DEG in low field and quantum Hall effect in high field at 4.2 K were also studied.