

研究简报

分子束外延选择性掺杂的 GaAs/ N-GaAlAs 异质结

陈宗圭 梁基本 孙殿照 黄运衡 孔梅影

(中国科学院半导体研究所)

1984年3月29日收到

利用分子束外延技术制备了选择性掺杂的 GaAs/N-AlGaAs 异质结, 22K 时, 该结构的迁移率达到 $223,000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 相应的薄层电子浓度为 $5.7 \times 10^{11}\text{cm}^{-2}$. 在低温强磁场下, 观察到异质结电子系统的二维 SdH 振荡特性和量子化 Hall 效应。

分子束外延 (MBE) 的独特优点是可以生长原子级厚度和平整度的多层单晶薄膜, 并可精确控制薄膜的组分和掺杂. 利用 MBE 技术的这种特点, 生长了选择性掺杂的 GaAs/N-AlGaAs 异质结. 由于异质结两种材料中的电子亲合势不同, 在 N-AlGaAs 中的电子与施主分离, 聚积到界面处 GaAs 一侧. 这个电子积累层中的电子形成准二维电子气, 在低温下具有很高的电子迁移率^[1], 因此, 可以用来制作高速微波器件^[2].

本工作采用协作研制的分子束外延设备^[3], 在外延生长高质量的 GaAs 和 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 单晶薄膜的基础上, 制备了选择性掺杂的 GaAs/N-AlGaAs 异质结. 经测量表明, 此结构具有二维电子气 (2DEG) 的输运特性

(1) 样品结构

图 1 表示选择性掺杂的 GaAs/N-AlGaAs 异质结结构. 在掺 Cr 半绝缘 (100) GaAs

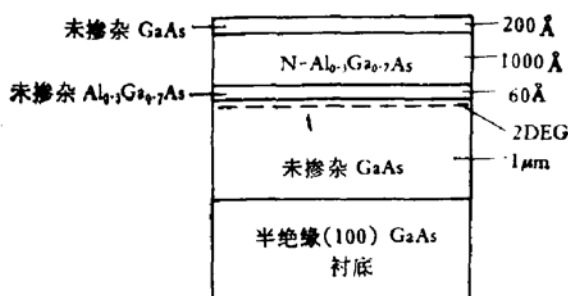


图 1 选择性掺杂的 GaAs/N-AlGaAs 异质结

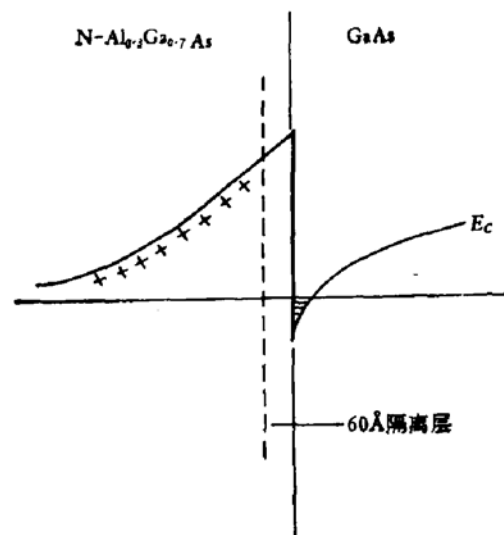


图 2 异质结界面能带图

衬底上,先外延一层 1 微米厚的未掺杂的 GaAs 缓冲层,以消除衬底的界面效应。然后是厚度只有 60 Å 左右的未掺杂的 AlGaAs 隔离层,减少 N-AlGaAs 中离化施主对界面处电子的散射作用。其上为厚度为 1000 Å 的掺 Si 的 N-AlGaAs 层,掺杂浓度约为 $1.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, AlAs 克分子数 (x 值)取 0.3 左右。最后在表面外延一层 200 Å 的未掺杂的 GaAs,以防止 AlGaAs 遇空气后氧化,并有利于制作欧姆接触。

图 2 是异质结界面处的能带图。分子束外延的异质结,具有从一种材料到另一种材料突变的理想性质,界面上形成很陡的势垒,使电子局限于界面处的一维势阱中。

(2) 实验

分子束外延设备和 GaAs 单晶薄膜的外延生长已在前文^[1]作过介绍。AlGaAs 的 N 型掺杂剂选用 Si,因 Si 在高的衬底温度下可以有陡变的掺杂分布。分子束源分别采用纯 As(6N),纯 Ga(6N),纯 Al(6N)和高纯单晶 Si。喷射炉坩埚材料除 As 炉选用高纯石墨外,其它均为国产的热解氮化硼。生长 GaAs 和 AlGaAs 的衬底温度为 580℃—680℃,生长速率为 1—2 微米/小时。未掺杂的 GaAs 呈 N 型,载流子浓度为 10^{14} — 10^{15} 厘米⁻³。在一定的 GaAs 生长速率下,分别调节 Al 炉和 Si 炉的温度,得到所需要的 AlAs 克分子数 (x 值)和 N-AlGaAs 中的掺杂浓度。外延层的厚度,在确定的 GaAs 和 AlGaAs 生长速率下,由生长时间确定。外延生长过程均在富 As 条件下进行,As 背景蒸汽压为 1.0×10^{-6} 托。

(3) 测量

用范德堡法测量异质结界面处的薄层载流子浓度 (n_s) 和 Hall 迁移率 (μ)。图 3 是在 20—300K 温度范围, n_s 和 μ 随温度的变化曲线。图中同时绘出一般 MBE GaAs 样品的迁移率与温度的关系曲线。十分明显, GaAs/N-AlGaAs 异质结的迁移率随温度下降而不断上升。22K 时的迁移率达到 223,000 cm²/V·s。而 GaAs 样品在 60K 左右具有峰值迁移率。当温度低于 60K 时,由于离化杂质散射作用,迁移率开始下降。

下表列举了三个 GaAs/N-AlGaAs 异质结样品在 297K, 77K 和 22K 时的迁移率和薄层载流子浓度(无光照)。

样品编号	297K		77K		22K	
	$n_s(\text{cm}^{-2})$	$\mu(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$	$n_s(\text{cm}^{-2})$	$\mu(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$	$n_s(\text{cm}^{-2})$	$\mu(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$
12	1.06×10^{12}	4,508	5.26×10^{11}	87,100	5.21×10^{11}	150,700
15	1.24×10^{12}	4,338	6.08×10^{11}	103,000	5.71×10^{11}	223,000
21	9.4×10^{11}	6,400	6.64×10^{11}	96,500	6.11×10^{11}	177,200

另外对 GaAs/N-AlGaAs 异质结的二维输运特性进行了初步测试。在低温强磁场下,当磁场垂直于界面时,观察到 Shubnikov-de Hass (SdH) 振荡特性;当磁场平行于界面时,这种振荡特性完全消失,如图 4 所示。这表明异质结界面电子系统具有二维输运特性。

图 5 表示磁阻 ρ_{xx} 和 Hall 电阻 ρ_{xy} 随磁场的变化曲线。当磁场强度增加时,填满电子的 Landau 能级数依次减少。电子填满整数 i 个 Landau 能级时, ρ_{xx} 近似为零; ρ_{xy} 值显示出特定的量子化平台,其数值为 h/ie^2 (h 为普朗克常数, e 为电子电荷)

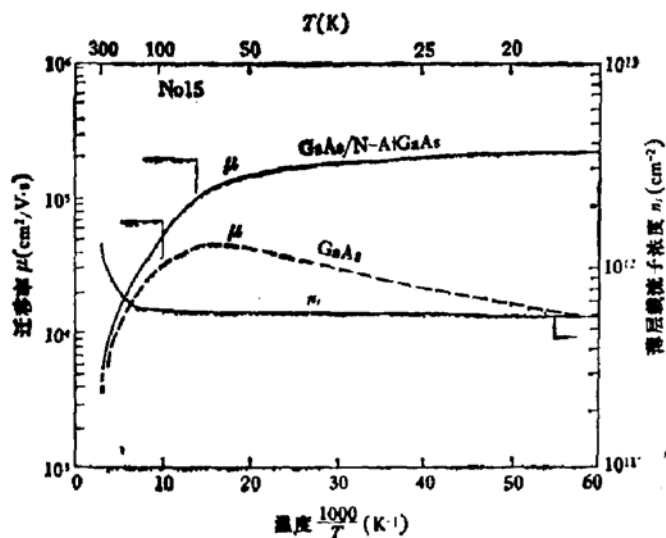


图3 μ 和 n_i 随温度的变化曲线实线是 GaAs/N-AlGaAs 异质结, 虚线是 MBE GaAs 样品

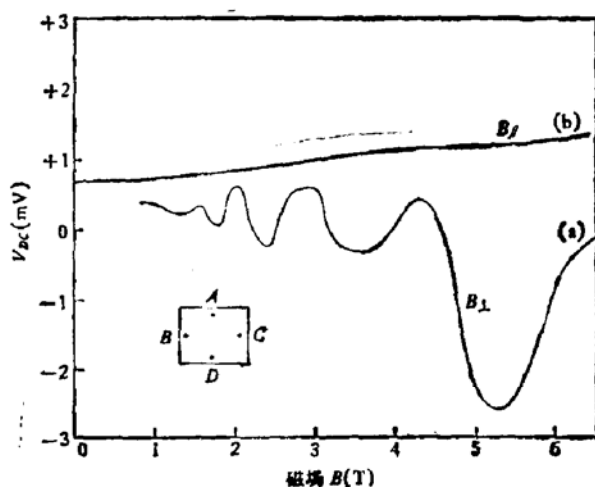


图4 不同磁场方向, V_{DC} 与磁场 B 的关系曲线
(a) 垂直界面的磁场 ($B_{\perp}$)
(b) 平行界面的磁场 ($B_{\parallel}$)
No. 12 $T = 4.2\text{K}$ $I_{AB} = 50\mu\text{A}$

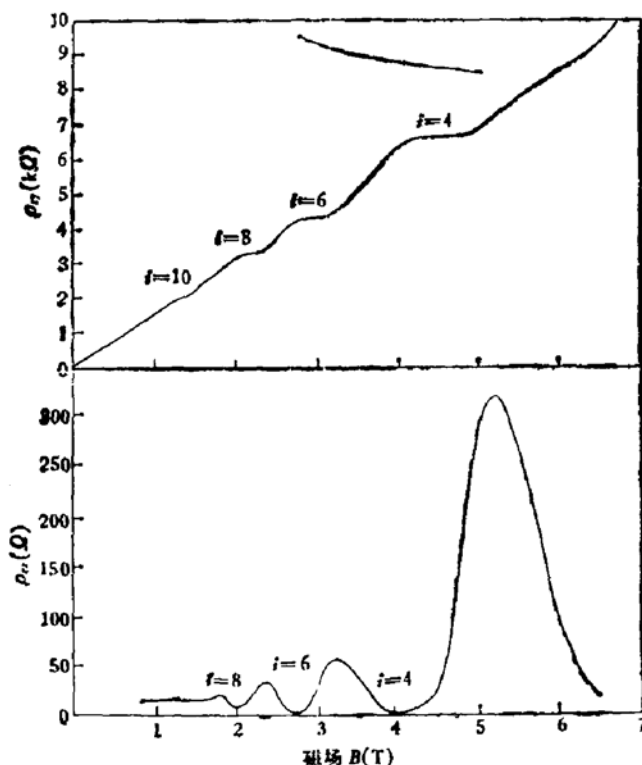


图5 ρ_{xx} 和 ρ_{xy} 与磁场 B 的关系曲线
No. 12 $T = 4.2\text{K}$ $I = 50\mu\text{A}$

由量子化 Hall 电阻平台相应的磁场强度推算出填满 Landau 能级的电子数 n_i 等于 $4.03 \times 10^{11}\text{cm}^{-2}$, 此值与弱磁场下的 Hall 测量值 $3.68 \times 10^{11}\text{cm}^{-2}$ (4.2K) 十分接近。

本工作得到黄昆、林兰英的关心与指导。李岐旺、曾一平、常永萍等参加了实验工作, 李瑞云、王万年等作了样品的 Hall 测量; 本所二维电子气研究组江丕桓、李月霞、杨富华、王杏华等作了样品的二维

输运特性的测量;朱素珍协助抛光了衬底,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] R. Dingle, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **33**, 665 (1978).
- [2] T. Mimura, *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **19**, L225 (1980).
- [3] 孔梅影等, *半导体学报*, **5**, 206(1984).

MBE Growth of Selectively Doped GaAs/N-AlGaAs Heterostructure

Chen Zonggui, Liang Jiben, Sun Dianzhau,

Huang Yunheng and Kong Meiyong

(*Institute of Semiconductors, Academia Sinica*)

Abstract

A selectively doped GaAs/N-AlGaAs heterostructure with an electron mobility as high as $223,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ and a sheet carrier concentration of $5.7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ at 22 K has been grown by molecular beam epitaxy (MBE). SdH oscillation and quantized Hall resistance of two-dimensional electron gas in the heterostructure have been observed under high magnetic field at low temperature.