

# 高质量二维电子气材料研制及其器件应用

夏传钺

(国家自然科学基金委员会信息科学部, 北京 100083)

梁基本

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

[关键词] 分子束外延, 二维电子气, 低温电子迁移率

高迁移率 GaAs/AlGaAs 二维电子气 (2DEG) 结构材料在基础物理研究和新型器件及电路的应用方面有十分重要的意义。低温电子迁移率  $\mu$  超过  $10^6 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  的 2DEG 材料可用于研究分数量子霍尔效应。高迁移率和高载流子面密度的 2DEG 材料可用于研制高电子迁移率晶体管 (HEMT)、超高速数字集成电路 (VHSIC) 和微波毫米波单片集成电路 (MIMIC) 等超高频、超高速微电子器件和电路, 它们被广泛应用在雷达、制导、电子对抗、光纤通讯和数字微波通讯等领域。

1978年, 美国贝尔实验室 R. Dingle 用分子束外延 (MBE) 技术首先研制成功 GaAs/AlGaAs 调制掺杂异质结构 2DEG 材料, 其低温电子迁移率约为  $2 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。自此以后, 低温电子迁移率不仅是衡量 GaAs/AlGaAs 2DEG 材料质量的指标, 也成为衡量一个实验室分子束外延技术水平的重要标志之一。

至 1988年, 一些研究小组陆续研制出在 4.2 K 下电子迁移率超过  $10^6 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  的 2DEG 材料, 而美国贝尔实验室达  $5 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  (光照), 属最高水平。1989年, 美国贝尔实验室又研制出至今低温迁移率最高的 2DEG 材料, 其迁移率:

$$\mu_{0.35\text{K}} = 6.4 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s} \text{ (暗场)}, \quad \mu_{0.35\text{K}} = 1.17 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s} \text{ (光照)}$$

以后, 一直未能有人达到这个纪录。主要原因是技术难度大, 费用高, 耗时长。至今, 可研制出在 4.2 K 下电子迁移率超过百万的 2DEG 材料的研究小组, 为数不多。

国家自然科学基金重大项目“新型器件及其超薄层异质结外延材料和表面界面研究”, 在中国科学院院士、著名半导体材料科学家林兰英教授的领导下, “高质量 GaAs/AlGaAs 二维电子气材料研制及其器件应用” 研究组利用引进的 MBE 设备, 只用了两个多月时间, 完成了国外通常历时 2—3 年才完成的任务, 研制出了低温电子迁移率达到  $1.14 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  的 2DEG 材料, 结束了我国 2DEG 材料低温电子迁移率长期徘徊的局面, 使我国研制 2DEG 材料的技术跨进国际先进水平, 成为国际上继美、日、德、英等国十余个研究组之后研制出在

本文于 1995 年 5 月 9 日收到。

#### 4.2 K 下电子迁移率超过百万的 2DEG 材料的国家。

为了提高 2DEG 结构材料的电子迁移率, 研究组进行了 2DEG 散射理论研究<sup>[1-3]</sup>, 系统分析了影响迁移率的各种散射机制<sup>[1]</sup>, 主要有: (1) 高纯 GaAs 层内的杂质散射; (2) 掺杂 AlGaAs 层中远程电离杂质散射; (3) GaAs/AlGaAs 界面散射; (4) 高纯 GaAs 层的声子散射。在较高温度下, 声子散射是影响迁移率的主要原因; 而在低温下, 则是杂质散射起主导作用, 界面散射也不容忽视。因此, 制备高电子迁移率 GaAs/AlGaAs 2DEG 材料的关键是: 制备高质量、高纯的 GaAs 和 AlGaAs 外延层; 制备原子级平整的 GaAs/AlGaAs 界面; 设计最佳的结构参数和优化 MBE 的生长工艺。具体措施如下:

(1) 降低本底杂质浓度, 认真制备衬底以获得高纯、高质量的 GaAs 和 AlGaAs 外延材料。

MBE 生长的 GaAs 材料一般为 P 型, 主要受主杂质是碳, 其它本底受主还有锌、锰和代替砷位的硅。典型受主杂质浓度为  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。为降低本底杂质浓度, 整个 MBE 系统, 尤其是生长室必须保持高度洁净和超高真空。MBE 系统装源前后, 要长时间烘烤, 彻底除气。烘烤后要求生产室、传递室和制备室的真空度都达到  $10^{-9} \text{ Pa}$ 。

MBE 外延层的纯度受所用源材料的纯度影响极大。本研究工作所用的源材料是 Ga (8N), Al (6N), As (7N) 以及高电阻率的硅单晶。

实验中所用的 SI-GaAs 单晶衬底的制备是成功生长外延层的最重要步骤之一, 要求得到一个无金属杂质、无有机物杂质并有钝化氧化层保护膜的表面。衬底清洁处理后, 立即放进 MBE 系统的进样室以避免沾污, 然后在制备室加热除气约 1 小时, 再将衬底送到生长室。在采取种种严格洁净措施以后, 该系统本底受主杂质浓度为  $(2-3) \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。

(2) 根据计算, 当 GaAs/AlGaAs 界面粗糙度大于一个分子层时, 界面散射对电子迁移率影响很大<sup>[2]</sup>。因此, 要采取优化的工艺条件和结构设计, 以获得原子级平整的 GaAs/AlGaAs 异质结界面。

(3) 在结构设计方面, 通过计算, 根据本底杂质浓度确定隔离层厚度, 以求既降低掺杂 AlGaAs 层中的远程电离杂质散射, 又保持适当的 2DEG 浓度, 掺杂 Al/GaAs 层选择适当的 Al 组分和掺杂浓度, 以获得较高的势垒高度和适当的 2DEG 浓度, 屏蔽本底杂质和远程电离杂质的散射, 以提高电子迁移率。

还在 GaAs 缓冲层中加入 10—20 个周期的 GaAs/AlGaAs 短周期超晶格。它具有阻挡衬底中位错和缺陷向外延层延伸的作用, 还可以使高纯 GaAs 层表面生长平整。同时在界面处吸附杂质, 既能提高 GaAs 外延层的纯度和完整性, 又减小了界面起伏, 有利于提高 2DEG 的电子迁移率。

(4) 优化 MBE 生长工艺主要是适当选择各外延层生长时的衬底温度, 而生长时间主要由生长速度和结构设计所要求的层厚来确定。所采用的工艺条件主要是: 生长高纯 GaAs 层的衬底温度为 600—620 °C, As/Ga 束流比选择在刚好为 As 稳定面条件, GaAs 生长速率约为 0.7  $\mu\text{m}/\text{h}$ 。生长 GaAs/AlGaAs 异质结界面时, 适当提高衬底温度到 630—640 °C, 以获得平整的界面。而 AlGaAs ( $x=0.3$ ) 生长的最佳衬底温度约为 700—710 °C。

在本项目研究中, 由于掌握了制备高电子迁移率 GaAs/AlGaAs 2DEG 材料的关键技术, 能够稳定地在高水平上重复制备, 并在此技术基础上研制出了高性能的 HEMT 和 PHEMT 等器件结构材料, 其参数达到 90 年代初国际同类产品水平, 研制的 HEMT 材料达到室温迁

移率  $\mu_{300K} = 6600 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ , 表面载流子浓度  $n_s = 1.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , 77 K 时的迁移率  $\mu_{77K} = 67000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ; PHEMT 材料达到  $\mu_{300K} = 6350 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ,  $n_s = 3.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 。同时, 向中科院半导体所、微电子中心和上海冶金所, 电子部 13 所和 55 所的十多个小组提供优质微电子器件结构材料的片子, 使他们得以研制出性能优良的 8 mm 波段实用性的大功率管以及低噪声器件和电路。这些器件性能, 有的在国内领先, 有的已达到国际水平。如 55 所采用该研究组 MBE 材料试制的 GaAs/AlGaAs 异质结功率管, 工作频率  $f = 12 \text{ GHz}$ , 功率  $P_{1db} = 4 \text{ W}$ , 增益  $G_{1db} \geq 5 \text{ db}$ , 达到了日本富士通公司 90 年代初 FLM1011-4C 的性能水平, 为这些单位完成一批国家任务作出了贡献。这些器件的研制成功和试用结果表明, 我国的分子束外延材料性能已达到国际先进水平, 也意味着我国这一材料研究工作已开始进入实用阶段。

该重大项目材料课题之所以迅速取得重大成果, 是因为很好地发挥了中科院半导体所半导体材料开放实验室的科研人员长期积累的 MBE 工作经验和进口的 MBE 设备性能优良的双重优势。这也表明, 基金重大项目的组织与国家重点实验室、部门开放实验室的研究工作相配合的工作方向是非常正确的。

1994 年 11 月, 中国科学院对“高质量 GaAs/AlGaAs 二维电子气材料研制及其器件应用”这一重大研究成果组织技术鉴定, 确认我国 MBE 技术已达到国际先进水平。

### 参 考 文 献

- [1] 杨斌, 陈涌海, 王占国等. 半导体学报, 1995, **16** (4): 248.
- [2] Bin Yang, Yong-hai Cheng, Zhan-guo Wang et al. Appl. Phys. Lett., 1994, **65** (26): 3329.
- [3] Bin Yang, Zhan-guo Wang et al. Appl. Phys. Lett., 1995, **66** (11): 1406.

## HIGH QUALITY 2DEG MATERIAL AND ITS DEVICE APPLICATION

Xia Chuanyue

(Department of Information Sciences, NSFC, Beijing 100083)

Liang Jiben

(Institute of Semiconductors, CAS, Beijing, 100083)

**Key words** MBE, 2DEG, electron mobility at low temperature