

# 分子束外延砷化镓单晶薄膜

孔梅影 孙殿照 黄运衡

梁基本 陈宗圭 李歧旺

(中国科学院半导体研究所)

1983年5月30日收到

## 提 要

MBE GaAs 单晶薄膜的载流子浓度  $(1.8-8) \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ , 室温迁移率  $3000-5000 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  最高达  $5466 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , 相应的 77K 迁移率为  $1.59 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ . 对高杂质浓度的外延层进行了阴极荧光 (4.2K) 和 SIMS 测量分析.

分子束外延技术 (MBE) 的独特优点是可以生长原子级厚度和平整度的超薄、多层单晶薄膜; 可随意改变薄膜的组分和掺杂. 近几年来, 它在发展半导体新材料、新器件和新效应方面取得了许多突出的进展<sup>[1]</sup>, 日益显示出它在发展半导体科学技术中的重要作用.

已经报道过我们的 MBE 设备和用 GaAs 作 As 源的 MBEGaAs 的性能<sup>[2]</sup>. 本文主要介绍用纯 As 作 As 源的 MBE GaAs 的单晶生长及其性能.

## 一、GaAs 单晶薄膜生长

选择电阻率为  $10^7-10^8$  欧姆-厘米掺 Cr 半绝缘 (100) GaAs 和  $n^+-\text{GaAs}$  (载流子浓度  $\sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ) 作衬底, 生长前将机械抛光好的衬底用有机溶剂清洗、再用  $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 7:1:1$  化学腐蚀, 去离子水冲净、纯氮吹干. 用 In 将其粘到清洁的钼块上后立即放入样品传递室, 再送入真空工作室进行生长前表面预处理, 然后生长. 为了减少清洁的衬底表面受到碳、氧的污染, 衬底在化学腐蚀后使其表面立即形成一薄的自体氧化层. 外延生长前先在 As 气氛下加热衬底可将此氧化层及吸附在它上面的一些杂质去除, 但碳难以去尽 (在 AES 测量灵敏范围).

选用高纯的 Ga 和 As (纯度 6 个 9) 作分子束源材料, 热解氮化硼和高纯石墨分别作盛 Ga 和 As 的坩埚材料. 生长时  $T_{\text{Ga}} 980-1060^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{As}} 320-350^\circ\text{C}$ , 衬底温度  $590-630^\circ\text{C}$ , As 和 Ga 的流量比为 5-10. 图 1 是生长条件下用 QMS 测得的 Ga、As 分子束流量及残余气体成分的质谱图. 在这样的生长条件下, 生长速率约为  $0.7-1.5 \mu\text{m}/\text{hr}$ .

生长前后可用 RHEED 观察衬底表面结构的变化. 开始时衬底表面的电子衍射图形十分模糊, 在 As 的气氛下去掉氧化层后, 衍射图形变得清晰成条, 有时出现再构条纹, 生长一段时间后再构条纹更清晰, 这表明生长的外延层表面十分平整, 呈现 As 稳态的  $C(2 \times 8)$  再构表面 (图 2). 生长前衬底的表面质量和生长条件对外延层的性能均有很大

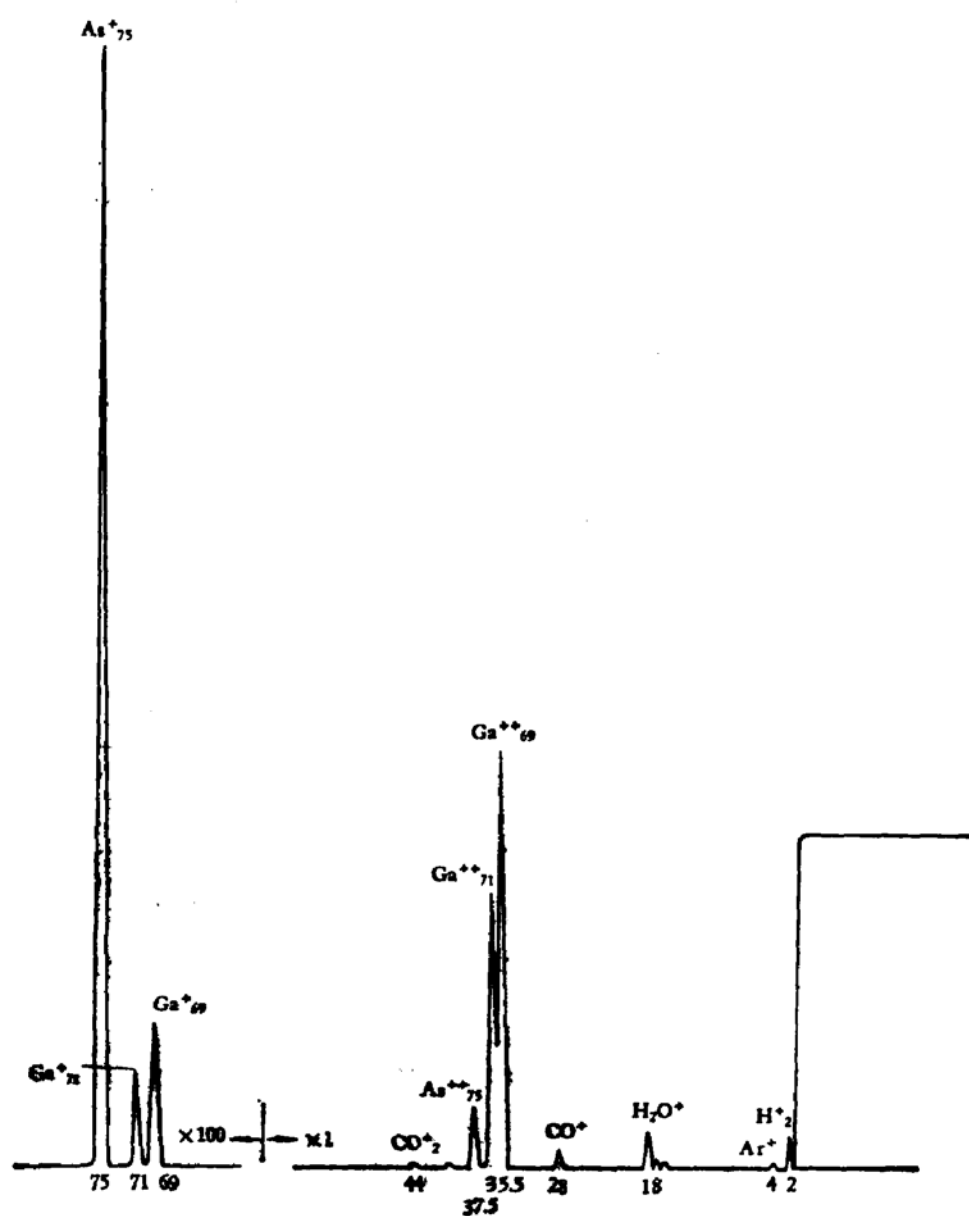
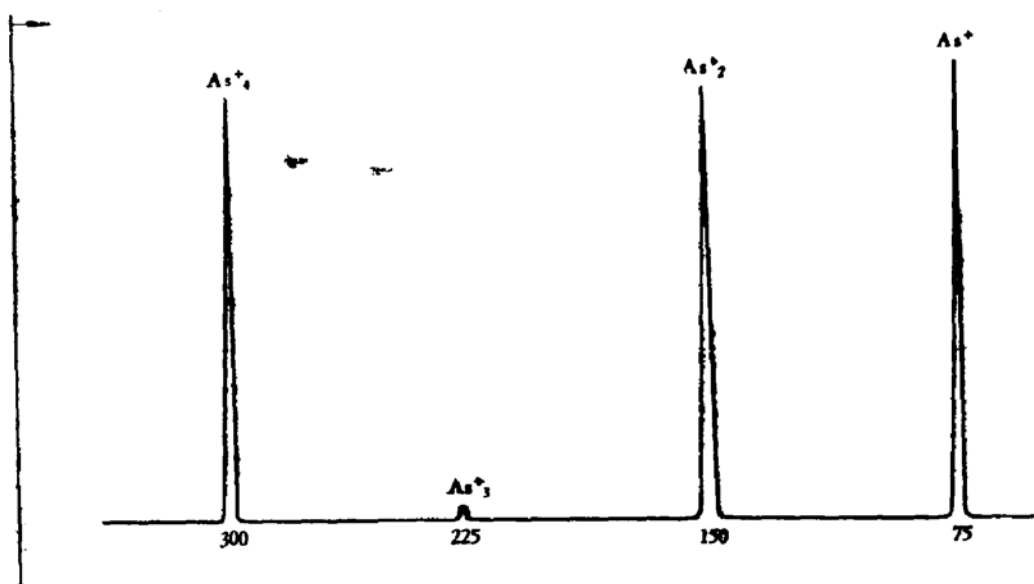


图1 生长条件下 Ga、As 流量比及背景残余气体质谱图

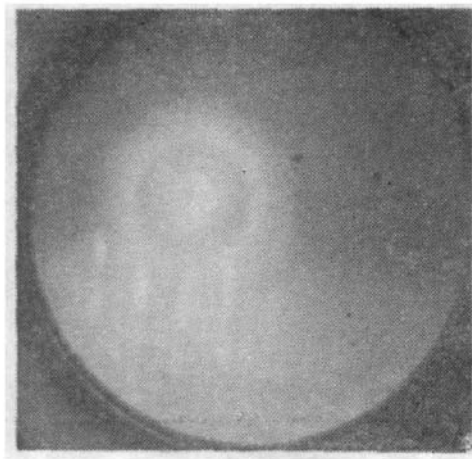


图2 MBE GaAs 外延层表面的 RHEED 图形

影响。

## 二、MBE GaAs 的性能测试

1. 用扫描电镜观测了外延层的厚度和表面形貌,外延层表面一般十分平整光洁。

2. 用范德堡法测得外延层是  $n$  型,载流子浓度一般  $(1.8-8) \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ , 室温迁移率  $3000-5000 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , 最高达到  $5466 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  (载流子浓度  $1.93 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ), 相应的 77K 下的迁移率为  $1.59 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}^*$ 。

3. 4.2K 下的阴极荧光测量表明高杂质浓度外延层中 C 污染比较严重,此外还有 Cr 和施主杂质等的污染。

表1 MBE GaAs 的阴极荧光谱 (4.2K, 电子能量 20keV)

| 峰值波长   | 能 量     | 相对强度     | 峰性质和相应的杂质          |
|--------|---------|----------|--------------------|
| 821nm  | 1.51eV  | 1        | 施主 ( $h$ , $D^0$ ) |
| 831nm  | 1.490eV | 2.7      | C( $e$ , $A^0$ )   |
| 850nm  | 1.459eV | 0.1      | C( $eA^0-LO$ )     |
| 920nm  | 1.35eV  | 0.01     | 可能是 Cu 或 $V_{As}$  |
| 1525nm | 0.81eV  | $\sim 1$ | Cr                 |

4. SIMS 对高杂质浓度样品的剥层测量表明,外延层中  $C, O_2, Si, Ge, Se, Fe$  等杂质的含量都不同程度地高于衬底(表2)。初步分析认为外延层中的 Cr 来自衬底的扩散, Fe 来自不锈钢受热部件。

\* 在本文稿投送后我们又对分子束源进行了改进,显著提高了 MBE GaAs 的性能。目前  $n$  型 MBE GaAs 电学特性可重复的结果是:

$$n = 1 \times 10^{14} - 1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}, \mu_{300K} = (5-7) \times 10^3 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s},$$

$$\mu_{77K} = (4-5) \times 10^4 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}, \text{外延层厚 } 2-3 \mu\text{m}$$

最高水平:

$$n = 1 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}, \mu_{300K} = 7796 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}, \mu_{77K} = 7.984 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}, \text{外延层厚为 } 9.7 \mu\text{m}$$

本文作者, 1983 年 12 月 3 日。

表 2 衬底和外延层中杂质的 SIMS 测量对比 ( $\text{cm}^{-3}$ )

|     | O <sub>2</sub>       | C                    | Si                   | Ge                   | Se                 | Te                   | S                    | Cr                  | Fe                 | Mn                   | Mg                   |
|-----|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|---------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| 衬底  | $3.8 \times 10^{16}$ | $1.5 \times 10^{16}$ | $1.5 \times 10^{16}$ | $7 \times 10^{15}$   | $8 \times 10^{15}$ | $1.5 \times 10^{16}$ | $1.0 \times 10^{16}$ | $1 \times 10^{17*}$ | $2 \times 10^{16}$ | $1.5 \times 10^{15}$ | $2.5 \times 10^{15}$ |
| 外延层 | $5 \times 10^{16}$   | $3 \times 10^{17}$   | $1.6 \times 10^{16}$ | $3.5 \times 10^{17}$ | $1 \times 10^{15}$ | $3 \times 10^{16}$   | $1.5 \times 10^{16}$ | $2 \times 10^{16}$  | $7 \times 10^{16}$ | $1.5 \times 10^{15}$ | $2.5 \times 10^{15}$ |

\* 衬底是掺 Cr 半绝缘 GaAs

以上结果表明,用我们自己研制的 MBE 设备已生长出可作一些器件应用的 GaAs 单晶薄膜。今后还要进一步改进系统的清洁度、提高样品的迁移率和降低载流子浓度。

本工作得到黄昆、林兰英教授的关心和指导,感谢葛玉茹同志对样品的扫描电镜测试、李瑞云同志的电性能测试、一室 LPE GaAs、VPE GaAs 组同志的有益讨论和帮助、英国电信研究所帮助对样品所作的低温阴极荧光和 SIMS 测量以及江德生同志在阴极荧光方面的有益讨论。

## 参 考 文 献

- [1] 孔梅影,稀有金属, No. 2, 57(1982).  
 [2] 分子束外延设备研制协作组,半导体学报, 2, 164(1981).

## MBE GaAs Single Crystal Films

Kong Meiyong, Sun Dianzhao, Huang Yunheng  
 Liang Jiben, Chen Zonggui and Li Qiwan  
 (Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

## Abstract

GaAs films have been prepared by molecular beam epitaxy. Undoped MBE GaAs is n-type with net carrier concentration  $(1.8-8) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  and mobility 3000—5000  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  at room temperature. Its highest mobility is 5466  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  ( $n=1.93 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) with a corresponding mobility  $1.59 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  at 77K. Properties of high impurity level films have been studied with cathodoluminescence and SIMS.