

中国科学院上海微系统与信息技术研究所

博士学位论文

新型结构HBT设计与材料生长研究

姓名：艾立鵬

申请学位级别：博士

专业：微电子学与固体电子学

指导教师：齐鸣

20080601

# 新型结构 HBT 设计与材料生长研究

艾立鹏（微电子学与固体电子学）

指导教师：齐 鸣

## 摘 要

异质结双极晶体管（HBT）是重要的高速电子器件，在微波/毫米波功率器件和单片集成电路（MMIC）方面具有重要的应用前景。双异质结 HBT（DHBT）具有开启电压低、反向击穿电压高、输出功率大等特点，尤其适用于微波/毫米波功率放大等电路。但由于常规 GaAs 基和 InP 基 DHBT 结构在集电结处存在导带势垒尖峰导致的电流阻挡效应，从而使器件特性变差。为了优化 GaAs 基和 InP 基 DHBT 集电结设计，探索新的器件结构，本文以气态源分子束外延（GSMBE）技术为手段，结合理论模拟和分析，对新型结构 DHBT 的材料设计、外延生长和器件制备进行了深入的研究，设计和研制出性能良好的新型结构 GaAs 基和 InP 基 DHBT 材料与器件。取得的主要研究结果包括：

1. 采用基于热场发射和连续性方程的反射-透射模型，对集电结带有 n 型 InGaP 插入层的 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 和带有能带阶梯递变 InGaAsP 复合集电区的 InP/InGaAs/InP DHBT 的电流传输特性进行了理论模拟和分析。结果表明，通过采用优化的 n 型插入层厚度和掺杂浓度或选择合适的能带阶梯缓变结构，都可以显著降低 DHBT 集电结的导带势垒尖峰高度，从而有效克服电流阻挡效应，获得较好的输出特性；
2. 通过对 GaAs、InP、InGaP、InGaAs、InGaAsP 等 DHBT 用外延材料 GSMBE 生长特性的研究，优化了生长工艺和条件，并成功地生长出集电结带有 n 型 InGaP 插入层的 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 和带有能带阶梯递变 InGaAsP 复合集电区的 InP/InGaAs/InP DHBT 材料，所生长的外延材料具有良好的晶体质量、电学特性和大面积均匀性；
3. 采用常规的湿法腐蚀工艺，研制出发射极面积为  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$  的新型结构 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 器件，开启电压为 0.15V，电流增益  $\beta$  为 170，反向击穿电压达到 16V，比单异质结 InGaP/GaAs HBT 器件提高了一倍；
4. 与器件研制单位合作，研制出发射极面积为  $0.8 \times 15 \mu\text{m}^2$  的新型结构 InP/InGaAs/InP

DHBT 器件, 截止频率  $f_T$  达到 170GHz, 最高振荡频率  $f_{max}$  达到 253GHz, 击穿电压  $BV_{CEO}$  大于 6V。

关键词: 异质结双极晶体管 (HBT), 气态源分子束外延 (GSMBE), GaAs, InP, InGaP, InGaAs, InGaAsP

# Study on Novel HBT Design and Material Growth

Ai Likun (Microelectronics and Solid-state-electronics)

Directed by: Prof. Qi Ming

## Abstract

Heterojunction bipolar transistor (HBT) is one of the most important microwave devices applied to wireless and fiber optical communications, radar, remote sensing, navigation, electronic countermeasure, and satellite systems. In this dissertation, the novel structural materials of InGaP/GaAs/InGaP DHBT with a n-InGaP layer at base/collector interface and InP/InGaAs/InP DHBT with step-graded InGaAsP composite collector were designed based on theoretical analysis and grown by gas source molecular beam epitaxy (GSMBE). The main results obtained in this work are summarized as follows:

1. The InGaP/GaAs/InGaP DHBT structure with a n-InGaP layer at base/collector interface and InP/InGaAs/InP DHBT structure with step-graded InGaAsP composite collector were simulated and analyzed theoretically. It was shown that the DHBT structures designed in this work can eliminate the energy spike at the B-C junction effectively and improve the device performance..
2. The growth and characteristics of GaAs, InP, InGaP, InGaAs and InGaAsP materials used for the DHBT devices by means of GSMBE were studied. High quality InGaP/GaAs/InGaP and InP/InGaAs/InP DHBT materials with designed structures were grown successfully under optimized growth conditions.
3. The InGaP/GaAs/InGaP DHBT device with emitter area of  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$  was fabricated by wet mesa etching process. The offset voltage and common emitter current gain of the InGaP/GaAs/InGaP DHBT are 0.15V and 170, respectively. The breakdown voltage as high as 16V was obtained. It means that the breakdown voltage of the DHBT designed in this work is one times higher than that of the single heterojunction HBTs.
4. The InP/InGaAs/InP DHBT device with emitter area of  $0.8 \times 15 \mu\text{m}^2$  was fabricated by cooperation with other laboratory using sub-micron device process. The offset voltage of the InP/InGaAs/InP DHBT is 0.15V.  $f_T$  of 170GHz,  $f_{\text{max}}$  of 253GHz and  $BV_{\text{CEO}} > 6\text{V}$  were achieved, it means that the device designed in this work shows very good high frequency and power performance.

**Keywords:** Heterojunction bipolar transistor (HBT), Gas source molecular beam epitaxy (GSMBE), GaAs, InP, InGaP, InGaAs, InGaAsP

中国科学院上海微系统与信息技术研究所

## 学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国科学院上海微系统与信息技术研究所或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一起工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：\_\_\_\_\_日 期：\_\_\_\_\_

中国科学院上海微系统与信息技术研究所

## 学位论文使用授权声明

本人完全了解中国科学院上海微系统与信息技术研究所有关保留、使用学位论文的规定，即研究所有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。保密的论文在解密后遵守此规定。论文的公布（包括刊登）授权中国科学院上海微系统与信息技术研究所人才教育处。

研究生签名：\_\_\_\_\_导师签名：\_\_\_\_\_日 期：\_\_\_\_\_

## 第一章 引言

随着当今社会信息化进程的飞速推进,人们对各种微结构电子器件和光电器件的要求越来越高。国际上一直在致力于开创、发展和完善薄膜材料生长技术,以推进信息科技的可持续发展。近二十年来,伴随着各种先进技术手段和理论体系的相互促进发展,III-V 族化合物半导体材料与器件以其独具的优良特性在微电子学和光电子学中占据了重要地位,被广泛应用于军事、空间以及生产、生活的各个方面。美国物理学家 Kroemer 于 1957 年首先提出异质结概念之后<sup>[1]</sup>,异质结双极晶体管(heterojunction bipolar transistor, HBT)便作为半导体器件的重要组成部分之一,受到了人们的重视。近年来,随着超晶格理论、低维物理的发展和分子束外延(MBE)、金属有机物化学气相沉积(MOCVD)技术的日趋成熟,使得异质结材料的质量不断提高,新的异质结器件不断出现,在现代高速通信中得到广泛应用。

上世纪九十年代后期,由于 MOCVD 和 MBE 技术的发展,以及化合物半导体材料和异质结器件工艺的日趋成熟,微波器件的研究取得令人瞩目的成就,使得异质结双极晶体管(HBT)、高电子迁移率晶体管(HEMT)和肖特基势垒场效应晶体管(MESFET)等各种器件性能逐年提高。与此同时,在此基础上构成的微波单片集成电路(MMIC)也已实用化,并进入商品化阶段,使用频率基本覆盖了整个微波波段,不仅能获得大功率、高效率,而且噪声系数小。新一代的微波及光电器件已进入产业化阶段,并占据了相当规模的市场份额,被广泛应用于卫星通信、移动通信、光纤通信、电子对抗、光电子对抗等系统中。

在高性能信息网络建设中,微波/毫米波电子器件、光电器件及其集成电路等是信息传输、转换、存储的关键,它们在信息传输容量、传输速度及性能稳定性方面都与化合物半导体材料的性能密切相关,与化合物半导体器件设计和工艺制作密切联系。化合物半导体材料可以通过调节各元素组份而获得不同性质的新型材料,可以具有不同的禁带宽度、光学性质和电学性质,成为微电子和光电子领域的关键性基础材料。由 GaAs 和 InP 及其相关 III-V 族化合物半导体材料研制的微波/毫米波器件、光电子器件等在信息的获取、传输、存储模块中已成为不可或缺的部分。

与传统的单异质结 HBT(SHBT)相比,双异质结 HBT(DHBT)具有开启电压低、反向击穿电压高、输出功率大等特点,尤其适用于微波/毫米波功率放大等电路。

但由于常规的 GaAs 基和 InP 基 DHBT 结构受集电结导带势垒尖峰的影响,使其输出特性变差,功率和频率特性降低。为了优化 GaAs 基和 InP 基 DHBT 材料结构、特别是集电结结构的设计,探索 GaAs 基和 InP 基 DHBT 的新结构,本文以气态源分子束外延(GSMBE)技术为手段,对新型结构 DHBT 材料的结构设计、外延生长与器件制备进行了深入的研究和探讨。全文共分为六章:

第一章,序言部分,简要介绍了本论文的研究背景;

第二章,文献综述部分,主要介绍了 MBE 技术的发展与现状及其在实际研究工作中的应用,总结了目前 HBT 的研究进展及今后的发展方向;

第三章,对集电结带有 n 型 InGaP 插入层的 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 和带有能带阶梯缓变 InGaAsP 复合集电区的 InP/InGaAs/InP DHBT 的电流传输特性进行了理论模拟和分析,优化了器件材料结构设计;

第四章,采用 GSMBE 技术,研究了 GaAs 基和 InP 基 DHBT 用各单层材料的生长特性,优化了生长条件;并在此基础上,设计和生长了新型结构 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 和 InP/InGaAs/InP DHBT 材料;

第五章,利用所生长的器件结构材料,对 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 和 InP/InGaAs/InP DHBT 器件进行了流片制作,并对所研制出的新型结构 DHBT 器件特性进行了测试分析;

第六章,给出了全文的总结和对今后工作的展望。

## 第二章 文献综述

### 2.1 III-V 族化合物半导体材料特性及其应用

新型III-V族化合物半导体材料及其器件的发明，促进了通信技术的迅速发展，使人类更快地进入了信息时代。随着科技的发展和人们生活水平不断提高，现代通信系统对材料与器件的性能要求越来越高，不但要求器件具有小的重量和体积、高的输出功率和功率附加效率，而且要求工作频率从超高频段发展到微波频段以至毫米波或更高的工作频段。这就需要有很好的外延生长手段，来满足对器件对材料的更高要求。分子束外延（MBE）技术就是一种非常好的材料生长手段，它可以把薄膜材料的厚度从微米量级推进到亚微米量级、纳米量级以至单原子层尺度，使人们能够采用能带裁剪工程设计材料与器件结构。

建立在半导体硅材料基础上的GeSi器件因受材料本征特性的限制，其实用工作频率一般无法满足现代通信系统要求的越来越高的频率及带宽。为解决硅材料的微电子物理性质极限和常规结构化合物半导体材料对信息载体速度的限制，一段时间以来人们的研究转向了GaAs基和InP基等新型III-V族化合物半导体材料。GaAs和InP是微电子和光电子的基础材料，为直接带隙材料，在超高速、超高频、低功耗、低噪音器件和电路，特别在光电子器件和光电集成方面占有独特的优势<sup>[2-9]</sup>。高电子迁移率晶体管（HEMT）、异质结双极晶体管（HBT）等超高速微波/毫米波器件等正是在此应用背景及技术手段支持下的产物。新型的微波/毫米波器件已广泛应用于微波通讯、遥测、雷达、导航、生物医学、电子对抗、人造卫星、宇宙飞船等各个领域<sup>[10-15]</sup>。随着微波/毫米波半导体器件工作频率的进一步提高、功率容量的增大、噪声的降低以及效率和可靠性的提高，特别是集成化的实现，将使微波电子系统发生新的变化<sup>[16-20]</sup>。表2.1给出了IEEE标准微波频带。

表 2.1 IEEE 标准微波频带

| Designation | Frequency Range (GHz) | Wave Length (cm) |
|-------------|-----------------------|------------------|
| VHF         | 0.1-0.3               | 300.00-100.00    |
| UHF         | 0.3-1.0               | 100.00-30.00     |

|               |              |             |
|---------------|--------------|-------------|
| L band        | 1.0-2.0      | 30.00-15.00 |
| S band        | 2.0-4.0      | 15.00-7.50  |
| C band        | 4.0-8.0      | 7.50-3.75   |
| X band        | 8.0-13.0     | 3.75-2.31   |
| Ku band       | 13.0-18.0    | 2.31-1.67   |
| K band        | 18.0-28.0    | 1.67-1.07   |
| Ka band       | 28.0-40.0    | 1.07-0.75   |
| Millimeter    | 30.0-300.0   | 1.00-0.10   |
| Submillimeter | 300.0-3000.0 | 0.10-0.01   |

表 2.2 Si、Ge 及 III-V 族化合物半导体的相关物理参数 (300K)

| 物理参数                      | Si                    | Ge                    | GaAs              | InAs                 | AlAs     | InP                | GaP                |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|----------|--------------------|--------------------|
| 带隙宽度 (eV)                 | Indirect              | indirect              | Direct            | direct               | indirect | Direct             | indirect           |
| 0 K                       | 1.170                 | 0.744                 | 1.519             | 0.42                 | 2.229    | 1.424              | 2.350              |
| 300 K                     | 1.124                 | 0.664                 | 1.424             | 0.354                | 2.168    | 1.344              | 2.272              |
| 介电常数 $\epsilon_r$         | 11.9 $\epsilon_0$     | 16.2 $\epsilon_0$     | 13.1 $\epsilon_0$ | 15.15 $\epsilon_0$   | 10.9     | 12.56 $\epsilon_0$ | 11.11 $\epsilon_0$ |
| 本征浓度 ( $\text{cm}^{-3}$ ) | $1.02 \times 10^{10}$ | $2.33 \times 10^{13}$ | $2.1 \times 10^6$ | $1.3 \times 10^{15}$ |          | $1.2 \times 10^8$  |                    |
| 晶格常数 (Å)                  | 5.4310                | 5.6579                | 5.6533            | 6.0584               | 5.6600   | 5.8688             | 5.4505             |
| 少子寿命 (s)                  | $2.5 \times 10^{-3}$  | $10^{-3}$             | $\sim 10^{-8}$    |                      |          |                    |                    |
| 电子                        | 1450                  | 3900                  | 9200              | $2-3.3 \times 10^4$  |          | 5370               | 160                |
| 空穴                        | 370                   | 1800                  | 400               | 100-450              |          | 150                | 135                |

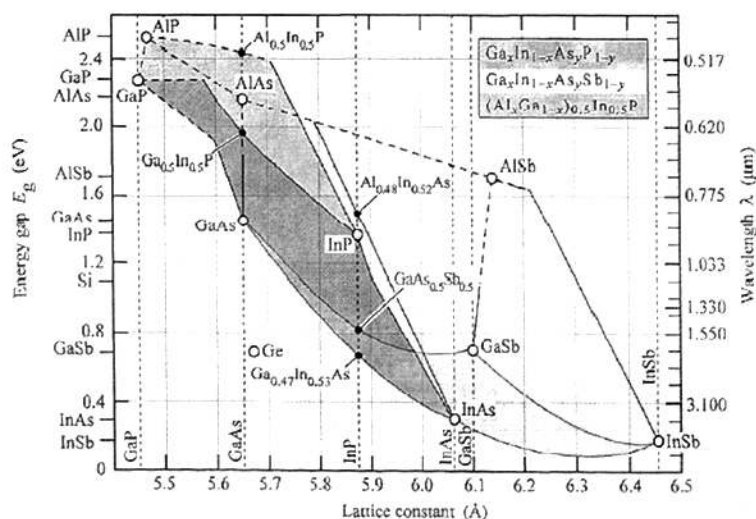


图 2.1 部分 III-V 族化合物及其合金的禁带宽度和晶格常数的关系

GaAs 基和 InP 基 III-V 族化合物半导体及其组成的三元、四元混晶材料，可以通过调节组份组成的方法调节禁带宽度和晶格常数等物理性质，从而使 III-V 族化合物半导体材料覆盖了电磁波谱的大部分波段，成为微波领域的关键性基础材料。表 2.2 给出了 Si、Ge 及部分 III-V 族化合物半导体材料在 300K 时的相关物理性能参数。图 2.1 给出了 III-V 族化合物半导体晶格常数与能隙宽度的关系。在 III-V 族化合物半导体材料与器件的设计中，通过对晶格常数、禁带宽度等参数进行选择和优化，可以获得多种异质结外延结构。通过外延方式的选择和材料生长条件的优化，材料与器件的结构设计生长可具有很大的选择余地。

进入 20 世纪 90 年代后，由于 MOCVD 和 MBE 技术的发展，以及化合物材料和异质结工艺的日趋成熟，三端微波器件取得令人瞩目的成就，使得异质结双极型晶体管以及高电子迁移率晶体管结构的各种器件性能逐年提高。与此同时，在此基础上构成的 MMIC 技术已实用化，并进入商品化阶段，不仅能获得大功率、高效率而且噪声系数小。微波领域常用器件有场效应晶体管 (FET)、高电子迁移率晶体管 (HEMT) 和异质结双极晶体管 (HBT) 等。FET 具有成熟的工艺，能实现亚微米量级的栅长，成本较低，在低噪声模拟电路和低功耗数字电路方面表现良好。HBT 主要由化合物半导体或合金半导体构成，需要两种禁带宽度不同的材料分别作为发射区和基区，宽带隙材料作发射区，窄带隙材料作基区。而在双异质结 HBT (DHBT) 中，集电区与基区材料带隙也不相同。HBT 在高速、大动态范围、低谐波失真、低相位噪声并重的电路应用中占据独特而重要的地位。HBT 采用宽禁带发射区，允许基区高掺杂，可同时获得高截止频率、高增益、高效率，且具有较高的击穿电压，非常适合于功率放大电路应用。HBT 具有线性度高的优点，无需加漏极开关来使器件关断，在低静态电流状态下比较容易调整。目前，HBT 技术已被广泛应用于制作光纤通信系统中激光器和调制器的驱动电路<sup>[21]</sup>。

表 2.3 微波三端器件概况

| 名称      | 类型       | 材料   | 工作原理            | 主要功能            | 结构特点 |
|---------|----------|------|-----------------|-----------------|------|
| 微波双极晶体管 | PN 结三端器件 | Si   | 由电流控制对输入信号的放大作用 | 低噪声放大、功率放大、微波振荡 | 窄线条  |
| 微波功率    | 金属半导体接   | GaAs | 由电压控制的对输入信号     | 低噪声放大、功率        | 台面型  |

| MESFET         | 触三端器件     | SiC             | 的放大作用                                 | 放大、微波振荡         | 平面型       |
|----------------|-----------|-----------------|---------------------------------------|-----------------|-----------|
| 微波异质结双极晶体管 HBT | 异质结三端器件   | GaAs, InP, GeSi | 由电流控制输入信号的放大作用                        | 低噪声放大、功率放大、微波振荡 | 宽禁带发射区异质结 |
| 高电子迁移率晶体管 HEMT | 异质结场效应晶体管 | GaAs, GaN       | 由电压控制高电子迁移率 2DEG 浓度和运动和变化实现输入信号的控制和变化 | 低噪声放大、功率放大、微波振荡 | 异质结台面型平面型 |

## 2.2 HEMT 材料与器件的研究及发展

1960 年, Anderson 预言在异质结界面存在电子的积累。1969 年, Easki (江崎) 和 Tsu (朱兆祥) 提出在异质结结构中, 离化的施主杂质和自由电子是分离的。1978 年, Dingle 等在调制掺杂的超晶格中观察到了载流子迁移率增加的现象。而后, 又在调制掺杂的 GaAs/n-AlGaAs 单异质结和超晶格结构的实验中, 证明了异质结界面存在着具有二维行为的电子气, 并具有高的迁移率。1980 年, 日本富士通公司研制出世界上第一只 HEMT<sup>[22]</sup>。HEMT 兼有优异的低噪声特性和出色的功率性能, 在高端市场具有很强的竞争力。国外已有高性能的 HEMT 器件产品走向市场, 其中比较成熟的是基于 AlGaAs/GaAs 材料体系的 HEMT 器件。利用 AlGaAs/InGaAs 异质结构及 InGaAs 沟道二维电子气 (2DEG) 特性研制的赝配高电子迁移率晶体管 (PHEMT) 也已被广泛用于微波毫米波接收系统。InP 基 HEMT 在超过 300GHz 的频率都有增益, 且其短沟道效应很小, 制造步骤少, 性能均匀稳定, 器件的截止频率  $f_T$  和最高振荡频率  $f_{max}$  分别可达 340GHz 和 600GHz, 已成为毫米波高端应用的支柱产品<sup>[23]</sup>。经过 20 多年的发展, 目前已成为毫米波最重要的固态器件和 MIMIC 的核心部分。

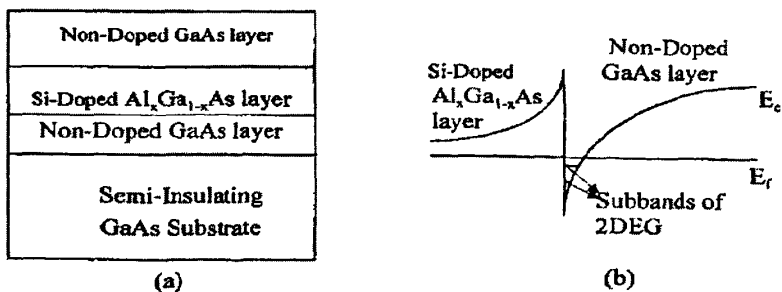


图 2.2 调制掺杂的 n-AlGaAs/GaAs 异质结: (a) 结构示意图 (b) 能带示意图

HEMT 是在 AlGaAs/GaAs 异质结构的基础上发展起来的, 它的诞生直接得益于调制掺杂技术。如图 2.2 中, (a)是调制掺杂的  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  异质结构示意图。在宽带隙的  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  中掺以施主杂质, 而在窄带隙的 GaAs 层中不掺杂。宽带隙的  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  中电子将向窄带隙的 GaAs 中转移, 以便两者的费米能级能达到同一水平。在宽带隙的  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  一侧将形成电子的耗尽层 (只要  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  层足够薄, 其中的电子可以是完全耗尽的), 它将产生强电场, 从而导致窄带 GaAs 材料的能带发生弯曲, 形成一个类三角形势阱, 在窄带隙 GaAs 一侧积累的电子便束缚在这个势阱中。三角形势阱中的电子在垂直界面的方向上运动是量子化的, 而在平行界面的方向上电子运动是自由的, 所以它是一种二维电子气体系 (如图 2.2 (b)所示)。调制掺杂异质结可以使 GaAs 层中有很高的电子浓度, 但不含有电离施主杂质, 也就是说二维电子气与其母体 (即 AlGaAs 层中的电离施主) 在空间中分离开来, 除了界面附近的电离施主仍有一定的散射作用外, 总体上来讲电子受电离杂质的散射大大减弱, 从而使载流子的迁移率尤其是低温下的迁移率大大提高。如果在掺杂的  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  层和本征的 GaAs 层之间再生长一层很薄的 (约  $50\text{\AA}$  到  $100\text{\AA}$ ) 本征  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  隔离层, 电子迁移率还可以进一步得到改善, 在此基础发展出了高电子迁移率晶体管 (HEMT)。

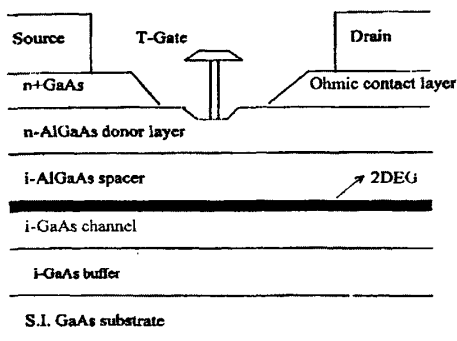


图 2.3 GaAs 基 HEMT 结构示意图

传统的 GaAs 基 HEMT 的典型结构如图 2.3 所示。在半绝缘的 GaAs 基片上依次生长高纯非掺杂的 GaAs 缓冲层、GaAs 沟道层、非掺杂的 AlGaAs 隔离层、n 型 AlGaAs 载流子提供层和 n 型重掺杂 GaAs 欧姆接触层。各层的作用分别为：有源沟道是在非

掺杂的 GaAs 缓冲层的上表面形成的, 缓冲层生长在 GaAs 衬底上, 该层典型的厚度是  $1\mu\text{m}$ 。在有源沟道的顶部有个薄的非掺杂的 AlGaAs 隔离层, 其作用是将沟道电子与掺杂离子在空间上分开, 从而减少电离杂质的散射, 提高二维电子气的迁移率。很明显, 隔离层越厚, 隔离效果越好, 也就越有利于二维电子气迁移率的提高。但如果隔离层太厚, 从掺杂层转移到沟道的载流子将减少, 会降低二维电子气的浓度。因此在材料设计的时候要同时考虑载流子浓度和迁移率, 在二者之间进行折衷。在隔离层上面的是掺杂的 AlGaAs 层, 它给导电沟道提供电子, 同时作为肖特基栅和二维电子气层之间的高质量的电介质材料, 其典型厚度为 35-50nm。最上面的是高掺杂的 GaAs 盖帽层, 它提供 AlGaAs 的钝化保护, 并给 HEMT 提供低电阻的欧姆接触, 源、漏电极便制作在  $n^+$ -GaAs 的盖顶层上。电流是在具有欧姆接触的源和漏之间流动的, 栅极偏压决定着沟道内的载流子浓度, 因而控制着源漏电流。

第一代的 HEMT 出现后, 人们又利用能带工程围绕异质结中的宽禁带势垒层, 窄禁带沟道层以及缓冲层开展了大量的工作。为得到大电流和高跨导, 需提高异质结的导带不连续值  $\Delta E_c$ , 以增强其对沟道载流子的限制作用, 同时缩小沟道层材料的禁带宽度以降低载流子的有效质量, 提高载流子的迁移率。最初的 HEMT 是用 GaAs 作为沟道, 而后又用禁带更窄的 InGaAs 作为沟道。从而出现了 GaAs 基体上晶格匹配的  $n$ -AlGaAs/InGaAs/GaAs 结构, 通常称为 Pseudomorphic HEMT, 即 PHEMT。PHEMT 与传统的 GaAs 基 HEMT 相比有两个主要优点: 一是 InGaAs 比 GaAs 有更高的电子迁移率和峰值漂移速度; 二是 InGaAs 的带隙比 GaAs 的窄, 在满足器件要求的 AlGaAs/InGaAs 异质结界面导带不连续值  $\Delta E_c$  的条件下, PHEMT 中  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  层的  $x$  值可以比传统 HEMT 中的低, 因而不仅可以获得更高的二维电子气密度, 而且可以有效降低 DX 中心的不利影响。

GaAs 基 PHEMT 的 InGaAs 沟道层与 GaAs 基体的晶格不匹配, In 组份的上限只能到 0.2 左右。为了进一步提高 In 组分, 获得更高的电子迁移率, 很快就发展了以  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  为沟道层, 势垒层材料为  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  的 InP 基晶格匹配的  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  HEMT, 而后又出现了 InP 基高 In 组份 ( $x>0.53$ ) 的应变 HEMT, 即 InP 基 PHEMT。与 GaAs 为衬底的 AlGaAs/InGaAs PHEMT 相比, InAlAs/InGaAs/InP HEMT 在 InAlAs/InGaAs 异质结界面具有更大的导带不连续值 ( $\sim 0.51\text{eV}$ ), 对载流子具有更好的限制作用。另外, Si 在 InAlAs 中有更高的掺杂效

率,因而可以得到更高的二维电子气密度。同时,随沟道层 In 组份的增加,沟道中电子的速度、迁移率也增加,因而 InP 基 HEMT 有更高的跨导和增益。由于 InP 基 HEMT 非常优越的高频、低噪声性能,近年来已成为 HEMT 器件的主流,被公认为是最适用于毫米波段高端的低噪声器件之一。

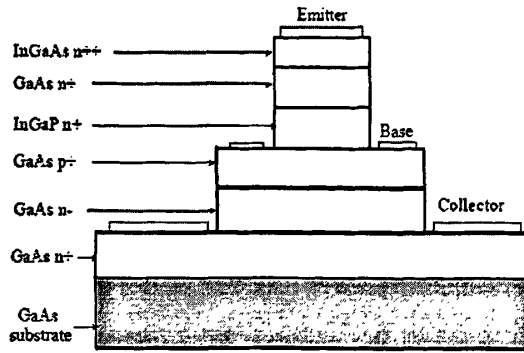
表 2.4 HEMT 材料的分类 (LM-lattice match, P-pseudomorphic, MM-metamorphic)

| 名称             | 衬底   | 势垒层                                         | 沟道层                                             |
|----------------|------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| GaAs 基 LM-HEMT | GaAs | AlGaAs                                      | GaAs                                            |
| GaAs 基 P-HEMT  | GaAs | AlGaAs                                      | $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}(x < 0.25)$ |
| InP 基 LM-HEMT  | InP  | $\text{In}_{0.48}\text{Al}_{0.52}\text{As}$ | $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$     |
| InP 基 P-HEMT   | InP  | InAlAs                                      | $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}(x > 0.53)$ |
| GaAs 基 MM-HEMT | GaAs | InAlAs                                      | $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}(x > 0.3)$  |

随着近几年对 InP 基 HEMT 的大力开发和研制, InP 基 HEMT 已成为毫米波高端应用的支柱产品。通常 InP 基 HEMT 采用的 InGaAs/InAlAs 结构, 沟道中 In 的摩尔分数是 53%, 而赝配的 InGaAs 沟道中 In 含量可以达到 80% 以上。有报道 In 含量为 68% 的赝配 InGaAs 沟道 HEMT, 其  $f_{\text{max}}$  达到 600 GHz<sup>[23,24]</sup>。2007 年在 IEDM 会议上的最新报道, 美国 UIUC 大学宣布研制出  $f_T$  为 1.2 THz 的 InP 基 PHEMT, 这是迄今为止的最高记录<sup>[25]</sup>。近几年, InP 基 HEMT 已经在各种高速和微波单片电路中得到了很好的应用, 目前对这一器件的深入研究主要是提高器件的功率性能和可靠性, 同时引入新的沟道设计, 进一步提高器件的性能。

### 2.3 HBT 材料与器件的研究及发展

早在 1951 年, Shockley 就首先提出了宽发射结原理<sup>[1]</sup>。1957 年, Kroemer 进一步系统阐述了 HBT 的原理, 指出宽禁带发射区能提高注入效率, 抑制基区载流子的反向注入, 大大提高电流增益, 同时可以通过高掺杂的基区和稍低掺杂的发射区来减小结电容和基区电阻, 从而提高晶体管的频率特性<sup>[26]</sup>。但由于材料生长技术的限制, 直到二十世纪七十年代初, Dumke 等人才第一次利用液相外延 (LPE) 技术成功制作出 AlGaAs/GaAs HBT<sup>[27]</sup>。进入 70 年代后, 随着 MOCVD、MBE 等薄膜材料生长技术的诞生和发展, HBT 的优良性能才得以充分实现。此后各种材料体系纷纷涌现, HBT 性能不断提高, HBT 器件与电路得到迅速发展。



GaAs InGaP HBT Schematic

图 2.4 台面结构 HBT 示意图

图 2.4 为台面结构 HBT 的示意图。自从 HBT 出现以后，主要有三种材料体系 GeSi、GaAs 和 InP 用于 HBT 器件的制备，这三种材料体系均可应用于微波和毫米波领域。就频率特性而言，从低到高的排列为 SiGe 体系、GaAs 体系和 InP 体系，其制造成本从低到高依此为 SiGe 体系、GaAs 体系和 InP 体系。SiGe 体系由于与 Si 工艺兼容，并且成本低廉，在价格上占有很大的优势。GaAs 体系由于高可靠性及相对成熟的工艺，使得它在微波及毫米波领域有着广泛的应用。目前，研究最多和市场应用最广泛的仍然是 GaAs 基 HBT 及其相关电路。InP 体系则在 SiGe 和 GaAs 材料很难达到的频率范围内成为首选材料，但是其价格要比 SiGe 和 GaAs 材料高很多。在结构上，减少基区和集电区的厚度是提高器件频率特性的有效方法。但是，由于击穿电压和工艺水平的限制，不可能无限制地减少基区和集电区厚度，因此器件所用的材料和结构就决定了其所能达到的最高频率。在材料和结构选定后，从工艺上可以采取以下措施减少寄生电容以提高频率特性：（1）采用自对准工艺；（2）离子注入外基区下的集电区；（3）把  $\text{SiO}_2$  和多晶 GaAs 埋入外基区下的收集区；（4）微空气桥连接；（5）氮化硅平面化；（6）用选择腐蚀的方法去掉部分外基区下的收集区；（7）用聚酰亚胺平面化过程来减少  $C_{BC}$  [28]。

人们在追求高频特性的同时，也在不断提高器件的性能，最近的研究就聚焦在引进新材料和采用新结构来提高器件特性上。本节着重介绍 SiGe、GaAs 基和 InP 基 HBT 的新进展及对器件性能的改善，并讨论各结构的适用范围和优缺点。

表 2.5 常用 HBT 的材料体系

| 材料     | 优点                                                                      | 缺点         |
|--------|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| SiGe 系 | 能与 Si 技术兼容，成本低。                                                         | 击穿电压较低     |
| GaAs 系 | 更好的高频特性，损耗小、噪声低、频带宽、功率大和附加效率高，抗电磁辐射能力强，工作温度范围宽，适合在恶劣的环境下工作；研究最多，市场应用最广泛 | 开启电压较高     |
| InP 系  | 在超高频率性能上具有优势                                                            | 成本高        |
| GaN 系  | 击穿电场比 GaAs 或 InP 高，适于高功率微波和毫米波的应用                                       | 起步阶段，技术不成熟 |

### 2.3.1 GeSi 基 HBT 的研究

1987 年, Lyer 和 Patton 等首次发表了用 MBE 技术成功研制出  $\text{Si}_{0.88}\text{Ge}_{0.12}$  基区 HBT<sup>[29-30]</sup>, 使 SiGe 合金 HBT 受到关注。近年来, 基于 SiGe 的 HBT 器件较好地解决了材料问题, 并因其与 Si CMOS 器件工艺兼容, 使得 SiGe HBT 能够高度集成。SiGe 合金的带隙可根据组份的变化自由调节, 其电子和空穴的迁移率也比 Si 中的高。以宽禁带的 Si 作为 HBT 的发射区、窄禁带的 SiGe 作为基区的 Si/SiGe HBT 可获得比传统的 Si BJT 更高的频率特性, 且 SiGe 技术与硅超大规模集成电路制造工艺的兼容性, 使其在成本与性价比方面具有极大的优势。与 GaAs 基器件相比, 硅基 Si/SiGe HBT 材料还具有导热性好、机械性能好等优点, 因此硅基 Si/SiGe HBT 得到了一定的关注。但是 GeSi HBT 的缺点是器件的击穿电压小, 高频特性也不是很理想。

### 2.3.2 GaAs 基 HBT 的研究

GaAs 体系是目前 III-V 族化合物半导体材料体系中制备工艺比较成熟的一种, 且其 HBT 器件的击穿电压要高于 GeSi, 高频特性也要更好。与 Si 相比, GaAs 具有如下优点: (1) GaAs 饱和电子漂移速度是 Si 的两倍 (外加电场  $10\text{kV/cm}$  时), 低电场电子迁移率一般在  $4000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  以上, 大约比 Si 的迁移率高 6 倍 (杂质浓度  $1.0\text{E}17\text{cm}^{-3}$  时), 因此可用于更高速的器件; (2) GaAs 是直接带隙材料, 禁带宽度 ( $1.43\text{eV}$ ) 比 Si ( $1.12\text{eV}$ ) 的大, 因而器件的抗电磁辐射能力强, 工作温度范围宽, 可在 Si 器件难

以胜任的恶劣环境下工作；(3) GaAs 电路损耗小，噪声低，频带宽，动态范围大，功率大，附加效率高；(4) GaAs 是直接跃迁型材料，可以发光，便于实现光电集成；(5) 通过添加 Cr 或 Fe 之类的杂质或利用构成元素的空位结晶缺陷在 GaAs 的禁带中形成深能级，电阻率可达  $1.0\text{E}7\sim 1.0\text{E}9\Omega\cdot\text{cm}$ ，在这种半绝缘衬底上制作微波无源器件，可以减少器件间的隔离电容和布线电容等寄生参数。

由于各组份的  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  材料均能与 GaAs 实现晶格匹配，因此，最初的 GaAs HBT 的发射区采用  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 。但 Al 很容易形成深能级复合中心，使器件的性能尤其是可靠性下降。采用与 GaAs 晶格匹配的  $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$  代替  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  作为 GaAs HBT 的发射区，能得到比  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  发射区更优越的直流和频率特性。并且 InGaP/GaAs HBT 有很高的可靠性。但美中不足的是，这种 HBT 的  $V_{\text{on}}$  大， $V_{\text{offset}}$  和  $V_K$  也较大，使得它的功耗大，限制了在低功耗方面的应用。为了解决这个问题，InGaP/GaAsInGaP DHBT 受到了广泛的关注，因为在 DHBT 中集电区也采用宽禁带的 InGaP 材料，所以可以降低开启电压，增大反向击穿电压，适合于大功率器件的应用。

GaAs 与  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$  之间具有良好的选择腐蚀性，可以使器件的制备工艺更容易控制和使工艺过程更稳定。目前的 InGaP/GaAs HBT 材料结构多在集电区 ( $n^+$ -GaAs) 和亚集电区 ( $n^+$ -GaAs) 之间生长一薄层  $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$  作为腐蚀截止层。文献对这种器件的直流特性与腐蚀截止层掺杂浓度的关系进行了研究<sup>[31]</sup>，发现直流增益与亚集电区及腐蚀截止层的掺杂浓度有关，当亚集电区的掺杂浓度为  $6\sim 7\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 、腐蚀截止层的掺杂浓度为  $6\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$  时，可以得到最大直流增益。InGaP/GaAs HBT 典型的电流增益超过 100，且小电流时的电流增益比 AlGaAs/GaAs HBT 的大。即使在  $I_C=10\text{nA}$  时，电流增益仍可达到  $10^{[32]}$ 。在  $J_C=25\text{kA}/\text{cm}^2$ 、 $V_{\text{ce}}=2.0\text{V}$ 、环境温度  $200^\circ\text{C}$  的情况下，电流增益也只在最初时下降了 7—10%，但这个值一直到 10000 小时仍是稳定的<sup>[33]</sup>，说明 InGaP/GaAs HBT 具有良好的可靠性。

在对 InGaP/GaAs HBT 的研究过程中，人们在不断地尝试用各种新结构去提高其频率特性。比如，用组份渐变的  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  基区可以减少基区渡越时间，提高频率特性<sup>[34]</sup>；采用  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InGaP}$  复合发射区可以减少 B-E 结的电容，使截止频率  $f_T$  由 InGaP 发射区的 45GHz 提高到 62GHz<sup>[35]</sup>。减少基区和集电区的厚度也是提高器件频率特性的一种非常有效的方法。当 InGaP/GaAs HBT 的基区厚度降到 30nm、集电区减薄至 200nm 时，发射极面积为  $0.5\times 4.5\mu\text{m}^2$  的器件在集电极电流为 3.5mA 的条件

下，截止频率  $f_T$  的最大值可达 156GHz，最高振荡频率  $f_{\max}$  的最高值为 256GHz<sup>[36]</sup>。

降低表面缺陷密度或减少耗尽区的本征载流子密度  $n_i$ ，可以使 HBT 器件的  $V_{\text{offset}}$  减小<sup>[37]</sup>。但是降低 GaAs 中的陷阱密度是很困难的，而在集电区采用宽禁带半导体材料很容易减少  $n_i$ ，使  $V_{\text{offset}}$  降低，但这会在 B-C 结产生一个阻挡电子运动的导带势垒尖峰。同时，由于导带势垒的存在，也会使 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 发射区的电阻增加， $V_k$  加大。降低  $V_{\text{offset}}$  的另一个方法是应用宽带隧道势垒二极管，即在集电区靠近 B-C 结处生长一薄层 InGaP 势垒去抑制空穴进入集电区，从而使  $V_{\text{offset}}$  和  $V_k$  降低。如果这层 InGaP 势垒的厚度可以使电子穿过或产生热发射，就可  $V_k$  减小。同时，如果此层 InGaP 势垒的厚度足以阻挡空穴注入到 GaAs 集电区的话，在耗尽区和 n 型 GaAs 表面载流子的复合将减小， $V_{\text{offset}}$  也会降低。另外，通过降低基区的禁带宽度，也可以使  $V_{\text{on}}$  减少<sup>[38-41]</sup>。如果把基区换成禁带宽度为 1.2eV 的  $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}_{0.99}\text{N}_{0.01}$ ， $V_{\text{on}}$  的值可以降低到 0.81V<sup>[38,39]</sup>。

近来，以  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{N}_{1-y}$  材料作为基区材料开始受到人们关注。把少量的 N 掺入 GaAs 中，可使 GaAs 材料的晶格常数降低，禁带宽度变小，同时导带和价带降低。另一方面，将 In 掺入 GaAs 后，可使其晶格常数增加，导带降低，价带升高，禁带宽度减小。在 GaAs 中同时掺入适量的 In 和 N，就可以得到与 GaAs 晶格匹配、而禁带宽度比 GaAs 小的材料  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{N}_{1-y}$ <sup>[41-43]</sup>。In、N 的作用结果将使  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{N}_{1-y}$  材料的导带比 GaAs 的导带低，而价带水平  $E_v$  将取决于 In、N 的比例。

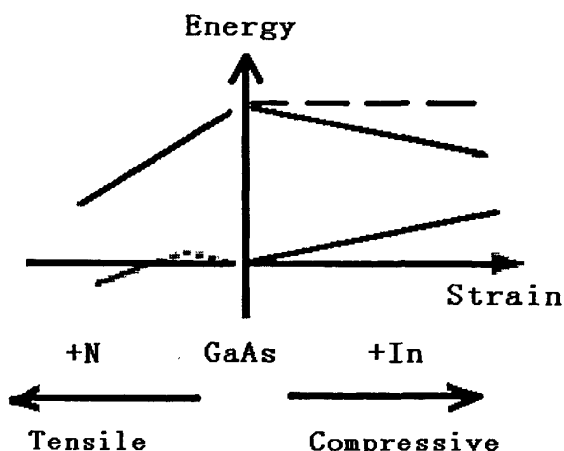


图 2.5 GaAs 中掺入 In 和 N 对其导带及价带边的影响

对于  $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}_{0.99}\text{N}_{0.01}$  材料, 其禁带宽度为 1.2eV, 与 GaAs 的导带不连续性较大, 而价带不连续性几乎可以忽略<sup>[44]</sup>。用  $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}_{0.99}\text{N}_{0.01}$  材料作为基区的优点是  $V_{on}$  较低, 使得  $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}_{0.99}\text{N}_{0.01}$  材料有在低功耗器件中应用的潜力。另外, 它的能带排列更适合于制备 pnp HBT, 它的缺点是电子迁移率较小, 对外延技术的要求也比较高, 材料的质量还不理想, 使得基区电阻较大, 频率特性也受到影响。

### 2.3.3 InP 基 HBT 的研究

目前, 基于 InP 材料体系的 HBT 器件被公认为是速度最快的晶体管, 因此成为国际上的研究前沿<sup>[45,46]</sup>。与 SiGe 和 GaAs 材料体系相比, 在具有较高  $f_T$  的同时, InP 体系的 HBT 仍具有较大击穿电压, 其双异质结器件 (DHBT) 更是表现出诱人的特性。另外, 以 InP 为衬底的材料较 Si、GaAs 衬底有着独特的优点: 首先, InP 与 Si 和 GaAs 相比, 具有更高的电子饱和速度, 基于 InP 衬底的晶体管是目前速度最快的; 其次, 它还与目前常用的光通信用光电器件衬底兼容, 易于实现光电集成。

最早出现的是基于 InP 衬底的单异质结 HBT (SHBT)。由于与 InP 匹配的  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  材料比 GaAs 有更高的电子迁移率, 所以已经制造出截止频率超过 200GHz 的 InP/InGaAs 和 AlInAs/InGaAs 单异质结 HBT。但是由于窄带集电区载流子的碰撞电离几率很高, 导致 SHBT 的击穿电压很低而输出电导很高。后来, 考虑了采用宽禁带材料作为集电区的 DHBT 结构来改善击穿特性。在 DHBT 结构中, 集电区一般采用 InP 或者与 InP 晶格匹配的  $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$  材料, 通过减小集电区碰撞电离率增大击穿电压。但是, 由于 InGaAs 基区与 InP 集电区材料之间存在较大的导带不连续性 ( $\Delta E_c=0.25\text{eV}$ ), 因此在 DHBT 的 B-C 结处会存在由于导带势垒尖峰而导致的电子阻挡效应 (如图 2.6 所示) <sup>[45,47-50]</sup>。

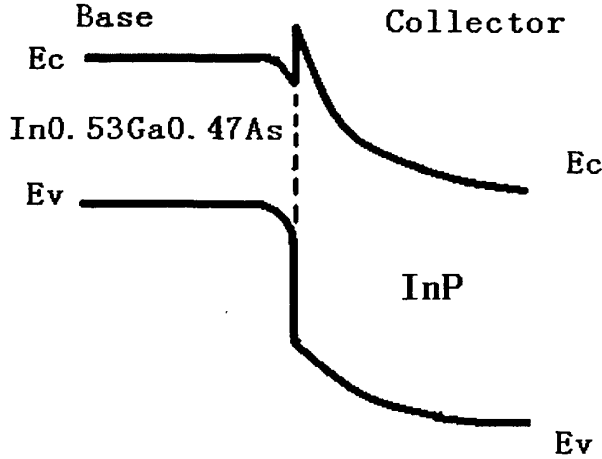


图 2.6 InP/InGaAs/InP DHBT 的 B-C 结存在电子阻挡效应

B-C 结的电子阻挡效应将引起载流子在基区的积累, 增强基区载流子的复合, 使基区有效的电子迁移率减小, 电子在基区停留的时间延长, 极大地减小了  $f_T$ , 从而导致器件性能的退化。为了克服电子阻挡效应, 集电结需要设计成特殊的结构。一种方法是采用复合集电结结构。在这种结构中, 集电区包含两种以上不同的材料, 比如在基区和集电区之间生长 InGaAs 层和不同厚度和掺杂浓度的 InP 层, 这种结构 DHBT 的  $BV_{CE0}$  可达 11V。与相近结构的 SHBT 相比, DHBT 没有软击穿, 而且它的击穿电压得到了很大的提高<sup>[32]</sup>。另外一种方法是在 BC 结中间生长一层或者多层组份渐变层以实现能带的渐变, 如插入不同组份的 InGaAsP 四元系材料, 以达到能带渐变的作用, 来克服 BC 结的电子阻挡效应。除此之外, 还可以通过采用新型基区材料, 把 B-C 结设计成无电子阻挡效应的 Staggered 结构 (如图 2.7 所示)。比如, 在晶格匹配情况下的  $\text{InP}/\text{GaAs}_{0.51}\text{Sb}_{0.49}/\text{InP}$  DHBT 结构中就不存在导带的势垒尖峰 (其能带结构如图 2.8 所示<sup>[51]</sup>)。若采用  $\text{GaAs}_{0.51}\text{Sb}_{0.49}$  作为 InP 基 DHBT 的基区材料, 其禁带宽度为 0.72eV, 导带底比 InP 的高 0.15eV<sup>[52-54]</sup>, 这种能带排列的结果就消除了 B-C 结的电子阻挡效应, 电子到达 B-C 结后会被射入 InP 集电区。同时, 它与 InP 的价带不连续性  $\Delta E_v$  为 0.81eV, 如此大的  $\Delta E_v$  也可有效阻止空穴反向注入到 InP 发射区。并且由于其禁带宽度只有 0.72eV, 所以 DHBT 的  $V_{on}$  也可以减小。

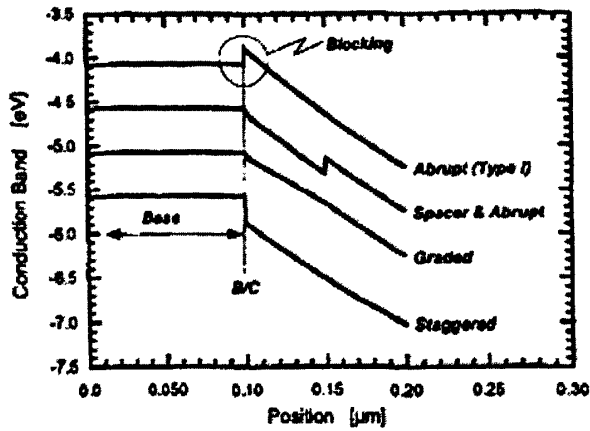


图 2.7 几种 InP 基 DHBT 集电结设计的导带示意图

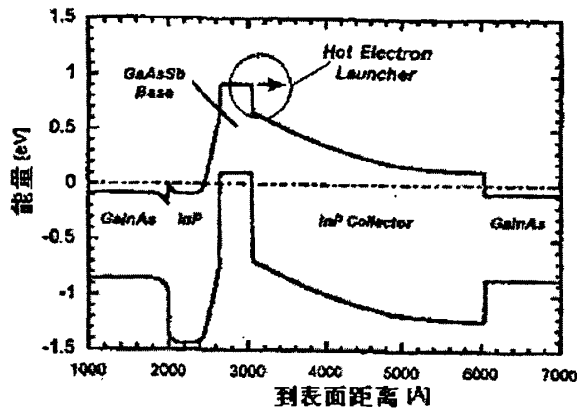


图 2.8 InP/GaAsSb/InP DHBT 的能带结构示意图

## 2.4 分子束外延技术

分子束外延 (molecular beam epitaxy, MBE) 是制备多层超薄单晶薄膜的外延技术, 已经扩展到半导体材料、超导材料、金属材料、介质材料等多种材料体系, 成为现代外延生长技术的重要组成部分, 对当今微电子、光电子技术的发展起着巨大的推动作用。MBE 技术是美国贝尔实验室的卓以和博士于 1970 年提出的<sup>[55]</sup>。1958 年, Guthrie 用“三温度”法生长出 III-V 族化合物半导体单晶薄膜<sup>[56]</sup>。1968 年, Davey 和 Pankey 改进了真空条件, 成功地在 GaAs 单晶衬底上生长了外延薄膜<sup>[57]</sup>。1970 年,

Arthur 研究了 Ga 和 As 在 GaAs 表面的动力学行为, 了解了其中的生长机理<sup>[58]</sup>。七十年代初期真空设备商品化以后, MBE 技术得到广泛的应用。随着 MBE 设备的改进和完善, 很多检测设备如反射式高能电子衍射 (RHEED)、俄歇电子能谱 (AES) 等被用于材料生长监控, 生长出了优质的 III-V 族化合物半导体薄膜材料, 真正意义上的分子束外延技术从此才开始大规模应用于科研与生产领域。

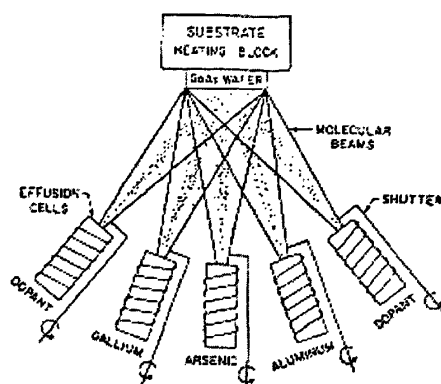


图 2.9 分子束外延原理示意图

与 LPE 和 VPE 生长机制遵从的热力学平衡条件不同, MBE 生长过程基本上遵从动力学规律。它是在超高真空的环境中, 多种组元的加热分子束喷射到受热的衬底表面, 在衬底表面进行吸附、迁移而淀积生成单晶薄膜。MBE 的基本原理如图 2.9 所示。从图中可以看出, 每个 MBE 系统的核心部分可以分为三个区域: 第一个区域是分子束产生区, 即束源炉; 第二个区域是接近衬底表面、各分子或原子束的交叠混合区; 第三个区域是衬底表面, 即发生结晶过程的区域。

在第一个区域中, 分子束从处于超高真空条件下加热的束源炉中产生, 束源炉的温度由比例—积分—微分 (PID) 控制器精确控制, 并通过热偶提供温度反馈。分子束流的大小由束源炉的温度决定, 其稳定度可达  $\pm 1\%$ 。

第二个区域是分子束的混合区。由于系统处于超高真空的环境里, 分子的平均自由程很长, 可以认为入射分子间没有发生碰撞或其它的相互作用。

真正的外延生长过程发生在第三个区域, 即衬底表面。MBE 生长过程包括了一系列的表面过程, 其中最主要的有: (1) 入射的组份原子或分子在衬底表面的吸附 (包

括物理吸附和化学吸附); (2) 吸附分子在表面的迁移和分解; (3) 组份原子与衬底或外延层晶格点阵的结合或在衬底表面成核; (4) 未与衬底结合的原子或分子的热脱附。图 2.10 是在 GaAs(100)衬底上外延 GaAs 的生长示意图。当 As 源为  $As_2$  时, 在衬底表面的粘附系数接近于 1; 当 As 源为  $As_4$  时, 部分源裂解为  $As_2$ , 所以  $As_4$  分子在衬底表面的粘附系数小于 0.5。因此, 在 MBE 生长中采用  $As_2$  源比  $As_4$  源有着更高的凝入率, 有利于高 As 组份材料的生长。

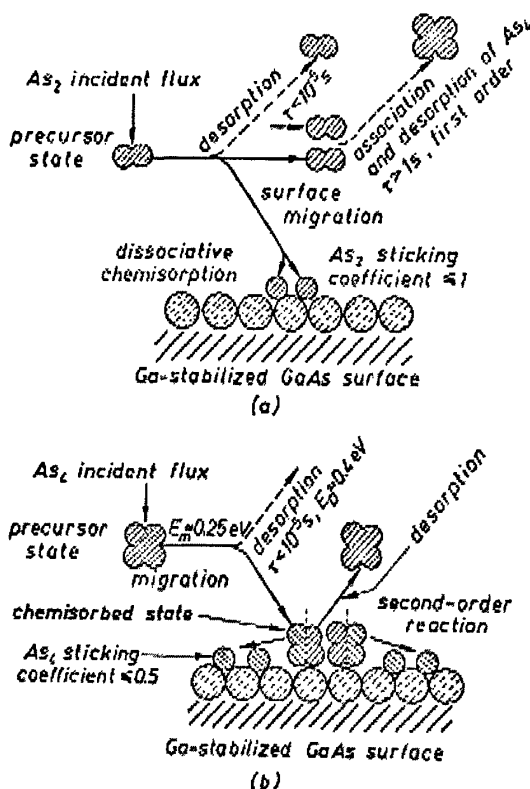


图 2.10 在 GaAs(100)衬底上外延 GaAs 的生长机制示意图

分子束外延技术与其它外延技术相比有许多的优点, 包括: (1) 高纯单晶的生长。因为在超高真空中生长, 束流的纯度很高, 受到外来污染影响的机会很小; (2) 生长速率高度控制。在 MBE 中, 外延层的组份和掺杂浓度受组份元素或掺杂剂的相对到达速率控制, 即受束源的蒸发速率控制。通过控制束流的相对强度, 可以生长几乎任意组份的合金半导体材料, 而且组份精确可控; (3) 生长温度低 (约 600-700℃), 消

除了体扩散对组份和掺杂浓度分布的干扰,而且可通过控制束源炉快门的开启或关闭达到突然喷射或者终止束流;(4)异质外延层表面光滑无裂隙。逐层生长机理排除了任何成核的过程,而且入射原子或分子在生长表面可进行充分的迁移,保证了薄膜晶体表面非常平整光滑;(5)可控制厚度的超薄层生长。一般情况下,MBE 的生长速率为  $0.1\mu\text{m}/\text{小时}$ — $2\mu\text{m}/\text{小时}$ 。如此低的生长速率保证了入射原子或分子在生长表面充分的迁移,因此用 MBE 技术生长的薄膜晶体表面非常平整,厚度精确可控;(6)MBE 是在非平衡态下生长,因此可以生长热力学机理控制的外延技术无法生长的处于不互溶隙范围内的多元系材料;(7)MBE 系统可以实现在线监控。通过反射式高能电子衍射(RHEED)、俄歇电子能谱(ASE)等实现在线监控,可以对材料的生长过程进行精确控制。

现在,用 MBE 技术生长的各种材料和器件已经被广泛应用于从科学研究到产品实用化的各个方面。而且随着 MBE 技术的提高,不断推进的材料物理和器件研究,将进一步推动半导体领域、信息领域等科学技术的发展。MBE 技术生长的 III-V 族高电子迁移率晶体管(HEMT)、异质结双极晶体管(HBT)、场效应管(HFET)、量子阱激光器(QWLD)等都已经进入了产业化并成为商品,被广泛应用于卫星通讯、移动通讯、光通讯、电子对抗、光电子对抗等信息系统中。而新器件结构的提出,材料、器件、物理三者的优化结合必将带来 MBE 技术的提高,最终将进一步推动半导体领域、信息领域、低维物理领域和纳米材料领域科学技术的大发展。

## 2.5 V90 型 GSMBE 系统简介

本论文中材料生长所用设备为英国 VG Thermo Semicon 公司生产的 V90 型 GSMBE 系统(如图 2.11 所示)。MBE 系统集成了超高真空、精密机械、自动控制和在线监测等多种技术手段于一身,其核心部分由样品进样室、预处理分析室和生长室组成,每个室之间由闸板阀隔开,以保证生长室的高度清洁和超高真空。

在本系统中,III 族固态源采用纯度为 7N 的 Ga、Al 和 In,掺杂剂为 7N 的 Si 和 5N 的 Be,同时配有  $\text{CBr}_4$  作为碳掺杂源。V 族束源采用气态的高纯砷烷( $\text{AsH}_3$ )和磷烷( $\text{PH}_3$ )。由于砷烷和磷烷在一般的生长条件下难以在衬底表面直接分解,所以需要采用高温裂解炉将其完全分解,形成  $\text{P}_2$  和  $\text{As}_2$  分子束流。V90 系统的 Ga 炉和

In 炉采用的是 Thermocell, 这样可以使得束流在炉口得到再次加热, 以减少生长材料表面的螺形缺陷。另外, V90 系统的样品传输有手动和自动两种模式, 并有两个进样室, 可分别装进样品和取出样品, 提高生长效率。

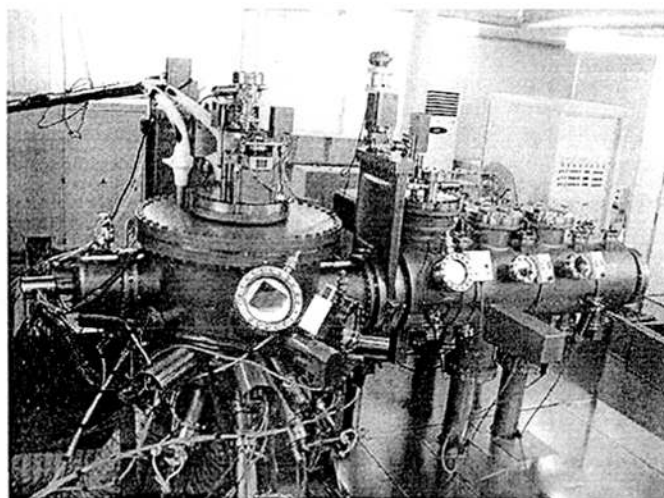


图 2.11 V90 型 GSMBE 系统

V90 型 GSMBE 设备主要由系统主机、气路系统、尾气处理系统和安全联锁电气控制系统等组成。生长室包括固态源束源炉、气态源裂解炉和衬底加热架。生长室外罩有液氮冷阱, 生长室内配备了高能电子枪、四极质谱仪和束源规等作为材料生长过程中的在线监测手段。生长室抽气系统的主机是油扩散泵, 它对氢气的抽取速率为 2000 l/s, 其前级配有机械泵。扩散泵带有液氮冷阱, 用来泵浦可冷凝的残余气体和吸附油蒸气。另外, 生长室还配有钛升华泵和抽速为 220 l/s 的离子泵。固态源束源炉、气态源裂解炉和衬底样品架的升降温由配有计算机接口的 PC3000 集中控制。固态束源炉和气态束源炉可分别加热至 1400℃ 和 1100℃, 样品加热器可加热至 900℃。系统经 200℃ 烘烤后, 生长室内的本底真空度可达到  $3 \times 10^{-11}$  Torr。V90 系统生长室内一次可生长直径为  $\phi 4''$  或  $\phi 3''$  的有铟或无铟衬底 1 片, 可生长直径为  $\phi 2''$  的外延片 3 片。预处理室中的样品托架可存放 12 个钼块, 同时预处理室中的加热器可以将样品在 350–450℃ 预除气。预处理室的抽气系统是抽速为 400 l/s 的离子泵, 本底真空度为  $2 \times 10^{-10}$  Torr。样品通过快速进样室进入系统, 进样室处于 100 级可移动净化台内, 抽

气系统是 170 l/s 的涡轮分子泵。样品可在进样室加热至 150℃ 以除去水汽。

## 2.6 III-V 族化合物的 MBE 生长特性

MBE 生长技术的发展使 III-V 族化合物成为广泛应用于高速微波器件和高效光学器件的新型半导体材料，这类化合物通常包含 Ga、Al、In 等 III 族元素及 As、P、Sb 等 V 族元素。最初研究的几种化合物是 GaAs、GaP、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 、 $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{1-x}$ 、 $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$  和  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ <sup>[55-58]</sup>，以后又扩展到  $\text{Al}_x\text{As}_{1-x}\text{Sb}$ 、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_y$ 、 $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 、GaN 等各种 III-V 族化合物及其合金。MBE 技术控制尺寸的优秀能力首先表现在生 GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  的周期结构上，随后又制备了需要有精确膜厚的高质量微波器件与光学器件。MBE 在双异质结激光器和微波场效应晶体管方面所取得的卓越成果，加上高产量和高均匀性，都使得它成为一种重要的薄膜生长技术<sup>[59,60]</sup>。

为了保证生长材料的质量，在 MBE 系统上一般都配备有四极质谱仪，用于超高真空系统的无油检漏和残余气体分析。由于换源和设备维护等需要，MBE 系统会不定期的打开。为保证和恢复超高真空的生长环境，需借助四极质谱仪的帮助。该仪器中的质量分析器能分辨不同荷质比的离子，这些离子依次到达检测器，经放大后就可显示出背景参与气体的质谱图。图 2.12 给出了系统经烘烤后的标准四极质谱图，从中可以看出系统背景中所含的各种气体成分及其含量。

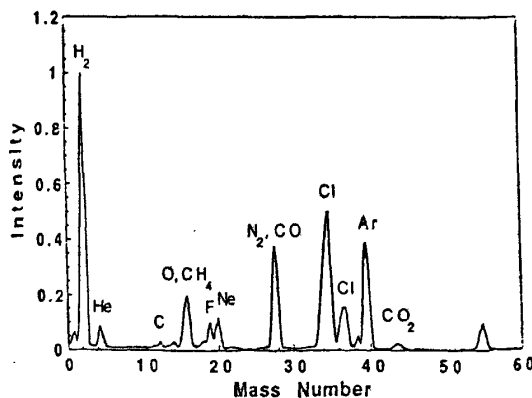


图 2.12 系统中残余气体的四极质谱分析图

反射式高能电子衍射 (RHEED) 是原位监测外延生长的重要手段。RHEED

中的电子束以  $1^\circ-3^\circ$  的掠射角入射到样品表面, 电子束的衍射角与波长的关系满足著名的布拉格定律, 可以表示为:

$$2d \cdot \sin \theta = \lambda \quad (2.1)$$

式中的  $d$  是面间距,  $\theta$  是入射方向与衍射方向间夹角的二倍,  $\lambda$  是电子束的德布罗意波长:

$$\lambda = \sqrt{\frac{150}{V(1+10^{-6})}} \text{ \AA} \quad (2.2)$$

电子的加速电压如果从 3KeV 到 100KeV, 则对应的波长为 2.2nm 至 0.4nm。在立方结构中, 点阵平面的间距  $d$  可以用密勒指数  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$  来表示为:

$$d = \sqrt{\frac{1}{(h_1/a)^2 + (h_2/a)^2 + (h_3/a)^2}} \quad (2.3)$$

所以不同晶面的间距  $d_{110}$  与  $d_{111}$  分别等于  $a/\sqrt{2}$  与  $a/\sqrt{3}$ , 其中  $a$  是晶格常数。衬底上的原子排列与荧光屏上看到的衍射图样之间的关系可表示为:  $d=2\lambda L/D$ , 其中  $L$  是衬底与荧光屏之间的距离,  $D$  是荧光屏上所测得的衍射斑点之间距离的二倍。因此, 测量出衍射斑点的间距就可以推导出原子的周期性。

利用 RHEED 还可以观察在外延前脱去衬底表面氧化膜的全过程, 由此可判断衬底在进入生长室前的表面清洗情况。对于符合规范的清洗过程, 衬底表面会形成均匀覆盖的无定形氧化膜, 呈现晕状衍射图形。随着衬底温度升高, 氧化膜逐渐挥发变薄, 并伴随出现点状衍射图像。当衬底温度达到一临界点 (GaAs 衬底在  $580-600^\circ\text{C}$ ), 氧化膜全部脱除, 荧光屏上将显示出晕消失后的单晶表面衍射图象。

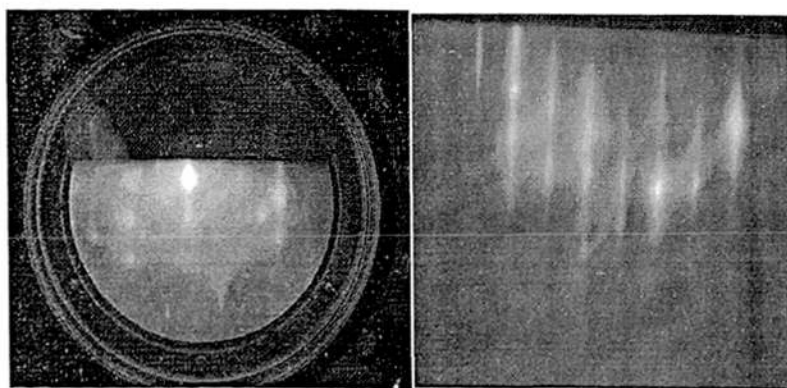


图 2.13 衬底表面解析时的 RHEED 衍射图像

在 MBE 生长过程中, V 族元素与 III 族元素的分子束强度比超过某一数值就可以获得稳定的表面结构<sup>[61, 62]</sup>。根据早期的研究, 较高的生长温度可以得到质量较高的外延层。但是并不是生长温度可以尽量的提高, 它的上限取决于可以得到的 V 族元素的过量蒸汽压或者 V 族元素的到达速率。因此生长含 As 元素的材料时, 生长温度越高就需要消耗更多的 As。此外, 在 640℃ 以上时, Ga 的吸附率也已经短到足以影响生长速率<sup>[63, 64]</sup>。GaAs 在 620℃ 以下生长速率几乎与衬底温度无关, 这意味着 III 族元素的粘附系数接近于 1<sup>[65, 66]</sup>。

## 2.7 国内外研究状况及本工作目的和意义

随着经济和社会发展以及国防建设和通信产业发展需要的不断提高, 微波、毫米波、亚毫米波电子器件、光电器件及其集成电路和高频、大功率化合物半导体器件越来越受到人们的重视, 它们在信息传输容量、传输速度及性能稳定性方面都与化合物半导体材料的性能密切相关, 与半导体器件的结构设计和制备工艺密切联系。因此, 大力开展新型结构材料及工艺技术研究, 研制和开发高性能的化合物半导体材料与器件已成为迫切的要求。

在双极型器件与电路方面, 继硅材料之后, 目前研究最多和市场应用最广泛的是 GaAs 基和 InP 基 HBT 及其相关电路。InP 体系和 GaAs 体系材料在 Si 很难达到的频率范围内成为首选材料, 同时具有优良高温及高频特性的 GaN 材料、器件及电路也已成为目前国际上研究的热点<sup>[67-69]</sup>。随着材料生长技术的发展, 对 GaAs 基 HBT 的研究得到了快速发展。1972 年, 由 Dumke 等人利用液相外延技术制备出第一个 AlGaAs/GaAs HBT 器件。TI 和 Rockwell 公司分别实现了离子注入和分子束外延工艺的 HBT, 并应用到了 GaAs 逻辑电路的设计中<sup>[70]</sup>。到 1980 年, HBT 的截止频率达到了 1GHz。上世纪 90 年代, GaAs HBT 的频率特性又有了极大的提高, 特征频率达到了 200GHz<sup>[71]</sup>, 亚微米尺寸又将特征频率  $f_T$  推进到了 300GHz<sup>[72]</sup>。在 InP 基 HBT 方面, 美国报道已研制出  $f_T$  达到 500GHz 的 InGaAs/InP HBT<sup>[73]</sup>。Milton Feng 小组研制出常温下  $f_T$  达到 683GHz 的 InP HBT, 在 -37℃ 条件下测量  $f_T$  达到 745GHz<sup>[25]</sup>。2006 年, 美国 UIUC 一小组已经研制出常温下  $f_T$  达到 765GHz 的 InP HBT, 在 -55℃ 条件下测

量  $f_T$  达到 845GHz<sup>[74]</sup>。上述结果表明, InP 基 HBT 在超高频特性方面已取得了巨大的成功, 面临的主要问题是如何在提高器件频率特性的同时保持器件较高的击穿电压, 以满足高频功率放大的要求, 如何降低阈值电压和补偿电压以降低电路功耗和提高功率附加效率, 如何进一步优化器件结构以提高器件的线性度等。而解决这些问题, 就需要在材料设计和器件结构优化方面进行更深入的研究和改进。在这些方面国外已着手开展工作, 有学者采用含 Sb 基区结构研制出 InP/GaAsSb/InP 新结构 HBT, 其  $f_T$  和  $f_{max}$  均已达到 300GHz, 且击穿电压大于 6V<sup>[75]</sup>。2007 年, 美国 UIUC 已经有研究结果报道  $f_T$  达到 670GHz 和  $f_{max} \geq 400\text{GHz}$ <sup>[76]</sup>。但在国内, 这些领域的研究尚处于起步阶段, 虽已有了一定的工作基础, 但距国际先进水平尚有较大的差距。

我国在 HBT 和 HEMT 器件及其材料的研制方面起步较晚, 由于设备条件差, 器件性能也较差, 大多数的器件只是处于试验阶段。目前, 各实验室已成功研制出高性能的 HBT 和 HEMT<sup>[77-79]</sup>。经过三十多年的研制和发展, 我国在半导体微波器件领域取得了很大的成绩, 但与国外先进水平相比, 仍然存在相当大的差距。器件的研制和生产方面与国外的差距是多方面的: (1)投资强度不够 (2)材料研究落后, 材料是器件的重要基础, 材料的特性直接影响器件的性能参数。广泛掌握材料特性和对材料质量全面了解是器件成功的关键。虽然我国进口了先进的 MBE、MOCVD 设备, 但材料生长技术仍有待提高。(3)工艺设备的落后<sup>[80, 81]</sup>。

未来化合物半导体器件的发展会集中在新材料、新工艺、新结构、新互连技术等方面, 而新材料是重点之一。由于对器件的设计从“掺杂工程”转入“能带工程”, 因此提高材料性能是目前器件及电路技术需要突破的瓶颈之一。化合物半导体器件中最有代表性、最能完美地显示异质结构特点的超高速器件就是高电子迁移率晶体管和异质结双极晶体管。对微波毫米波微电子器件的研究除了要寻找更好的半导体材料和对材料特性进行改进外, 还要有十分完备的工艺支持。因此, 开展新型 GaAs 基和 InP 基的 III-V 族化合物半导体材料、器件及电路的研究不仅有重要的学术意义, 更具有重大的应用前景, 对促进国防现代化以及推动通信产业的发展至关重要。

目前, HBT 在功率放大器 (PA) 应用领域占有主导地位, 但由于常规 GaAs 基 HBT 器件呈现出比较大的开启电压, 限制了器件的最小工作电压并增大了电路的功耗。为了在进一步提高器件频率特性的同时满足低功耗工作的要求, 开发具有低开启电压、高功率应用的新型 HBT 器件是功率微波和超高频电路的重要课题之一。此外,

由于常规 InP 基 DHBT 结构中存在的电流阻挡效应,探索新的结构予以克服也是提高 InP 基 DHBT 性能的重要课题之一。根据国际上的发展趋势和承担的重要科研项目,本工作采用 GSMBE 技术,针对新型结构 GaAs 基和 InP 基 HBT 的材料设计、结构优化、材料生长和器件研制开展了深入的研究。主要研究内容包括:

1. 集电结带有 n 型掺杂插入层复合结构的 GaAs 基 DHBT 和带有能带阶梯递变集电结结构的 InP 基 DHBT 电流传输特性及其对器件性能影响的理论分析;
2. InP 基和 GaAs 基 DHBT 用外延材料生长及大面积均匀性的研究;
3. 集电结带有 n 型掺杂插入层复合结构的 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 材料的光束外延生长及其物性研究;
4. 具有能带阶梯递变 InGaAsP 复合集电区的 InP/InGaAs/InP DHBT 材料的光束外延生长及其物性研究;
5. 新型结构 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 和 InP/InGaAs/InP DHBT 器件研制及其特性测试与分析。

## 2.8 小结

本章综述介绍了 GaAs 基和 InP 基 III-V 族化合物半导体材料的特性和应用,阐述了分子束外延技术的发展及其在 GaAs 基和 InP 基 III-V 族化合物半导体微结构材料与器件中的应用。介绍了异质结双极晶体管、高电子迁移率晶体管等高速电子器件与材料技术的研究状况,介绍了本工作的研究目的和主要研究内容。

### 第三章 复合集电区结构 GaAs 基和 InP 基 DHBT 材料设计与模拟分析

双异质结 HBT (DHBT) 开启电压低, 反向击穿电压高, 输出功率大, 尤其适用于功率放大等电路, 充分发挥 HBT 器件的特点<sup>[82-85]</sup>。但是, 由于传统的 GaAs 基和 InP 基 DHBT 结构 (如 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 和 InP/InGaAs/InP DHBT 结构) 受集电结导带势垒尖峰的影响, 使其 I-V 输出特性变差, 最大输出功率降低<sup>[86-88]</sup>。DHBT 的 I-V 输出特性与集电结的导带势垒尖峰密切相关, 导带势垒尖峰的高度越低, I-V 输出特性就越好。为了降低集电结的导带势垒尖峰, DHBT 可以采用复合集电结、双  $\delta$  掺杂插入层和缓变集电结等结构<sup>[86-89]</sup>。为了优化复合集电区结构 GaAs 基 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 和 InP 基 InP/InGaAs/InP DHBT 材料设计, 探索 GaAs 基和 InP 基 DHBT 的新结构, 本章对集电结带有 n 型掺杂插入层的 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 和带有能带阶梯递变 InGaAsP 插入层的 InP/InGaAs/InP DHBT 的电流传输特性及其对器件性能的影响进行了理论模拟和分析。结果表明, 采用这两种方法, 都可以有效地降低集电结的导带势垒尖峰, 获得良好的输出特性。

#### 3.1 两种 DHBT 材料结构

图 3.1(a)和(b)分别给出了所研究的 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 和 InP/InGaAs/InP DHBT 结构示意图。对于前者, 设计的重点是选择适当的 n 型 InGaP 插入层厚度和掺杂浓度, 以降低 InGaP/GaAs 界面的导带势垒尖峰高度; 对于后者, 能带阶梯递变 InGaAsP 插入层的能带选择则是减小 InGaAs/InP 界面导带尖峰阻挡效应的关键。

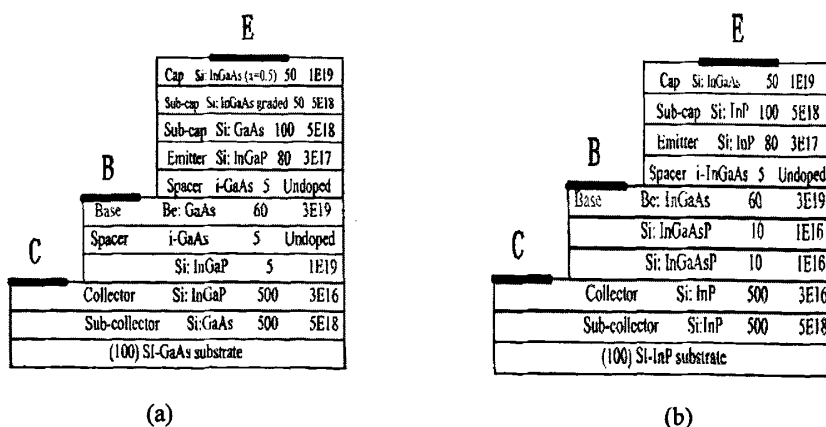


图 3.1 带有 n 型 InGaP 插入层 (a) 和能带阶梯递变 InGaAsP 插入层 (b) 的 DHBT 结构示意图

### 3.2 电流传输模型与分析

本文采用Lee和Houston基于热场发射和连续性方程的反射-透射模型来进行器件直流特性的分析模拟<sup>[90-93]</sup>。该模型可适用于不同材料和各种结构DHBT的电流计算,由于有研究表明在InGaP/GaAs等界面的隧穿电流很小,所以在本文中没有考虑隧穿的影响<sup>[94-96]</sup>,也不考虑复合效应的影响,主要分析复合集电区结构对DHBT直流特性的影响和改善。该模型如图3.2所示。

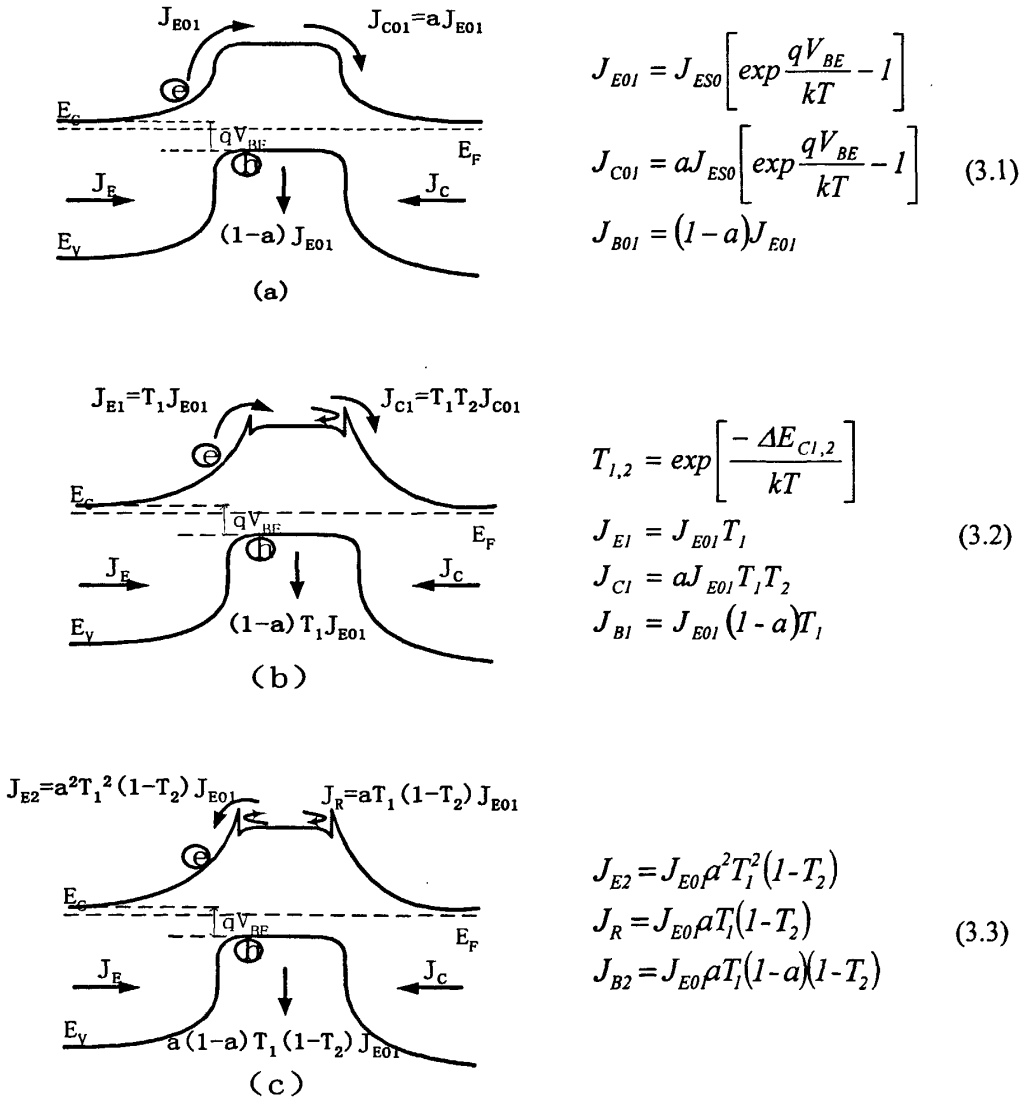


图 3.2 透射-反射模型示意图

其中, 图 3.2(a)为设想在 DHBT 中发射结和集电结均采用缓变异质结而不存在导带势垒尖峰的情形。在此情况下, DHBT 各端的电流密度如式 (3.1) 所示, 其中  $J_{ES0}$  为发射结饱和电流密度  $J_{ES0} = q \frac{v_{th}}{4} n_{p0} = A * T^2 \exp - \frac{E_a}{kT}$ ,  $\alpha = \left( \cosh\left(\frac{W}{L_c}\right) \right)^{-1}$  为基区传输因子,  $q$  为电子电量,  $k$  为波尔兹曼常数,  $T$  为绝对温度。

对于突变异质结的情形, 如图 3.2(b)和(c)所示, 其中的各电流密度可用式 (3.2) 和 (3.3) 来表示, 其中  $\Delta E_{C1}$  和  $\Delta E_{C2}$  分别为发射结和集电结的有效导带势垒尖峰高度,  $T_1$  和  $T_2$  分别为其透射系数, 在这里忽略了隧穿电流的影响。在式 (3.3) 中,  $J_{E1}$  和  $J_{C1}$  分别代表扩散电子从发射极到集电极的单次通过的电流;  $J_R$  为注入到发射极电流  $J_{E1}$  的分量, 而没有到达集电极端。随着透射和反射的进行, 最后的稳态发射极端电流总量可以将每次的分量相加而得到, 即:

$$J'_E = J_{E1} - J_{E2} - J_{E3} \cdots$$

$$J'_E = J_{E01} T_1 [1 - \alpha^2 T_1 (1 - T_2) \times \{1 + \alpha^2 (1 - T_1)(1 - T_2) + \cdots + \alpha^{n+1} (1 - T_1)^{n-1} (1 - T_2)^{n-1} + \cdots\}] \quad (3.4)$$

解出并将式 (3.1) 代入, 可以求得:

$$J'_E = \frac{T_1 [1 - \alpha^2 (1 - T_2)]}{1 - \alpha^2 (1 - T_1)(1 - T_2)} J_{ES0} \left[ \exp \frac{qV_{BE}}{kT} - 1 \right] \quad (3.5)$$

当取透射系数为 1 时, 电子全部透过就变成了缓变结的情况。

类似地, 可以得到集电极端电流值为:

$$\begin{aligned} J'_C &= J_{C1} + J_{C2} + J_{C3} \cdots \\ &= \alpha J_{E01} T_1 T_2 \left[ 1 + \alpha^2 (1 - T_1)(1 - T_2) + \cdots + \alpha^{n+1} (1 - T_1)^{n-1} (1 - T_2)^{n-1} + \cdots \right] \\ &= \frac{T_1 T_2}{1 - \alpha^2 (1 - T_1)(1 - T_2)} \alpha J_{ES0} \left[ \exp \frac{qV_{BE}}{kT} - 1 \right] \end{aligned} \quad (3.6)$$

对于集电结正偏置和发射结零偏置时, 可以得到相似表达式的电流  $J'_C$ 、 $J'_B$  和  $J'_E$ ,

这样对任何偏置下总的端电流为：

$$\begin{aligned} J_E &= -J'_E + J''_E \\ J_C &= J'_C - J''_C \\ J_B &= -(J_E + J_C) \end{aligned} \quad (3.7)$$

可得端电流表达式：

$$J_E = \frac{T_1[1-a^2(1-T_2)]}{1-a^2(1-T_1)(1-T_2)} J_{ES0} \left[ \exp \frac{qV_{BE}}{kT} - 1 \right] + \frac{T_1T_2}{1-a^2(1-T_1)(1-T_2)} aJ_{CS0} \left[ \exp \frac{qV_{BC}}{kT} - 1 \right] \quad (3.8)$$

$$J_C = \frac{T_1T_2}{1-a^2(1-T_1)(1-T_2)} aJ_{ES0} \left[ \exp \frac{qV_{BE}}{kT} - 1 \right] - \frac{T_2[1-a^2(1-T_1)]}{1-a^2(1-T_1)(1-T_2)} J_{CS0} \left[ \exp \frac{qV_{BC}}{kT} - 1 \right] \quad (3.9)$$

$$J_B = -(J_E + J_C) \quad (3.10)$$

从式 (3.8) 和 (3.9) 中可以看出, DHBT 端电流的每一个分量都与  $T_1$ 、 $T_2$  和  $\alpha$  有关, 说明电流通过突变结时受到界面导带势垒尖峰的影响。因此, 该模型能够较好地描述带有突变异质结的器件的电流传输特性。

### 3.3 集电结带有 n 型 InGaP 插入层的 GaAs 基 DHBT 模拟分析

图 3.3 给出了传统结构 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 的能带连接示意图。可以看出, 由于 InGaP 与 GaAs 界面的导带不连续性, 在集电结处存在一个 0.18eV 的势垒台阶, 在实际器件中会变成一个势垒尖峰, 从而导致集电结电流阻挡效应的发生。图 3.4 给出了所研究的 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 材料结构, 其中, 在集电结处除了有一个非故意掺杂的 GaAs (呈 n 型) 层 (spacer) 之外, 还插入了一个重掺杂的 n 型 InGaP 层, 我们的重点就是研究这个 n 型插入层厚度和掺杂浓度对导带势垒尖峰的影响及其优化, 以降低集电结导带的势垒尖峰高度。

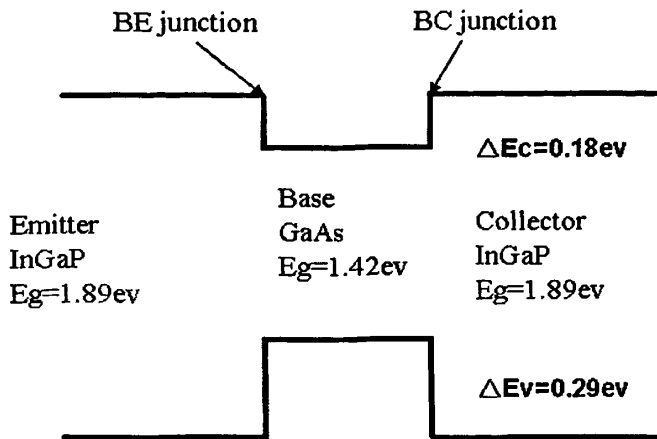


图 3.3 传统 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 材料的能带连接意图

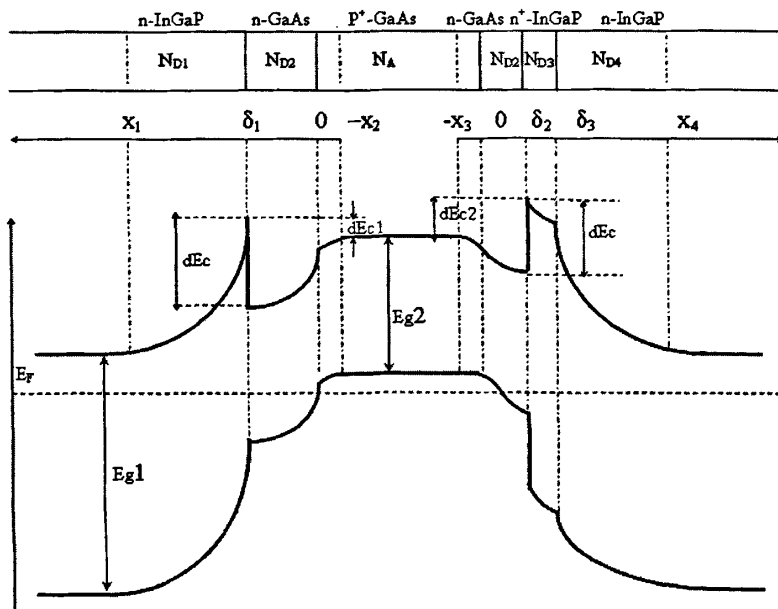


图 3.4 集电结带有 n 型 InGaP 插入层的 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 平衡状态的能带图

图 3.4 给出了所研究的 DHBT 结构在平衡状态下的能带图,其中:基区材料 GaAs 的禁带宽度  $E_g=1.42\text{eV}$ , 集电区和发射区材料 InGaP 的禁带宽度  $E_g=1.89\text{eV}$ , InGaP/GaAs 的导带差  $\Delta E_c=0.18\text{eV}$ , 价带差  $\Delta E_v=0.29\text{eV}$ ; 发射区 InGaP 掺杂浓度为  $N_{D1}$ , GaAs 基区两侧的 spacer 层本底浓度均为  $N_{D2}$ , 基区 GaAs 掺杂浓度为  $N_A$ , 集电区 InGaP 掺杂浓度为  $N_{D4}$ , 复合集电区中 InGaP 插入层的掺杂浓度为  $N_{D3}$ 、厚度为

$\delta_2$ ; InGaP 和 GaAs 的介电常数分别为  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$ 。

### 3.3.1 B-E 结的能带分析计算

对于图 3.4 所示发射结, 若取 p-n 结界面为零点,  $X_1$  和  $X_2$  分别为两边耗尽层边界。设定基区耗尽区边缘靠发射区处为  $x=0$ ,  $V(x=x_2)=0$ , 可给出一维 Poisson 方程:

$$\frac{dF}{dx} = \frac{q}{\epsilon_s} (p - n + N^+ - N^-) \quad (3.11)$$

其中,  $F = F(x)$  是电场强度。相应的电通量密度为:

$$D(x) = \epsilon_s F(x) \quad (3.12)$$

由图 3.4 中可以分段写出 Poisson 方程:

$$\frac{dF}{dx} = -\frac{q}{\epsilon_2} N_A \quad (-x_2 < x < 0) \quad (3.13)$$

$$\frac{dF}{dx} = \frac{q}{\epsilon_2} N_{D2} \quad (0 < x < \delta_1) \quad (3.14)$$

$$\frac{dF}{dx} = \frac{q}{\epsilon_1} N_{D1} \quad (\delta_1 < x < x_1) \quad (3.15)$$

于是, 对于  $-x_2 < x < 0$  有:

$$F(x) = \int_{-x_2}^x \left( -\frac{q}{\epsilon_2} N_A \right) dx = -\frac{q}{\epsilon_2} N_A (x + x_2) \quad (3.16)$$

对于  $0 < x < \delta_1$  有:

$$F(x) = F(0^+) + \int_0^x \left( \frac{q}{\epsilon_2} N_{D2} \right) dx = F(0^+) + \frac{q}{\epsilon_2} N_{D2} x \quad (3.17)$$

对于  $\delta_1 < x < x_1$  有:

$$F(x) = F(\delta_1^+) + \int_{\delta_1}^x \left( \frac{q}{\epsilon_1} N_{D1} \right) dx = F(\delta_1^+) + \frac{q}{\epsilon_1} N_{D1} (x - \delta_1) \quad (3.18)$$

由电通量连续, 有:

$$D(0^-) = \epsilon_2 F(0^-) = -q N_A x_2$$

$$D(0^+) = \varepsilon_2 F(0^+)$$

$$\text{得: } F(0^+) = -\frac{q}{\varepsilon_2} N_A x_2$$

$$D(\delta_1^-) = \varepsilon_2 F(\delta_1^-) = -q N_A x_2 + q N_{D2} \delta_1$$

$$D(\delta_1^+) = \varepsilon_1 F(\delta_1^+)$$

$$\text{得: } F(\delta_1^+) = -\frac{q}{\varepsilon_1} N_A x_2 + \frac{q}{\varepsilon_1} N_{D2} \delta_1$$

$$\text{由此可得: } \delta_1 (N_{D1} - N_{D2}) = N_{D1} x_1 - N_A x_2 \quad (3.19)$$

$$F(x) = -\frac{q}{\varepsilon_2} N_A (x + x_2) \quad (-x_2 < x < 0) \quad (3.20)$$

$$F(x) = -\frac{q}{\varepsilon_2} (N_A x_2 - N_{D2} x) \quad (0 < x < \delta_1) \quad (3.21)$$

$$F(x) = \frac{q}{\varepsilon_1} N_{D1} (x - x_1) \quad (\delta_1 < x < x_1) \quad (3.22)$$

积分求电势分布, 有:

对于  $-x_2 < x < 0$ :

$$V(x) = -\int_{-x_2}^x \left( -\frac{q}{\varepsilon_2} N_A (x + x_2) \right) dx = \frac{q}{2\varepsilon_2} N_A (x + x_2)^2 \quad (3.23)$$

对  $0 < x < \delta_1$  有:

$$V(x) = V(0^+) - \int_0^x \left( -\frac{q}{\varepsilon_2} N_A x_2 + \frac{q}{\varepsilon_2} N_{D2} x \right) dx = V(0^+) + \frac{q}{\varepsilon_2} N_A x_2 x - \frac{q}{2\varepsilon_2} N_{D2} x^2 \quad (3.24)$$

对  $\delta_1 < x < x_1$  有:

$$\begin{aligned} V(x) &= V(\delta_1^+) - \int_{\delta_1}^x \frac{q}{\varepsilon_1} N_{D1} (x - x_1) dx \\ &= V(\delta_1^+) - \frac{q}{2\varepsilon_1} N_{D1} x^2 + \frac{q}{\varepsilon_1} N_{D1} x_1 x + \frac{q}{2\varepsilon_1} N_{D1} \delta_1^2 - \frac{q}{\varepsilon_1} N_{D1} x_1 \delta_1 \end{aligned} \quad (3.25)$$

由相关边界条件及能带关系可得:

$$V(0^+) = V(0^-) = \frac{q}{2\varepsilon_2} N_A x_2^2$$

$$V(\delta_1^+) = V(\delta_1^-) - \frac{\Delta E_c}{q} = \frac{q}{2\varepsilon_2} N_A (x_2 + \delta_1)^2 - \frac{q}{2\varepsilon_2} \delta_1^2 (N_A + N_{D2}) - \frac{\Delta E_c}{q}$$

代入得到电势分布:

$$V(x) = \frac{q}{2\varepsilon_2} N_A (x + x_2)^2 \quad (-x_2 < x < 0) \quad (3.26)$$

$$V(x) = \frac{q}{2\varepsilon_2} N_A (x + x_2)^2 - \frac{q}{2\varepsilon_2} x^2 (N_A + N_{D2}) \quad (0 < x < \delta_1) \quad (3.27)$$

$$V(x) = \frac{q}{2\varepsilon_2} N_A (x_2 + \delta_1)^2 - \frac{q}{2\varepsilon_2} \delta_1^2 (N_A + N_{D2}) - \frac{\Delta E_c}{q} - \frac{q}{2\varepsilon_1} N_{D1} x^2 + \frac{q}{\varepsilon_1} N_{D1} x_1 x + \frac{q}{2\varepsilon_1} N_{D1} \delta_1^2 - \frac{q}{\varepsilon_1} N_{D1} x_1 \delta_1 \quad (\delta_1 < x < x_1) \quad (3.28)$$

再由电势关系有:

$$V(x = x_1) = V_{bi} - \frac{\Delta E_c}{q} - V_{BE}$$

其中,  $V_{bi} = \frac{E_{g2} + \Delta E_c}{q} - \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_{c1} N_{v2}}{N_{D1} N_A} \right)$ , 可得到方程:

$$x_1^2 \left( \frac{q}{2\varepsilon_2 N_A} N_{D1}^2 + \frac{q}{2\varepsilon_1} N_{D1} \right) + x_1 \left( \frac{q}{\varepsilon_2 N_A} N_{D1} N_{D2} \delta_1 - \frac{q}{\varepsilon_2 N_A} N_{D1}^2 \delta_1 + \frac{q}{\varepsilon_2} N_{D1} \delta_1 - \frac{q}{\varepsilon_1} N_{D1} \delta_1 \right) + \frac{q}{2\varepsilon_2 N_A} (N_{D2} - N_{D1})^2 \delta_1^2 + \frac{q}{\varepsilon_2} (N_{D2} - N_{D1}) \delta_1^2 + \frac{q}{2\varepsilon_1} N_{D1} \delta_1^2 - \frac{q}{2\varepsilon_2} N_{D2} \delta_1^2 - V_{bi} + V_{BE} = 0$$

解之得:

$$x_1 = \delta_1 - \frac{N_{D2} + N_A}{N_{D1} + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} N_A} \delta_1 + \sqrt{\left( N_{D2} \delta_1 - N_{D1} \delta_1 + N_A \delta_1 - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} N_A \delta_1 \right)^2 - \left( N_{D1} + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} N_A \right) \left( \frac{(N_{D2} - N_{D1})^2}{N_{D1}} \delta_1^2 + \frac{2N_A}{N_{D1}} (N_{D2} - N_{D1}) \delta_1^2 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} N_A \delta_1^2 - \frac{N_A N_{D2}}{N_{D1}} \delta_1^2 - \frac{2(V_{bi} - V_{BE}) \varepsilon_2 N_A}{q N_{D1}} \right)} \quad (3.29)$$

$$x_2 = \frac{(N_{D2} - N_{D1})\delta_1 + N_{D1}x_1}{N_A} \quad (3.30)$$

这样, B-E 结的有效导带势垒尖峰高度可写为:

$$\Delta E_{c1} = \Delta E_c - qV(\delta_1^-) = \Delta E_c - \left( \frac{q^2}{2\varepsilon_2} N_A (x_2 + \delta_1)^2 - \frac{q^2}{2\varepsilon_2} \delta_1^2 (N_A + N_{D2}) \right) \quad (3.31)$$

### 3.3.2 B-C 结的能带分析计算

对于 B-C 结, 同样取异质结界面处为零点,  $x_3$  和  $x_4$  为结两边耗尽层边界。设定  $V(-x_3)=0$ , 同样可以写出 Poisson 方程:

$$\frac{dF}{dx} = -\frac{q}{\varepsilon_2} N_A \quad (-x_3 < x < 0) \quad (3.32)$$

$$\frac{dF}{dx} = \frac{q}{\varepsilon_2} N_{D2} \quad (0 < x < \delta_2) \quad (3.33)$$

$$\frac{dF}{dx} = \frac{q}{\varepsilon_1} N_{D3} \quad (\delta_2 < x < \delta_3) \quad (3.34)$$

$$\frac{dF}{dx} = \frac{q}{\varepsilon_1} N_{D4} \quad (\delta_3 < x < x_4) \quad (3.35)$$

经过与 B-E 结相似的推导过程, 可以得到:

$$x_3 = \frac{-N_A q^2 \delta_2 + \sqrt{N_A^2 q^4 \delta_2^2 + N_A N_{D2} q^4 \delta_2^2 + 2d_{Ec} N_A q^2 \varepsilon_2}}{N_A q^2} \quad (3.36)$$

$$x_4 = \frac{1}{N_{D4}} \left( N_{D3} \delta_2 - N_{D3} \delta_3 + N_{D4} \delta_3 - \frac{N_A \delta_2 \varepsilon_1}{\varepsilon_2} - \frac{N_{D2} \delta_2 \varepsilon_1}{\varepsilon_2} + \frac{\varepsilon_1 \sqrt{N_A^2 q^4 \delta_2^2 + N_A N_{D2} q^4 \delta_2^2 + 2d_{Ec} N_A q^2 \varepsilon_2}}{q^2 \varepsilon_2} \right) \quad (3.37)$$

由此, B-C 结的有效导带势垒尖峰高度可以写为:

$$\Delta E_{c2} = \Delta E_c - qV(0^-) = \Delta E_c - \frac{q^2}{2\varepsilon_2} N_A x_3^2 \quad (3.38)$$

由上式可求出当  $\Delta E_{c2}$  减小到零时, 相应的 n 型 InGaP 插入层厚度  $\delta_3$  和掺杂浓度  $N_{D3}$  的关系为:

$$\delta_3 = \frac{1}{2(N_{D3}q^2\varepsilon_2^2 - N_{D3}N_{D4}q^2\varepsilon_2^2)} \left[ \begin{aligned} & -2N_A N_{D3}q^2\delta_2\varepsilon_1\varepsilon_2 - 2N_{D2}N_{D3}q^2\delta_2\varepsilon_1\varepsilon_2 + 2N_A N_{D4}q^2\delta_2\varepsilon_1\varepsilon_2 + 2N_{D2}N_{D4}q^2\delta_2\varepsilon_1\varepsilon_2 + \\ & 2N_{D3}^2q^2\delta_2\varepsilon_2^2 - 2N_{D3}N_{D4}q^2\delta_2\varepsilon_2^2 + 2N_{D3}\varepsilon_1\varepsilon_2\sqrt{N_A^2q^4\delta_2^2 + N_A N_{D2}q^4\delta_2^2 + 2d_{Ec}N_Aq^2\varepsilon_2} - \\ & 2N_{D4}\varepsilon_1\varepsilon_2\sqrt{N_A^2q^4\delta_2^2 + N_A N_{D2}q^4\delta_2^2 + 2d_{Ec}N_Aq^2\varepsilon_2} + \\ & \left[ \begin{aligned} & -8N_A^2N_{D3}N_{D4}q^4\delta_2^2\varepsilon_1^2\varepsilon_2^2 - 12N_A N_{D2}N_{D3}N_{D4}q^4\delta_2^2\varepsilon_1^2\varepsilon_2^2 - 4N_{D2}^2N_{D3}N_{D4}q^4\delta_2^2\varepsilon_1^2\varepsilon_2^2 + \\ & 8N_A^2N_{D4}^2q^4\delta_2^2\varepsilon_1^2\varepsilon_2^2 + 12N_A N_{D2}N_{D4}q^4\delta_2^2\varepsilon_1^2\varepsilon_2^2 + 4N_{D2}^2N_{D4}^2q^4\delta_2^2\varepsilon_1^2\varepsilon_2^2 - \\ & 8d_{Ec}N_A N_{D3}N_{D4}q^2\varepsilon_1^2\varepsilon_2^3 + 8d_{Ec}N_A N_{D4}^2q^2\varepsilon_1^2\varepsilon_2^3 - 8d_{Ec}N_{D3}^2N_{D4}q^2\varepsilon_1\varepsilon_2^4 + \\ & 8d_{Ec}N_{D3}N_{D4}^2q^2\varepsilon_1\varepsilon_2^4 - 8N_{D3}^2N_{D4}q^3V_{bc}\varepsilon_1\varepsilon_2^4 + 8N_{D3}N_{D4}^2q^3V_{bc}\varepsilon_1\varepsilon_2^4 + \\ & 8N_{D3}^2N_{D4}q^3V_{bi}\varepsilon_1\varepsilon_2^4 - 8N_{D3}N_{D4}^2q^3V_{bi}\varepsilon_1\varepsilon_2^4 + \\ & 8N_A N_{D3}N_{D4}q^2\delta_2\varepsilon_1^2\varepsilon_2^2\sqrt{N_A^2q^4\delta_2^2 + N_A N_{D2}q^4\delta_2^2 + 2d_{Ec}N_Aq^2\varepsilon_2} + \\ & 8N_{D2}N_{D3}N_{D4}q^2\delta_2\varepsilon_1^2\varepsilon_2^2\sqrt{N_A^2q^4\delta_2^2 + N_A N_{D2}q^4\delta_2^2 + 2d_{Ec}N_Aq^2\varepsilon_2} - \\ & 8N_A N_{D4}^2q^2\delta_2\varepsilon_1^2\varepsilon_2^2\sqrt{N_A^2q^4\delta_2^2 + N_A N_{D2}q^4\delta_2^2 + 2d_{Ec}N_Aq^2\varepsilon_2} - \\ & 8N_{D2}N_{D4}^2q^2\delta_2\varepsilon_1^2\varepsilon_2^2\sqrt{N_A^2q^4\delta_2^2 + N_A N_{D2}q^4\delta_2^2 + 2d_{Ec}N_Aq^2\varepsilon_2} \end{aligned} \right] \end{aligned} \right] \quad (3.39)$$

### 3.3.3 GaAs 基 DHBT 器件性能模拟分析

在上述对 GaAs 基 DHBT 能带结构分析的基础上, 本文利用 Matlab 软件对相应的 DHBT 器件性能进行了模拟分析, 所使用的相关常量及参数如表 3.1 所示。

表 3.1 Matlab 模拟所使用的相关常量和参数

| Parameter                          | Symbol                       | Value         |
|------------------------------------|------------------------------|---------------|
| Boltzmann constant (J/K)           | k                            | 1.380658e-23  |
| Unit charge (c)                    | q                            | 1.6021773e-19 |
| Planck's constant (Js)             | h                            | 6.6260755e-34 |
| Richardson constant                | A                            | 1.20173e6     |
| Conduction band discontinuity (eV) | $\Delta E_C$                 | 0.18          |
| Valence band discontinuity (eV)    | $\Delta E_V$                 | 0.29          |
| Dielectric permittivity of InGaP   | $\varepsilon_{\text{InGaP}}$ | 11.8          |
| Dielectric permittivity of GaAs    | $\varepsilon_{\text{GaAs}}$  | 13.2          |
| Effective electron mass of InGaP   | $m_e$                        | 0.11 $m^*$    |
| Effective hole mass of InGaP       | $m_h$                        | 0.46 $m^*$    |

|                                                |            |               |
|------------------------------------------------|------------|---------------|
| GaAs effective electron mass                   | $m_e$      | $0.063 m^*$   |
| SRH Life time for electron of GaAs (s)         | $\tau_n$   | $5.63 e - 9$  |
| SRH Life time for electron of GaAs (s)         | $\tau_p$   | $1e- 9$       |
| Intrinsic concentration of InGaP ( $cm^{-3}$ ) | $ni_E$     | $1.2 e3$      |
| Intrinsic concentration of GaAs ( $cm^{-3}$ )  | $ni_B$     | $1.79 e6$     |
| Heterointerface trap density ( $cm^{-2}$ )     | $N_{ti}$   | $5e12$        |
| Electron thermal velocity ( $cm s^{-1}$ )      | $v_n$      | $1 e7$        |
| Eff.State den.In cond.Band of InGaP            | $N_{c1}$   | $6.5e17$      |
| Eff.State den.In val.Band of GaAs              | $N_{v2}$   | $9e18$        |
| InGaP thermal valocity                         | $v_{th1}$  | $1e7$         |
| GaAs thermal valocity                          | $v_{th2}$  | $4.4e5$       |
| Capture cross section ( $cm^2$ )               | $\sigma_n$ | $1e-15$       |
| Electron rest mass (kg)                        | $m^*$      | $9.11 e-31$   |
| Electron diffusion const in base region        | $D_n$      | $2.85e-2$     |
| Permittivity of free space                     | $Y_{i0}$   | $8.85e-12$    |
| InGaP permittivity                             | $Y_{i1}$   | $11.8*Y_{i0}$ |
| GaAs permittivity                              | $Y_{i2}$   | $13.2*Y_{i0}$ |
| Electron life time in base region(s)           | $t_n$      | $1e-9$        |

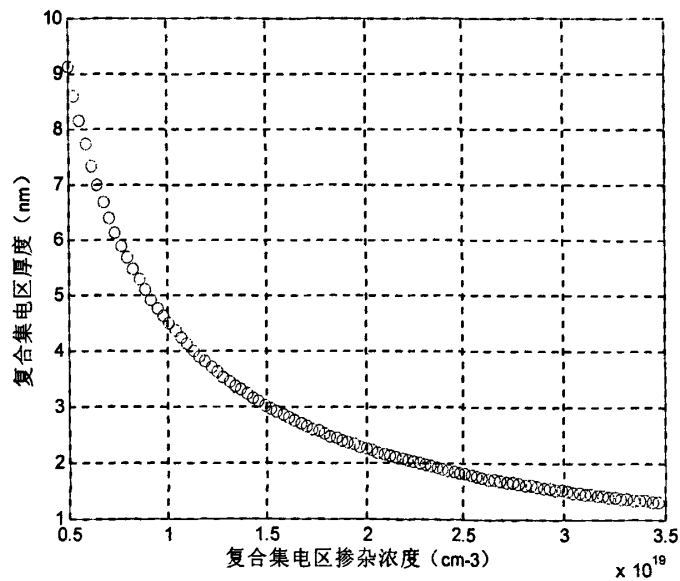


图 3.5 集电结导带有效势垒高度 $\Delta E_{c2}$ 为零时 n-InGaP 插入层厚度与掺杂浓度的关系

图 3.5 给出了 DHBT 集电结导带有效势垒高度 $\Delta E_{c2}$ 为零时复合集电区中 $n^+$ -InGaP 插入层厚度 $\delta_2$ 与掺杂浓度 $N_{d3}$ 的关系。由此可见,只要根据材料生长和器件制备的实际条件和可行性,适当选择和优化在集电区和基区之间引入的 $n^+$ -InGaP 插入层的厚度和掺杂浓度(比如可选择厚度为 4nm,掺杂浓度为 $1E19cm^{-3}$ ),就可以有效降低 B-C 结处导带不连续所导致的势垒尖峰,从而克服 DHBT 的电流阻挡效应。

### 3.3.3.1 不同插入层厚度和掺杂浓度对 DHBT 电流密度的影响

图 3.6 给出了 $V_{be}=0.5V$ 、复合集电区中 $n$ -InGaP 插入层掺杂浓度为 $1E19cm^{-3}$ 时,不同插入层厚度对集电极电流密度的影响(图中曲线从下至上分别表示插入层厚度为 1nm、1.5nm、1.8nm、2nm 和 3nm 时的集电极电流密度)。图 3.7 给出了 $V_{be}=0.5V$ 、插入层厚度为 4nm 时,改变复合集电区中 $n^+$ -InGaP 插入层的掺杂浓度对 DHBT 器件输出特性的影响(图中曲线从下至上分别表示插入层掺杂浓度为 $8E18cm^{-3}$ 、 $8.5E18cm^{-3}$ 、 $9E18cm^{-3}$ 、 $9.5E18cm^{-3}$ 和 $1E19cm^{-3}$ 时的集电极电流密度)。由图可见,随着引入的 $n^+$ -InGaP 插入层厚度或掺杂浓度的增加,DHBT 的输出特性可以得到明显改善。当然,在实际器件结构材料设计时,还应综合考虑材料生长的可行性和对器件特性的具体要求,来适当选择 $n^+$ -InGaP 插入层的厚度和掺杂浓度,

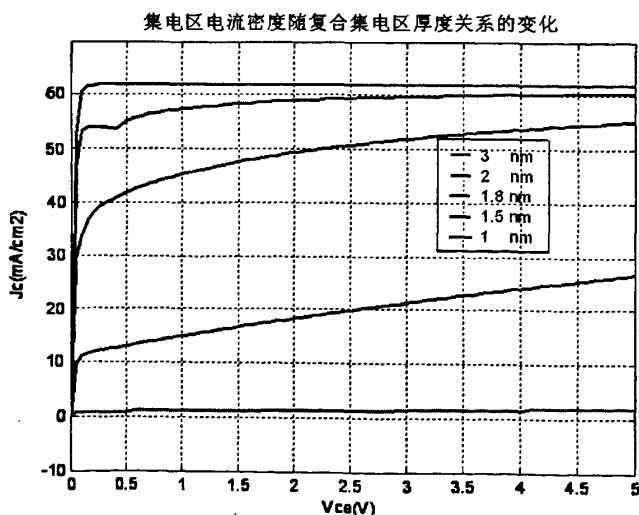


图 3.6 DHBT 输出特性随 $n$ -InGaP 插入层厚度的变化(插入层掺杂浓度为 $1 \times 10^{19}cm^{-3}$ )

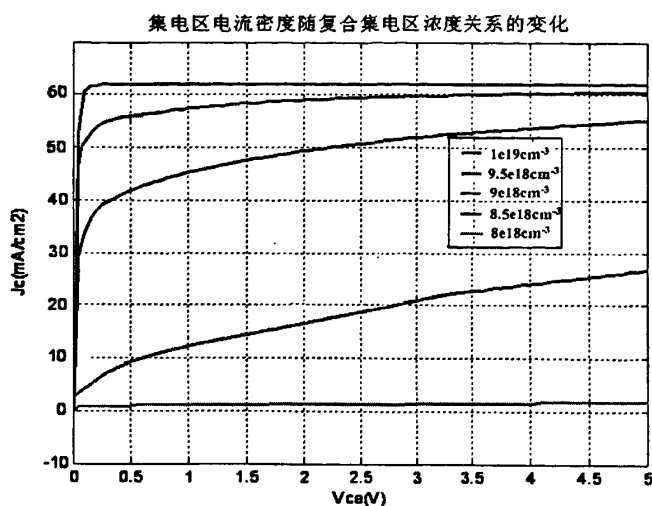
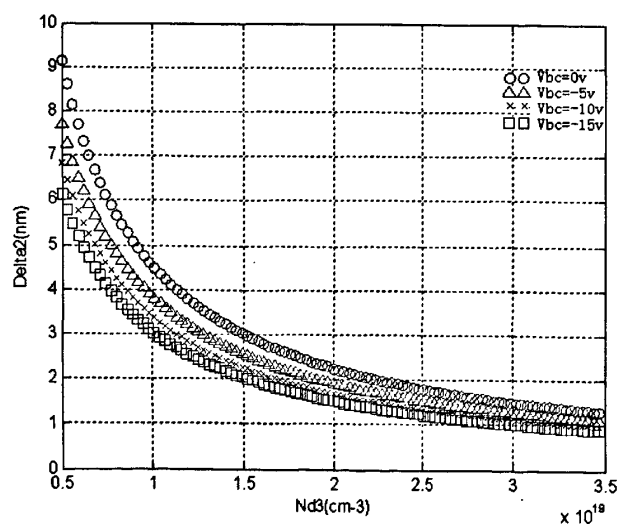


图 3.7 DHBT 输出特性随 n-InGaP 插入层掺杂浓度的变化 (插入层厚度为 4nm)

### 3.3.3.2 不同偏压下插入层厚度和掺杂浓度对集电结导带有效势垒高度的影响

图 3.8 给出了在不同 B-C 结偏压下导带有效势垒高度  $\Delta E_{c2}$  为零时复合集电区插入层厚度和掺杂浓度的关系 (图中从下至上 B-C 结偏压分别为 -15V、-10V、-5V 和 0V)。在实际器件设计中,可以利用这个关系通过选取合适的  $n^+$ -InGaP 插入层厚度和掺杂浓度来优化器件的性能。


 图 3.8 不同 B-C 结偏压下集电结导带有效势垒高度  $\Delta E_{c2}$  为零时插入层厚度与掺杂浓度的关系

### 3.3.3.3 优化插入层厚度和掺杂浓度的 DHBT 输出特性

结合上述的分析计算结果,我们综合考虑选择复合集电区中 n-InGaP 插入层厚度 5nm、掺杂浓度  $1\text{E}19\text{cm}^{-3}$  作为优化的设计参数,模拟得到的比较理想的 DHBT 输出特性如图 3.9 所示(在模拟计算中,设定发射区 n-InGaP 掺杂浓度为  $3\text{E}17\text{cm}^{-3}$ ,基区 p-GaAs 掺杂浓度为  $1\text{E}19\text{cm}^{-3}$ ,基区两边的 space 层均为不掺杂,集电区 n-InGaP 掺杂浓度为  $1\text{E}16\text{cm}^{-3}$ )。

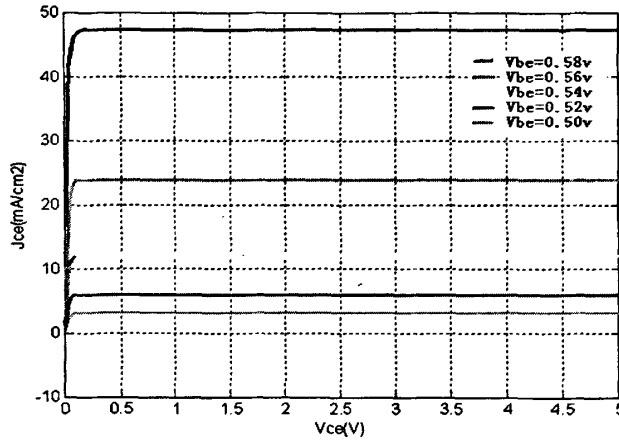


图 3.9 采用优化的 n-InGaP 插入层参数模拟的 DHBT 输出特性

### 3.4 带有能带阶梯缓变复合集电区的 InP 基 DHBT 模拟分析

对于 InP 基 DHBT,本文采用了在 InP 集电区和 InGaAs 基区之间插入两层能带阶梯缓变的 InGaAsP 构成复合集电区的结构,来解决传统 InP/InGaAs/InP DHBT 因突变集电结导带不连续而形成的势垒尖峰所产生的电流阻挡效应问题。通过能带分析和相关模型的模拟,所引入的能带线性缓变的两层 InGaAsP 层降低了 B-C 结之间由于导带不连续性而形成的势垒尖峰,从而可有效克服电流阻挡效应。

图 3.10 给出了  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  四元系材料禁带宽度  $E_g$  与晶格常数的关系,其禁带宽度  $E_g$  与各个元素之间组份比的关系如下式所示:

$$E_g(x, y) = 1.35 + 0.668x - 1.068y + 0.758x^2 + 0.078y^2 - 0.069xy - 0.322x^2y + 0.03xy^2$$

(3.40)

当  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  与 InP 晶格相匹配时  $x=0.47y$ , 代入式(3.39)可得此时  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  禁带宽度  $E_g$  与 Ga 组份  $x$  的关系为:

$$E_g(x, y) = 1.35 - 1.6043x + 0.9643x^2 - 0.54929x^3 \quad (3.41)$$

通过计算得到的与 InP 晶格匹配的  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  材料禁带宽度  $E_g$  随 Ga 组份  $x$  的变化关系如图 3.11 所示。

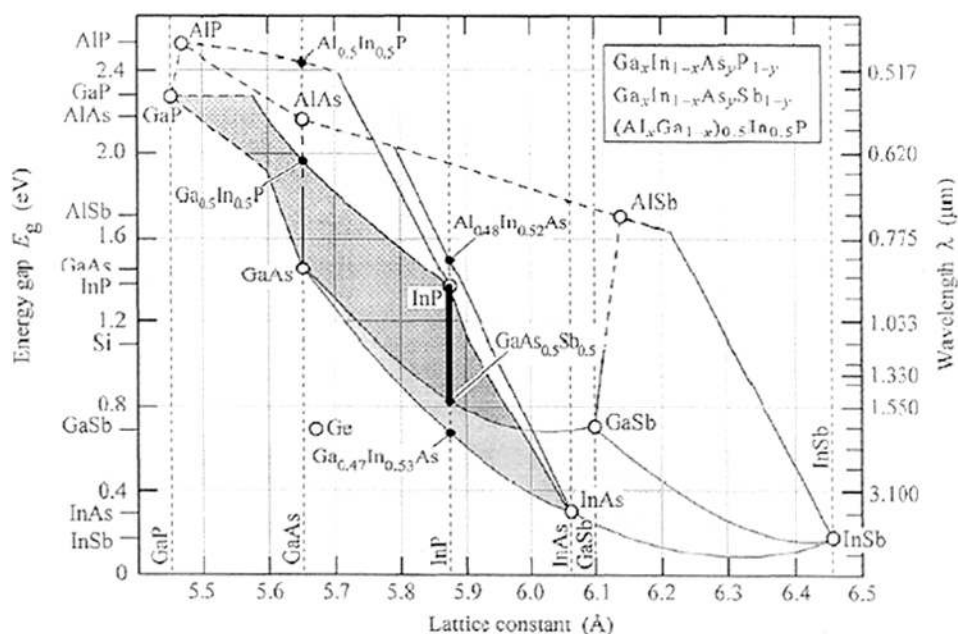


图 3.10  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  禁带宽度与晶格常数之间关系

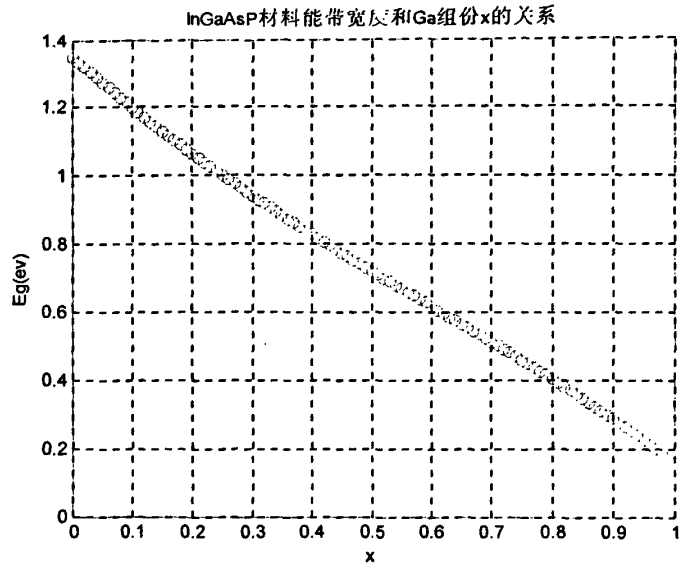


图 3.11 与 InP 晶格匹配的  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  禁带宽度  $E_g$  随 Ga 组分  $x$  的变化关系

本文设计的带有能带阶梯缓变复合集电区的 InP/InGaAs/InP DHBT 结构, 是在集电区和基区之间插入两层不同组份的 InGaAsP 层。为了通过插入能带阶梯缓变的两个 InGaAsP 层来降低 B-C 结之间由于导带不连续性而形成的势垒尖峰, 根据图 3.11 所示的关系, 我们对这两个插入层分别选取了  $x$  为 0.27 和 0.12 的组份。

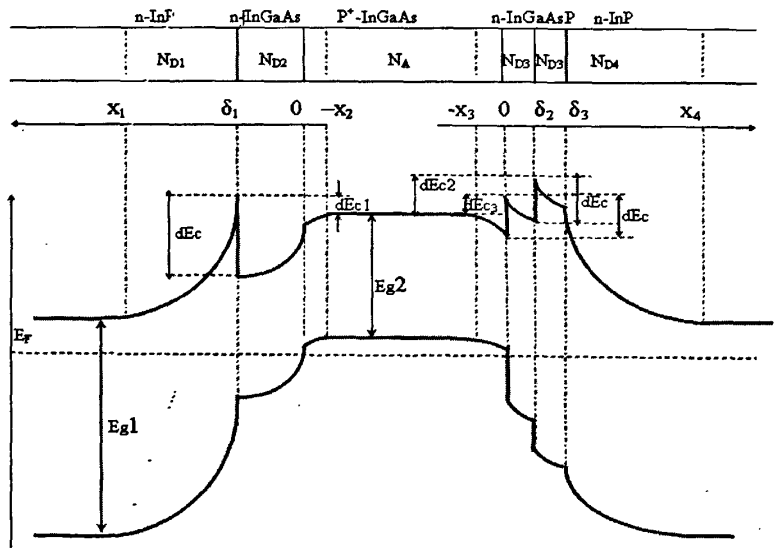


图 3.12 带有能带阶梯缓变复合集电区的 InP/InGaAs/InP DHBT 平衡状态下的能带图

图 3.12 给出了带有能带阶梯缓变复合集电区的 InP/InGaAs/InP DHBT 平衡状态下的能带图。我们同样采用前述的透射-反射模型对其特性进行了模拟分析。在计算中, 假设器件结构中各区的掺杂均为均匀掺杂。其中, 发射区 n-InP 层掺杂浓度为  $N_{D1}$ , 发射区与基区之间的 InGaAs 隔离层为非故意掺杂的 (其本底杂质浓度为  $N_{D2}$ ), 基区  $p^+$ -InGaAs 掺杂浓度为  $N_A$ , 两个能带阶梯缓变 InGaAsP 层的掺杂浓度均为  $N_{D3}$ , 集电区 n-InP 层掺杂浓度为  $N_{D4}$ 。

利用与前面相同的方法, 对于 B-E 结可求得:

$$x_1 = \delta_1 - \frac{N_{D2} + N_A}{N_{D1} + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} N_A} \delta_1 + \sqrt{\left( N_{D2} \delta_1 - N_{D1} \delta_1 + N_A \delta_1 - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} N_A \delta_1 \right)^2 - \left( N_{D1} + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} N_A \right)} \quad (3.42)$$

$$\sqrt{\left( \frac{(N_{D2} - N_{D1})^2}{N_{D1}} \delta_1^2 + \frac{2N_A}{N_{D1}} (N_{D2} - N_{D1}) \delta_1^2 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} N_A \delta_1^2 - \frac{N_A N_{D2}}{N_{D1}} \delta_1^2 - \frac{2(V_{bi} - V_{BE}) \epsilon_2 N_A}{q N_{D1}} \right)} \\ x_2 = \frac{(N_{D2} - N_{D1}) \delta_1 + N_{D1} x_1}{N_A} \quad (3.43)$$

由此, B-E 结的导带有效势垒尖峰高度可写为:

$$\Delta E_{c1} = \Delta E_c - qV(\delta_1^-) = \Delta E_c - \left( \frac{q^2}{2\epsilon_2} N_A (x_2 + \delta_1)^2 - \frac{q^2}{2\epsilon_2} \delta_1^2 (N_A + N_{D2}) \right) \quad (3.44)$$

对于 B-C 结, 同样可得:

$$x_3 = \frac{-N_A q^2 \delta_2 + \sqrt{N_A^2 q^4 \delta_2^2 + N_A N_{D2} q^4 \delta_2^2 + 2d_{Ec} N_A q^2 \epsilon_2}}{N_A q^2} \quad (3.45)$$

$$x_4 = \frac{1}{N_{D4}} \left( N_{D3} \delta_2 - N_{D3} \delta_3 + N_{D4} \delta_3 - \frac{N_A \delta_2 \epsilon_1}{\epsilon_2} - \frac{N_{D2} \delta_2 \epsilon_1}{\epsilon_2} + \frac{\epsilon_1 \sqrt{N_A^2 q^4 \delta_2^2 + N_A N_{D2} q^4 \delta_2^2 + 2d_{Ec} N_A q^2 \epsilon_2}}{q^2 \epsilon_2} \right) \quad (3.46)$$

这样, B-C 结的导带有效势垒尖峰高度可写为:

$$\Delta E_{c2} = \Delta E_c - qV(0^-) = \Delta E_c - \frac{q^2}{2\epsilon_2} N_A x_3^2 \quad (3.47)$$

表 3.2 为本文所设计的带有能带阶梯缓变复合集电区的 InP/InGaAs/InP DHBT 材料结构。我们同样利用 Matlab 软件对这种 DHBT 结构的器件特性进行了模拟分析,

其中组成复合集电区的两种与 InP 晶格匹配而禁带宽度不同的  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  材料的能带相关常数可通过插值法的计算分别获得。模拟计算中所采用的相关常量及参数如表 3.3 所示。

表 3.2 InP/InGaAs/InP DHBT 材料结构

| 材料名称                                                                                         | 厚度 (nm) | 掺杂元素 | 掺杂浓度 ( $\text{cm}^{-3}$ ) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------|---------------------------|
| $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$                                                  | 40      | Si   | $3\text{E}19$             |
| InP                                                                                          | 90      | Si   | $3\text{E}19$             |
| InP                                                                                          | 10      | Si   | $1\text{E}18$             |
| InP                                                                                          | 60      | Si   | $3\text{E}17$             |
| $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$                                                  | 5       | UID  | UID                       |
| $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$                                                  | 40      | Be   | $3\text{E}19$             |
| $\text{In}_{0.73}\text{Ga}_{0.27}\text{As}_{0.58}\text{P}_{0.42}$<br>( $E_g=0.95\text{eV}$ ) | 10      | Si   | $2\text{E}16$             |
| $\text{In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.27}\text{P}_{0.77}$<br>( $E_g=1.15\text{eV}$ ) | 10      | Si   | $2\text{E}16$             |
| InP                                                                                          | 160     | Si   | $1\text{E}16$             |
| InP                                                                                          | 50      | Si   | $1.5\text{E}19$           |
| $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$                                                  | 25      | Si   | $3\text{E}19$             |
| InP                                                                                          | 300     | Si   | $3\text{E}19$             |
| (001) SI-InP 衬底                                                                              |         |      |                           |

表 3.3 Matlab 模拟所使用的相关常量和参数

| USER DEFINED PARAMETERS                | MATLAB<br>SYMBOL | TYPICAL VALUE          | UNIT:       |
|----------------------------------------|------------------|------------------------|-------------|
| Boltzmann constant                     | k                | $1.380658\text{e-}23$  | J/K         |
| Unit charge                            | q                | $1.6021773\text{e-}19$ | C           |
| Planck's constant                      | h                | $6.6260755\text{e-}34$ | $\text{Js}$ |
| Conduction band discontinuity          | dEc              | 0.2                    | eV          |
| Emitter band gap in room temperature   | Eg1              | 1.35                   | eV          |
| Base band gap in room temperature      | Eg2              | 0.75                   | eV          |
| Collector band gap in room temperature | Eg1              | 1.35                   | eV          |
| free electron mass                     | me               | $9.1093897\text{e-}31$ | kg          |

|                                                |                                                                                                                                                                                                                   |             |                  |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------------|
| electron effective mass of InP                 | me1                                                                                                                                                                                                               | 0.077*me    | kg               |
| electron effective mass of InGaAs              | me2                                                                                                                                                                                                               | 0.034*me    | kg               |
| permittivity of vacuum                         | Yi0                                                                                                                                                                                                               | 8.85419e-12 | F/m              |
| emitter permittivity at room temperature       | Yi1                                                                                                                                                                                                               | 12.8*Yis0   | F/m              |
| base permittivity at room temperature          | Yi2                                                                                                                                                                                                               | 11.7*Yis0   | F/m              |
| collector permittivity at room temperature     | Yi1                                                                                                                                                                                                               | 12.8*Yis0   | F/m              |
| Emitter conduction band density of states      | Nc                                                                                                                                                                                                                | 4.16e23     | m <sup>-3</sup>  |
| Base valence band density of states            | Nv                                                                                                                                                                                                                | 1.37e25     | m <sup>-3</sup>  |
| Collector conduction band density of states    | Nc                                                                                                                                                                                                                | 4.16e23     | m <sup>-3</sup>  |
| minority carrier lifetime in base              | tn                                                                                                                                                                                                                | 1e-9        | s                |
| minority carrier lifetime in emitter/collector | tp                                                                                                                                                                                                                | 1e-9        | s                |
| Electron diffusion const in base               | Dn                                                                                                                                                                                                                | 2.85e-2     | m <sup>2</sup> s |
| Hole diffusion const in emitter                | Dpe                                                                                                                                                                                                               | 3.75e-2     | m <sup>2</sup> s |
| Hole diffusion const in colleter               | Dpc                                                                                                                                                                                                               | 3.75e-2     | m <sup>2</sup> s |
| InGaAs thermal velocity                        | vth                                                                                                                                                                                                               | 6.37e5      | m/s              |
| InP thermal velocity                           | vp                                                                                                                                                                                                                | 4.23e5      | m/s              |
| Emitter doping                                 | Nd                                                                                                                                                                                                                | 3e23        | m <sup>-3</sup>  |
| Collector doping                               | Ndc                                                                                                                                                                                                               | 3e22        | m <sup>-3</sup>  |
| Base doping                                    | Na                                                                                                                                                                                                                | 1e25        | m <sup>-3</sup>  |
| Eff.State den.In cond.Band of InP              | Nc                                                                                                                                                                                                                | 4.16e23     | m <sup>-3</sup>  |
| Eff.State den.In cond.Band of InGaAs           | Nv                                                                                                                                                                                                                | 1.37e25     | m <sup>-3</sup>  |
| InGaAs capture center density                  | Nt1                                                                                                                                                                                                               | 1.5e19      | m <sup>-3</sup>  |
| InP capture center density                     | Nt2                                                                                                                                                                                                               | 3e22        | m <sup>-3</sup>  |
| GaInAsP intrinsic carrier concentration        | 4.3*10 <sup>8</sup> (y=0.27)<br>4.4*10 <sup>9</sup> (y=0.47)<br>6.7*10 <sup>11</sup> (y=1)<br>2*10 <sup>10</sup> (y=0.58)                                                                                         |             | m <sup>-3</sup>  |
| GaInAsP Eff.State den.In cond.Band<br>(Nc)     | 2.5*10 <sup>19</sup> (0.08-0.039y) <sup>3/2</sup><br>2.5*10 <sup>19</sup> (0.08-0.039*0.58) <sup>3/2</sup> =3.44*10 <sup>17</sup><br>2.5*10 <sup>19</sup> (0.08-0.039*0.27) <sup>3/2</sup> =4.58*10 <sup>17</sup> |             | m <sup>-3</sup>  |
| GaInAsP Eff.State den.In val.Band<br>(Nv)      | 2.5*10 <sup>19</sup> (0.6-0.18y) <sup>3/2</sup><br>2.5*10 <sup>19</sup> (0.6-0.18*0.58) <sup>3/2</sup> =8.72*10 <sup>18</sup><br>2.5*10 <sup>19</sup> (0.6-0.18*0.27) <sup>3/2</sup> =1.02*10 <sup>19</sup>       |             | m <sup>-3</sup>  |
| GaInAsP electron thermal velocity              | (3.9+1.6y) 10 <sup>5</sup>                                                                                                                                                                                        |             | m/s              |

|                                 |                                      |    |
|---------------------------------|--------------------------------------|----|
| $(v_{in})$                      | $(3.9+1.6*0.58) 10^5 = 4.828*10^5$   |    |
|                                 | $(3.9+1.6*0.27) 10^5 = 4.332*10^5$   |    |
| GaInAsP effective electron mass | $(0.08-0.039y)m_0$                   | kg |
| $(m_e)$                         | $(0.08-0.039*0.58)m_0 = 0.05738 m_0$ |    |
|                                 | $(0.08-0.039*0.27)m_0 = 0.06947 m_0$ |    |

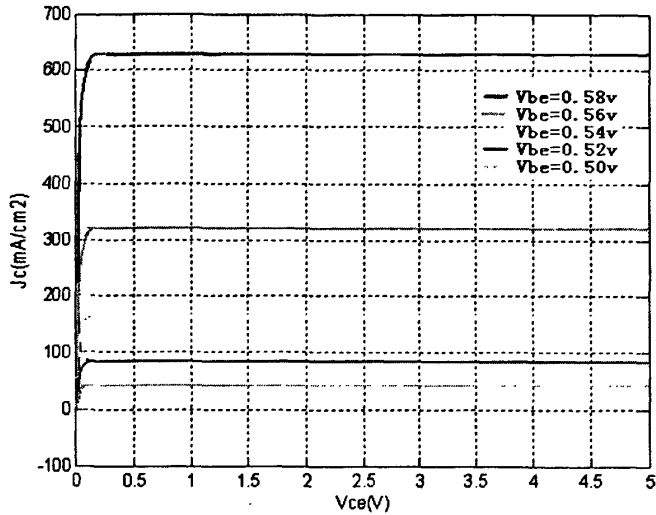


图 3.13 带有能带阶梯缓变复合集电区的 InP 基 DHBT 输出特性模拟结果

图 3.13 给出了模拟的 InP 基 DHBT 结构的直流输出特性曲线。在计算中，取发射区 n-InP 掺杂浓度为  $3E17cm^{-3}$ ，基区 p-InGaAs 掺杂浓度  $1E19cm^{-3}$ ，集电区 n-InP 掺杂浓度  $1E16cm^{-3}$ ，复合集电区 n-InGaAsP 掺杂浓度  $2E16cm^{-3}$ 。由模拟结果可见，在集电结处引入能带阶梯缓变的 InGaAsP 层，降低了突变 B-C 结由于导带不连续性而形成的势垒尖峰高度，可有效克服电流阻挡效应，获得较好的输出特性。

### 3.5 小结

本章对集电结带有 n 型 InGaP 插入层的 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 和带有能带阶梯缓变 InGaAsP 插入层的 InP/InGaAs/InP DHBT 的电流传输特性及其对器件性能的影响进行了理论模拟和分析。分别计算和分析了 n-InGaP 插入层厚度和掺杂浓度对 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 输出特性的影响。结果表明，选取适当的插入层厚度和掺

杂浓度（比如厚度 5nm，掺杂浓度  $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ）可以获得较好的直流输出特性。通过对带有能带阶梯缓变复合集电区 InP/InGaAs/InP DHBT 结构直流特性的分析和模拟，表明在 B-C 结插入能带阶梯递变的 InGaAsP 插入层，可以有效地降低 B-C 结处由于导带不连续性而形成的势垒尖峰，克服电流阻挡效应，获得较好的输出特性。这些结果说明，在 DHBT 材料结构设计中，采用这种两种方法都可以有效地降低集电结处的导带势垒尖峰高度，获得良好的输出特性。

## 第四章 GaAs基和InP基DHBT材料的GSMBE生长与特性研究

InGaP/GaAs/InGaP DHBT 和 InP/InGaAs/InP DHBT 都是多层异质结构材料,其中涉及到不同掺杂类型和掺杂浓度的 GaAs、InP、InGaP、InGaAs、InGaAsP 等二元、三元和四元系化合物材料,每一单层材料的外延生长都很关键,任何一单层外延材料的质量最终都将影响到器件的性能。因此,为了研制出满足器件要求的高质量外延材料,本章采用气态源分子束外延(GSMBE)技术,首先对各个单层材料的外延生长进行了深入的实验研究,通过对掺杂浓度、电学特性、晶体质量、表面形貌以及大面积均匀性等特性的测试分析,优化了外延生长条件。在此基础上,进行了所设计的 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 和 InP/InGaAs/InP DHBT 器件结构外延材料的生长,并研制出性能较好的 DHBT 器件结构外延材料。

### 4.1 GaAs 基和 InP 基 DHBT 用各单层材料的 GSMBE 生长与特性

#### 4.1.1 衬底准备

由于 GSMBE 系统是一个高度清洁的真空系统,因此需要在材料外延生长之前对衬底表面进行精心的制备处理,以保证衬底的清洁程度达到外延生长的要求。在起始生长之前,还须通过高能电子衍射(RHEED)的监控,在真空系统内进行衬底表面的除气与解吸。当采用非 epi-ready 衬底时,需要在生长之前清洗衬底,步骤如下:

- 1、有机试剂清洗:分别用异丙醇、丙酮、乙醇超声清洗各三次,以去除表面油渍。清洗时要让衬底一直浸泡在有机试剂中,而不能暴露在大气中;
- 2、用去离子水冲洗 100 次,要求去离子水电阻率 $\geq 18\text{M}\Omega$ ;
- 3、化学腐蚀:化学腐蚀主要用以去除衬底表面因机械切割、研磨、抛光带来的机械损伤以及表面吸附的杂质和氧化膜。化学腐蚀过程包括氧化过程和溶解过程,通过腐蚀液中的氧化剂如过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ )在表面形成氧化物,然后通过酸将氧化物溶解,从而获得新鲜的清洁表面;
- 4、腐蚀后用去离子水冲洗不少于 100 次,然后用氮气吹干。此过程中会形成一层薄的氧化膜来保护腐蚀后的新鲜衬底表面;
- 5、将处理好的衬底装在在钼块上后,迅速将钼块装入外延系统的快速进样室,并加

热至 150℃ 以去除衬底表面吸附的水汽；

- 6、将衬底送入外延系统的预处理室进行除气。对于 GaAs 衬底，除气温度为 400℃；对于 InP 衬底，除气温度为 350℃。除气的目的是将衬底表面的水汽和其它挥发性沾污物进一步脱附在预处理室里，以免玷污生长室。除气约 30 分钟，完成后即可传入生长室；
- 7、生长前的衬底表面解吸：对于 GaAs 衬底，在 As 气氛的保护下加热至解吸温度（600℃~630℃）以去除表面的氧化层；对于 InP 衬底，加热至 495℃~500℃解析，在加热时需使衬底处于 P 气氛下加以保护。解吸的过程用 RHEED 来监控，随着氧化层的脱附，RHEED 的衍射图案将产生由点状拉伸为长条的突变，此时可以观察到 (2×4) 的 As（或 P）稳态再构。

#### 4.1.2 GaAs 外延材料的 GSMBE 生长

在 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 结构中，基区、亚集电区（Sub-collector）和亚盖顶层（Sub-cap）均由 GaAs 材料构成。GaAs 在 GSMBE 生长时的衬底温度为 580℃，在这一温度下生长的 GaAs 材料有着较好的晶体质量，掺杂剂 Si 和 Be 也有较好的电激活特性，容易获得较好的电学性能<sup>[97-101]</sup>。在 GaAs 生长之前，采用束流规来测量 Ga 的束流，以此来控制 GaAs 的生长速率。AsH<sub>3</sub> 的裂解温度为 1000℃，通过调节气路中 AsH<sub>3</sub> 的压力来控制 As 束流的大小。在本文实验中，气源炉 AsH<sub>3</sub> 的压力  $P_V = 450 \sim 550$  Torr，相应的生长室压力为  $1.8 \sim 2.5 \times 10^{-5}$  Torr。生长时衬底以每分钟 5 转的速度旋转，以保证外延材料的均匀性。

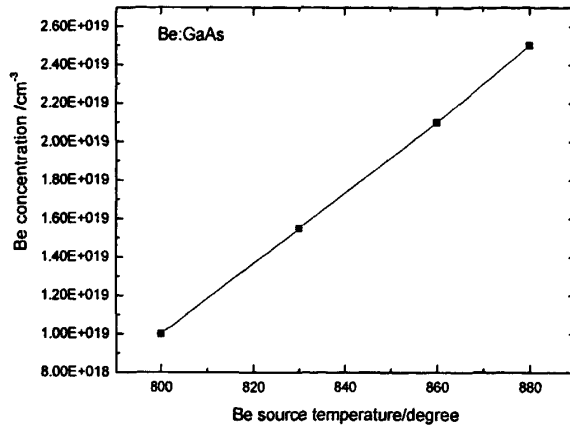


图 4.1 Be 掺杂 p-GaAs 掺杂浓度随 Be 束源炉温度的变化

图 4.1 给出了在 GaAs 衬底上生长的 Be 掺杂 p 型 GaAs 材料掺杂浓度随 Be 束源炉温度的变化。可以看出，随着 Be 束源炉温度的增加，GaAs 中的掺杂浓度不断增加，并呈线性变化的规律，说明对掺杂浓度具有比较好的控制性。在实际器件结构材料的生长中，通过该曲线所示的 Be 束源炉温度与掺杂浓度的关系，就可以选择合适的 Be 束源炉温度以获得所需要的掺杂浓度。

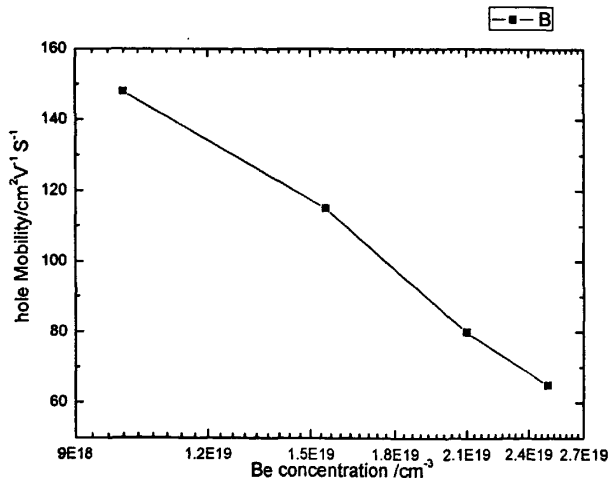


图 4.2 Be 掺杂 p-GaAs 空穴迁移率随掺杂浓度的变化

图 4.2 是利用室温 Hall 测量得到的 Be 掺杂 p 型 GaAs 外延层中空穴迁移率随掺杂浓度的变化。可以看到, 由于在高掺杂情况下电离杂质散射对载流子迁移率的影响将起主要作用, 所以随着掺杂浓度的不断增加, 空穴迁移率逐步下降<sup>[102]</sup>。

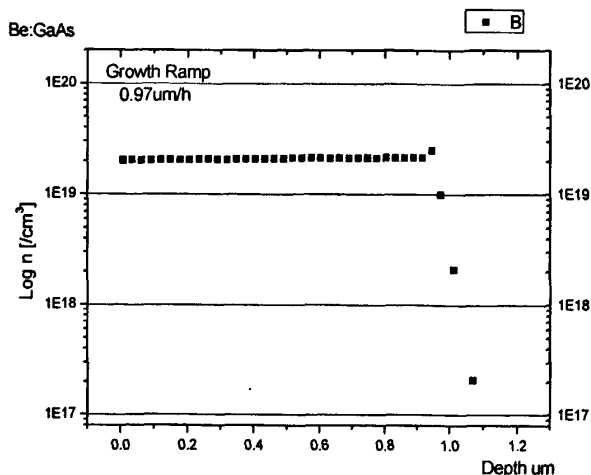


图 4.3 Be 掺杂 p-GaAs 外延材料的电化学 C-V 测试结果

在 HBT 应用中, p 型基区材料的掺杂浓度通常要求在  $1\text{E}19\text{cm}^{-3}$  以上。图 4.3 是在 GaAs 衬底上生长的高浓度 Be 掺杂 p-GaAs 外延层空穴浓度深度分布的电化学 C-V 测试结果。可见 p 型掺杂浓度接近  $2\text{E}19\text{cm}^{-3}$ , 并且空穴浓度随深度的分布非常均匀, 说明杂质分布具有良好的深度均匀性。

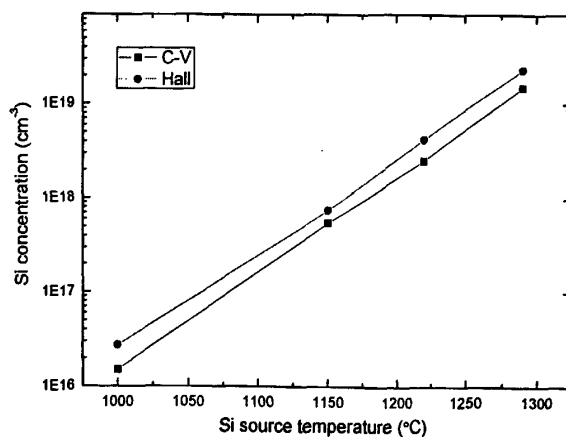


图 4.4 Si 掺杂 n-GaAs 掺杂浓度随 Si 束源炉温度的变化

图 4.4 是在 GaAs 衬底上生长 Si 掺杂 n 型 GaAs 材料时掺杂浓度随 Si 束源炉温度的变化。可以看出，所生长的 n-GaAs 中的掺杂浓度随 Si 束源炉温度也呈很好的线性变化规律，并且分别通过电化学 C-V 和 Hall 测量获得的掺杂浓度与 Si 束源炉温度之间的关系具有非常好的一致性。

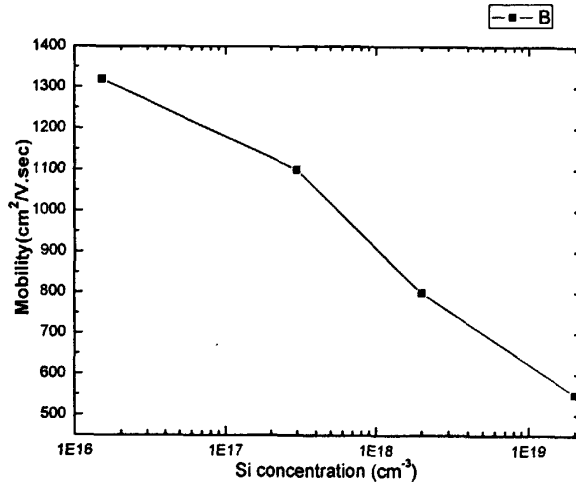


图 4.5 Si 掺杂 n-GaAs 电子迁移率随掺杂浓度的变化

图 4.5 是在 GaAs 衬底上外延生长的 Si 掺杂 n-GaAs 材料电子迁移率随掺杂浓度的变换。同样可见，随着 Si 掺杂浓度的增加，电子迁移率也由于受到不断增强的电离杂质散射的影响而下降。

在生长 GaAs 时，需要在富 As 的条件下生长，此时 III 族 Ga 原子在衬底表面的粘附系数为 1，而 As<sub>2</sub> 只能在吸附着 Ga 原子的表面与 Ga 成键，因此 GaAs 的生长速率由 Ga 的束流控制并且成正比。对于本工作所使用的 GSMBE 系统，当 Ga 束流的测量值大约为 60nA 时，GaAs 的生长速率约为 1μm/小时。图 4.6 和 4.7 分别为掺 Si 和掺 Be 的 GaAs 外延层表面的原子力显微镜 (AFM) 测量结果。可以看出，在掺 Si 和掺 Be 情况下 GaAs 外延层都具有较好的表面形貌，表面粗糙度 Rms 分别为 0.197nm 和 0.249nm，说明通过生长条件的优化，即使对于高浓度掺杂的 GaAs 外延材料，也没有因很高的掺杂浓度而引起表面缺陷和位错密度的增加。

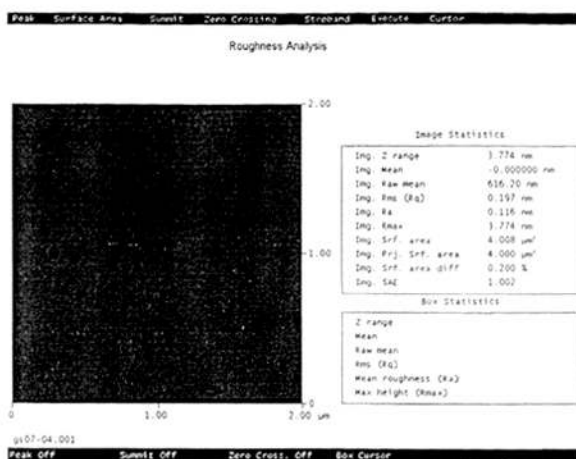


图 4.6 Si 掺杂 n-GaAs 外延层表面的 AFM 图像

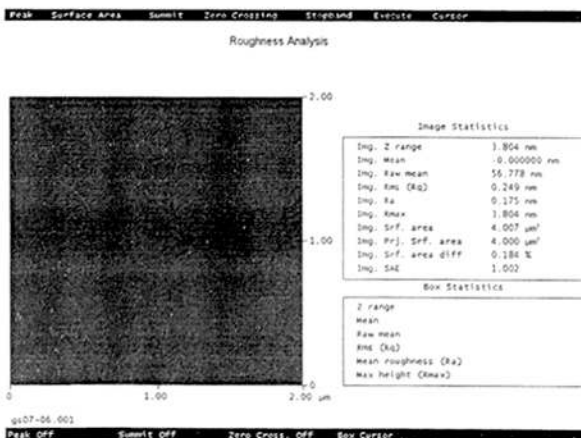


图 4.7 Be 掺杂 p-GaAs 外延层表面的 AFM 图像

#### 4.1.3 InGaP 外延材料的 GSMBE 生长

与 GaAs 晶格匹配的 InGaP 在 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 结构中分别作为发射区和集电区材料。对于只含有一种 V 族元素 P 的三元混晶 InGaP 来说，外延材料的生长速率主要取决于 III 族元素 In 和 Ga 的分子束强度之和。生长在富 P 气氛下进行，外延层组份则由 In 和 Ga 的分子束强度比来决定。为了调节 InGaP 外延层的组份以达到与 GaAs 衬底晶格匹配，必须精确校正 Ga 与 In 的分子束强度比。在本工作中，外延层与衬底的晶格失配率用 X 射线双晶衍射 (XRD) 来测量，组份则根据 Vegard 法

则来确定。图 4.8 所示为 InGaP/GaAs 外延材料的 XRD 衍射曲线，图中 InGaP 外延层的晶格失配为  $-4.3 \times 10^{-4}$ ，半高峰宽（FWHM）为 30.9 弧秒，说明所生长的 InGaP 外延层具有良好的晶体质量，与 GaAs 的晶格失配也非常小。图 4.9 为 Si 掺杂 n-InGaP 外延层的电化学 C-V 测量结果。可以看出，其具有均匀的掺杂浓度深度分布。室温 Hall 测量表明，当 InGaP 外延层电子浓度为  $3.1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  时，电子迁移率为  $762 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，具有良好的电学特性，符合对发射区材料掺杂浓度的要求。

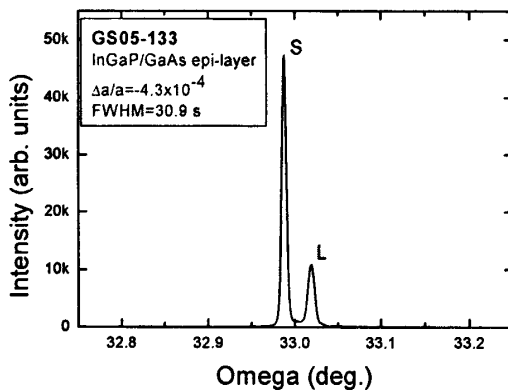


图 4.8 InGaP/GaAs 外延材料的 XRD 衍射曲线

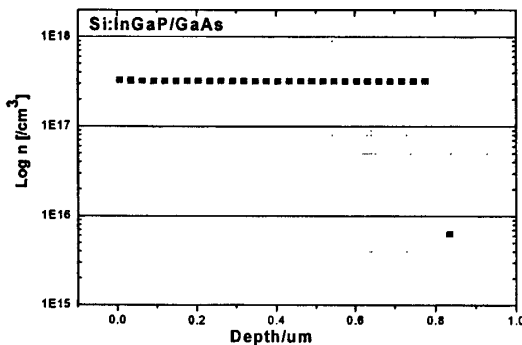


图 4.9 Si 掺杂 n-InGaP 外延层的电化学 C-V 测试结果

图 4.10 为 Si 掺杂 n-InGaP 外延层表面的 AFM 测试图，其表面粗糙度  $R_{\text{ms}}$  为  $0.442 \text{nm}$ ，说明具有较好的表面质量。图 4.11 为 InGaP/GaAs 外延材料剖面的扫描电镜（SEM）照片。可以看出，异质结构的界面非常平整，没有位错缺陷的产生。通过 AFM 和 SEM 测试可知，所生长的 InGaP 外延材料有良好的晶体质量和表面形貌，可以满足器件结构材料生长的要求。

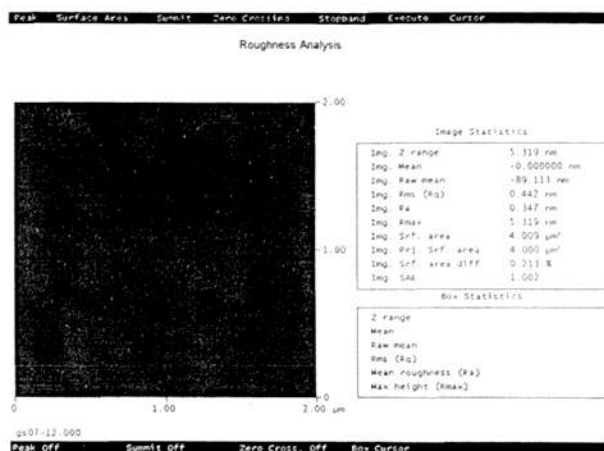


图 4.10 InGaP 外延层表面的 AFM 图像

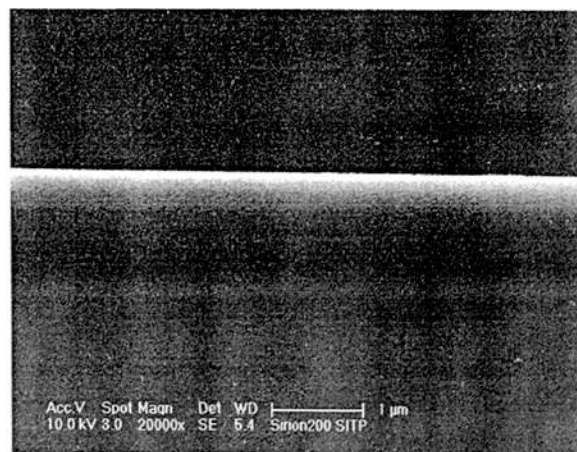


图 4.11 InGaP/GaAs 外延材料剖面的 SEM 图像

#### 4.1.4 高失配 InGaAs 盖顶层材料的光束生长

在 GaAs 基 HBT 结构中，由于 InGaAs 具有比 GaAs 更小的禁带宽度和更高的 n 型掺杂浓度极限，适合于制作良好的欧姆接触，因此常采用高 In 组份（In 组份含量可以达到  $x=0.5$ ）、重掺杂的 InGaAs 作为 HBT 结构的盖顶层（cap）材料。但由于高 In 组份 InGaAs 与 GaAs 的晶格失配很大，容易产生大量的失配位错，降低外延材料的晶体质量和表面形貌，因此生长的难度很大。为了降低大失配的影响，我们采用了在 GaAs 和 InGaAs 之间生长一个很薄的（50nm）GaAs—InGaAs 过渡层的方法。通过优化生长条件，成功地生长出高失配、重掺杂的 InGaAs 盖顶层材料，其中 In 的含

量达到 50%。图 4.12 是高失配  $n^+$ -InGaAs 外延层表面的 AFM 测试图，表面粗糙度 Rms 为 1.805nm，说明具有较好的表面质量。图 4.13 为高失配 InGaAs/GaAs 外延材料剖面的 SEM 照片，从中看不出缺陷和位错，完全可以满足器件制作的要求。

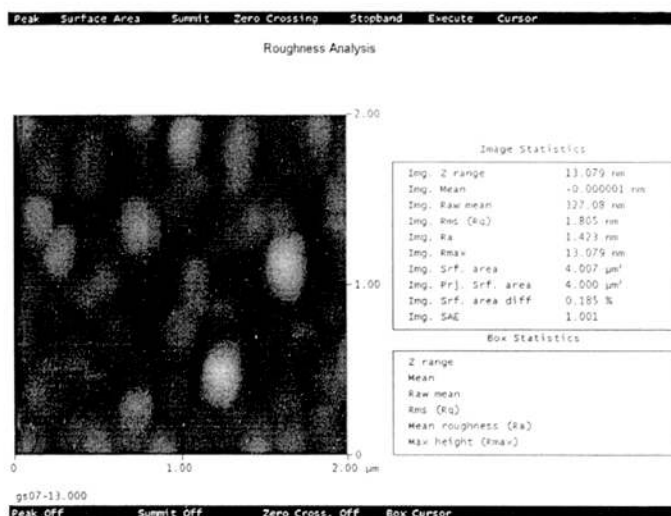


图 4.12 InGaAs/GaAs 高失配高掺杂的 AFM 图像

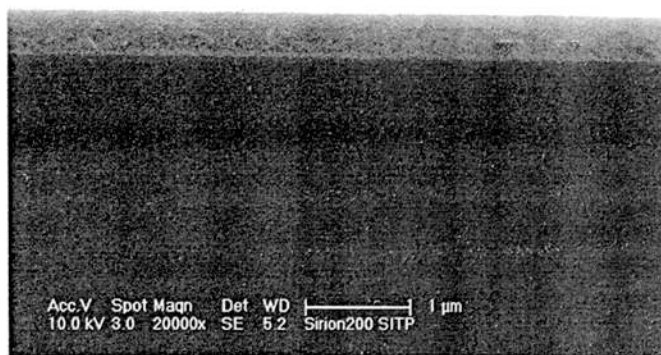


图 4.13 InGaAs 高掺杂高失配材料的 SEM 剖面图像

#### 4.1.5 InP 外延材料的 GSMBE 生长

InP 材料在 InP/InGaAs/InP DHBT 结构中分别作为发射区和集电区，因此高质量

InP 外延材料的生长对于获得良好的器件性能是非常重要的。与 GaAs 的生长类似, InP 的生长速率也主要由 III 族元素 In 的束流强度来控制, 由高温裂解的  $\text{PH}_3$  作为 V 族束源。在本工作所用 GSMBE 系统中,  $\text{PH}_3$  的裂解温度为  $1000^\circ\text{C}$ , 通过调节气路中  $\text{PH}_3$  的压力来控制 P 束流的大小。在本文实验中, 气源炉  $\text{PH}_3$  的压力  $P_V=450\sim550$  Torr, 相应的生长室压力为  $4.8\sim5.5\times10^{-5}\text{Torr}$ 。InP 生长时的衬底温度为  $500^\circ\text{C}$ 。

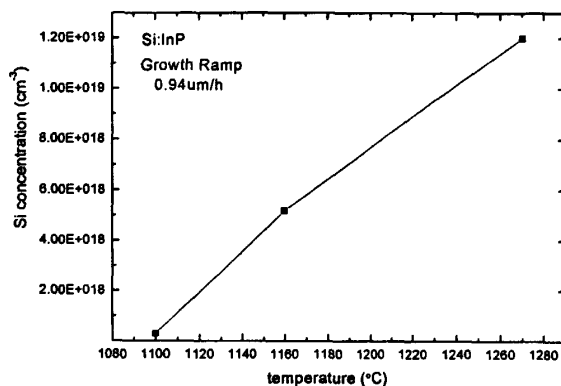


图 4.14 Si 掺杂 n-InP 掺杂浓度随 Si 束源炉温度的变化

图 4.14 是生长 Si 掺杂 n 型 InP 材料时掺杂浓度随 Si 束源炉温度的变化。可以看出, 掺杂浓度随 Si 束源炉温度的变化基本呈线性关系, 利用这个关系就可以根据器件结构的对掺杂浓度的需要来选取合适的生长条件。

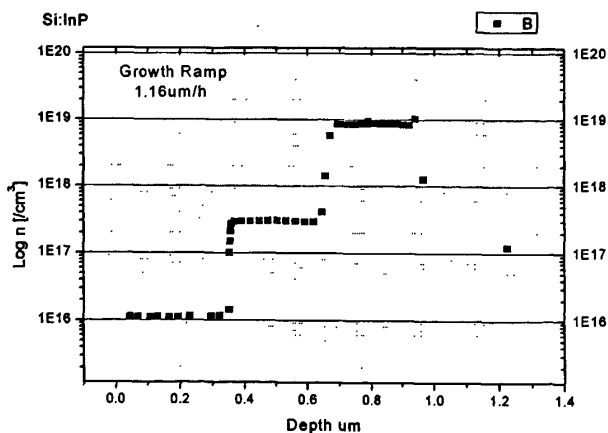


图 4.15 不同掺杂浓度多层 n-InP 结构的电化学 C-V 测试结果

图 4.15 是具有不同掺杂浓度多层 n-InP 结构的电化学 C-V 测试结果。所用样品是在不同 Si 束源炉温度下连续生长而成的，可以看到掺杂浓度的分布形成了层内平坦、界面陡峭的阶梯形状，说明所生长的 n-InP 材料具有很好的掺杂控制性。

#### 4.1.6 InGaAs 外延材料的 GSMBE 生长

InGaAs 材料在 InP/InGaAs/InP DHBT 结构中分别用作基区、欧姆接触层和腐蚀截止层。对于只含有一种 V 族元素的三元系材料 InGaAs 来说，与 InGaP 类似，其生长速率也主要取决于 III 族元素 In 和 Ga 的分子束强度之和，而组份则由 In 和 Ga 的分子束强度比决定。因此，为了调节 InGaAs 外延层的组份以达到与 InP 衬底晶格匹配，必须精确校正 In 和 Ga 的束流比  $f_{\text{In}}/f_{\text{Ga}}$ 。在本工作 InGaAs 材料生长过程中， $\text{AsH}_3$  的压力维持在 550Torr，相应的生长室压力为  $2.5 \times 10^{-5}$ Torr。我们采用 XRD 来测定外延层与衬底之间的失配度，并据此计算三元合金材料的组份，同时根据外延层衍射峰的半高峰宽（FWHM）来判定外延材料的晶体质量。

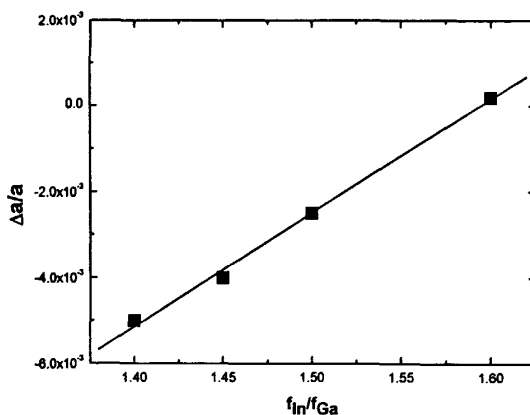


图 4.16 InGaAs/InP 晶格失配度随 In/Ga 束流强度比的变化

图 4.16 给出了由实验获得的  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  外延层与 InP 衬底之间晶格失配度  $\Delta a/a$  随 In/Ga 束流强度比  $f_{\text{In}}/f_{\text{Ga}}$  的变化。可以看出，对于本文所用的 GSMBE 系统和生长条件， $f_{\text{In}}/f_{\text{Ga}}$  束流强度比大约在 1.58 的时候基本可以达到晶格匹配。由图 4.16 同时可以看出，InGaAs/InP 晶格失配度对  $f_{\text{In}}/f_{\text{Ga}}$  的变化十分敏感， $f_{\text{In}}/f_{\text{Ga}}$  微小的改变就会引

起失配度从  $10^{-5}$  到  $10^{-3}$  的变化。通过对大量实验条件的摸索, 我们已经可以实现对束流强度的精确控制, 从而将晶格失配度控制在  $\Delta a/a \leq 1 \times 10^{-3}$ 。另外, 生长温度也对 InGaAs 材料的组份和性能有着明显的影响, 在高温和低温下的生长速率和材料组份都有较显著的变化<sup>[103-106]</sup>, 因此在材料生长过程中, 还必须充分考虑这些因素。图 4.17 给出了所生长的 InGaAs/InP 外延材料的 XRD 摇摆曲线。InGaAs/InP 异质结构的晶格失配度为  $-1.33 \times 10^{-4}$ , In 组份含量为 52.88%, 并具有较好的晶体质量。

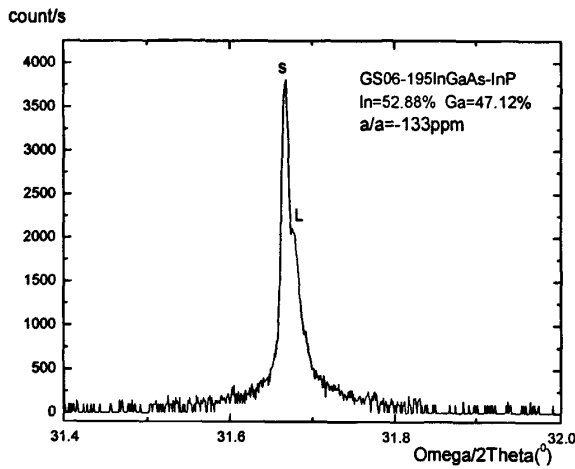


图 4.17 InGaAs/InP 外延材料的 XRD 摇摆曲线

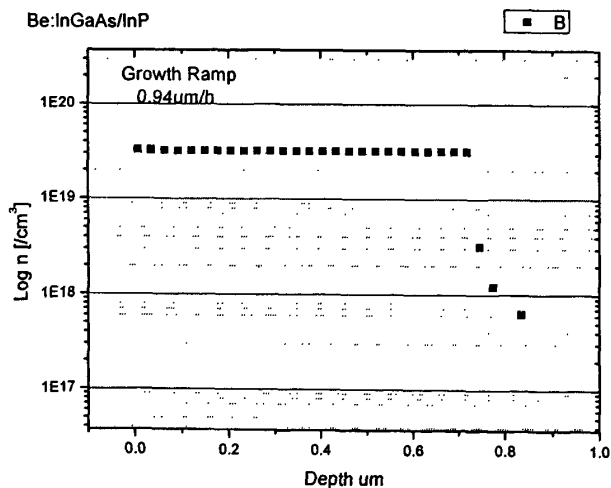


图 4.18 Be 掺杂 p-InGaAs 外延层的电化学 C-V 测试结果

图 4.18 是在 InP 衬底上生长的 Be 掺杂 p 型 InGaAs 外延层的电化学 C-V 测试结果。可以看出, 空穴浓度高达  $3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ , 并且杂质分布具有非常好的深度均匀性。Hall 测量表明材料的空穴迁移率为  $56.5 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ , 具有较好的电学特性, 可以满足 DHBT 器件对基区材料的要求。

#### 4.1.7 InGaAsP 外延材料的 GSMBE 生长

对于 InP/InGaAs/InP DHBT 结构, 在本文前面的模拟分析中已说明, 在集电结处采用能带阶梯缓变的 InGaAsP 插入层可以降低导带的势垒尖峰高度, 克服电流阻挡效应。但由于 InGaAsP 是分别含有两种 III 族元素和两种 V 族元素的四元系化合物, 既要使其与 InP 晶格匹配, 又要获得所需要的禁带宽度, 因此 InGaAsP 材料的生长难度是比较大的。同时, 在 InGaAsP 材料的外延生长过程中, 存在两个 V 族束源的控制问题。在 InP 衬底升温除气、解析的过程中, 要用  $\text{P}_2$  做保护气体。而当要生长 InGaAsP 的时候则需要开启两个 V 族束源, 并通过调节  $\text{PH}_3$  和  $\text{AsH}_3$  压力的大小来调整  $\text{As}_2$  和  $\text{P}_2$  束流强度的比例以控制材料的组份。我们采用的切换方法是在 InP 层生长完之后, 打开  $\text{As}_2$  束流, 同时调整  $\text{P}_2$  束流强度, 静止若干时间让  $\text{As}_2$  和  $\text{P}_2$  在生长室内充分混合, 然后再开始生长 InGaAsP 外延层。

如上所述, 由于 InGaAsP 是四元系材料, 其中存在两种 III 族元素和两种 V 族元素, 在相同的晶格常数下存在多种组合的可能, 因此就不能仅仅通过测定 XRD 摇摆曲线来确定其组份。需要通过 XRD 测量来确定晶格失配度, 同时通过光致发光谱(PL)来测定 InGaAsP 材料的发光波长, 从而由本征发光波长来得到其禁带宽度  $E_g$ 。本文根据前面对 InP 基 DHBT 器件特性模拟分析的结果和器件结构材料生长的要求, 通过大量实验摸索, 成功地生长出两种与 InP 晶格匹配但具有不同禁带宽度的 InGaAsP 四元系外延材料。图 4.19 和 4.20 分别是两个 InGaAsP 外延材料样品的 PL 谱, 其发光波长分别为  $1.09 \mu\text{m}$  和  $1.408 \mu\text{m}$ , 相应的禁带宽度  $E_g$  分别为  $1.13 \text{eV}$  和  $0.90 \text{eV}$ , 与 InP 基 DHBT 结构设计中所需要的禁带宽度比较符合。同时, 较好的本征发光也说明外延材料具有较好的晶体质量。

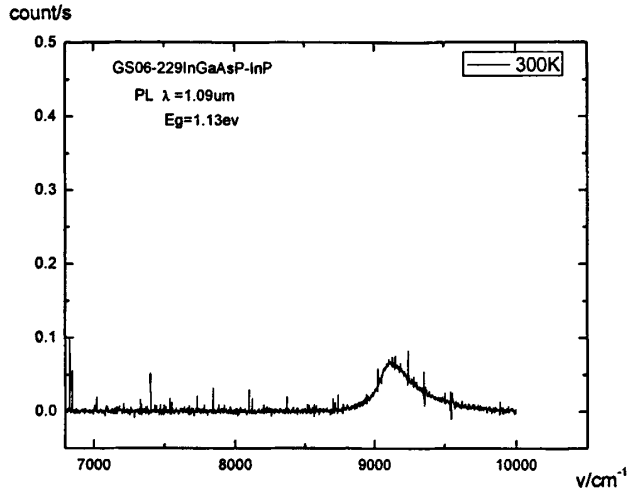
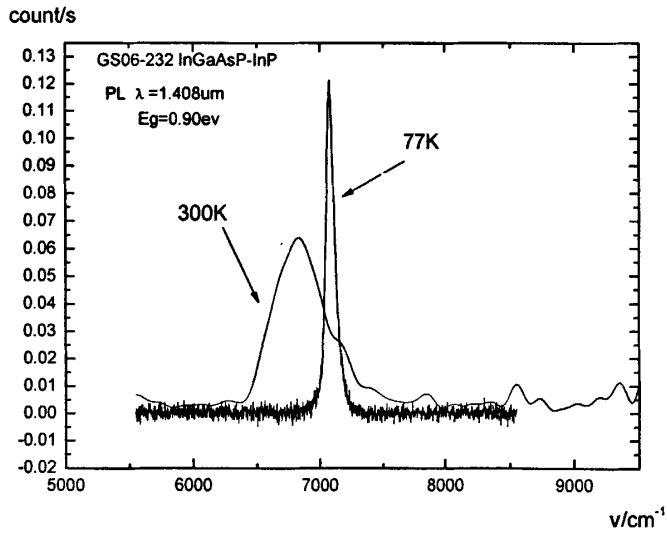
图 4.19 InGaAsP 外延材料 ( $E_g=1.13\text{eV}$ ) 300K 的 PL 谱图 4.20 InGaAsP 外延材料 ( $E_g=0.90\text{eV}$ ) 300K 和 77K 的 PL 谱

图 4.21 和 4.22 分别是两个 InGaAsP/InP 样品的 XRD 摇摆曲线。由图中可以看出, InGaAsP/InP 异质结构的晶格失配分别为  $2.59 \times 10^{-3}$  和  $-6.40 \times 10^{-4}$ , 具有较好的晶格匹配, 可以满足在器件结构材料中应用的要求。

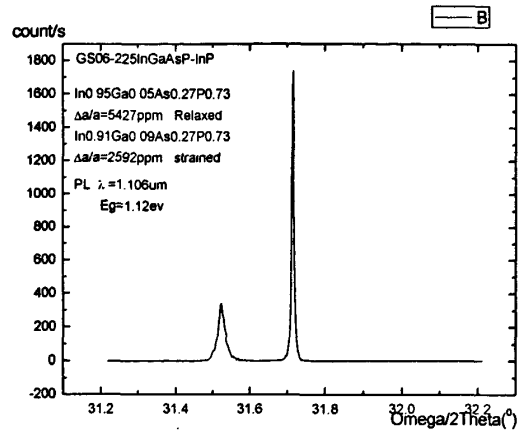


图 4.21 InGaAsP/InP 外延材料 ( $\Delta a/a \approx 2.59 \times 10^{-3}$ ) 的 XRD 摇摆曲线

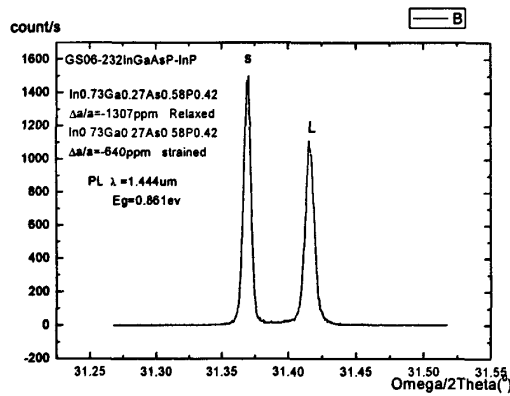


图 4.22 InGaAsP/InP 外延材料 ( $\Delta a/a \approx -6.40 \times 10^{-4}$ ) 的 XRD 摇摆曲线

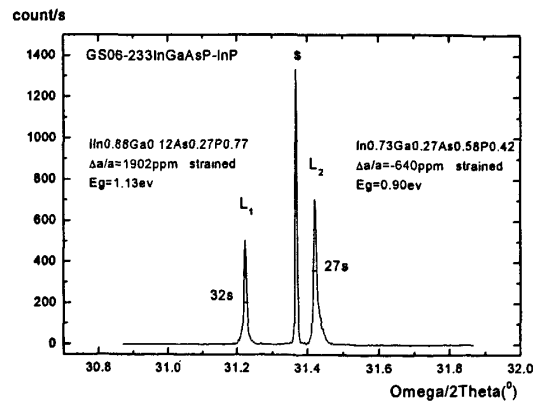


图 4.23 两种不同禁带宽度 InGaAsP/InP 外延材料的 XRD 摇摆曲线

图 4.23 为将两种不同禁带宽度的 InGaAsP 材料依次外延生长在 InP 衬底上的样品的 XRD 摇摆曲线, 图中 L1 峰 (即  $\text{In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.27}\text{P}_{0.73}$  层) 的晶格失配度为  $1.90 \times 10^{-3}$ , L2 峰 (即  $\text{In}_{0.73}\text{Ga}_{0.27}\text{As}_{0.58}\text{P}_{0.42}$  层) 的晶格失配度为  $-6.40 \times 10^{-4}$ , 半高峰宽 (FWHM) 分别为 32 弧秒和 27 弧秒。XRD 测试结果表明, 通过优化生长条件, 将这两种不同禁带宽度的 InGaAsP 四元系材料依次生长一起形成的多层异质结构仍具有良好的晶体质量, 可以满足器件结构材料生长的要求。

由于 DHBT 是多层异质结构材料, 因此 InGaAsP 四元系外延材料表面质量的好坏对于后续生长的基区和发射区材料的质量有着至关重要的影响。为了分析 InGaAsP 四元系外延材料的表面质量, 我们用 SEM 和 AFM 测定了材料的表面和界面形貌。图 4.24 和 4.25 分别是  $\text{In}_{0.73}\text{Ga}_{0.27}\text{As}_{0.58}\text{P}_{0.42}$  和  $\text{In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.27}\text{P}_{0.77}$  外延材料表面和界面的 SEM 和 AFM 测试图, 其表面粗糙度 Rms 分别为 1.571nm 和 0.614nm。图 4.26 为两层不同组份 (即  $\text{In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.27}\text{P}_{0.73}/\text{In}_{0.73}\text{Ga}_{0.27}\text{As}_{0.58}\text{P}_{0.42}$ ) 材料依次生长后的界面特性和表面形貌, 可以看出界面平整, 表面粗糙度 Rms 为 0.982nm。

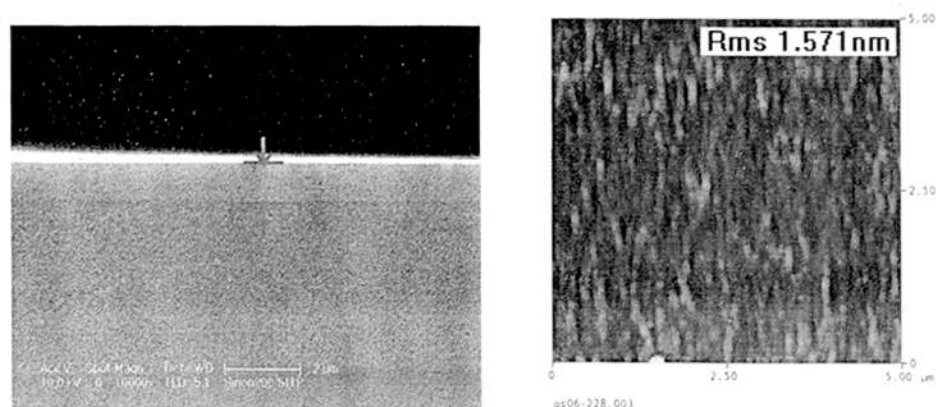


图 4.24  $\text{In}_{0.73}\text{Ga}_{0.27}\text{As}_{0.58}\text{P}_{0.42}$  外延材料的 SEM 和 AFM 测试图

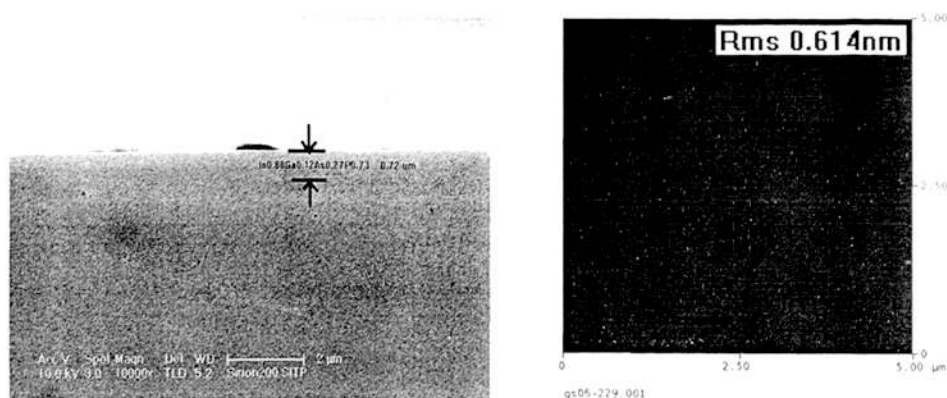
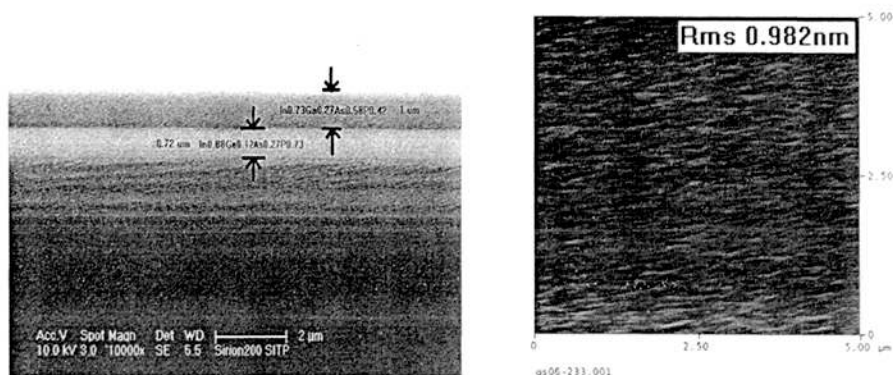

 图 4.25  $\text{In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.27}\text{P}_{0.77}$  外延材料的 SEM 和 AFM 测试图


图 4.26 两种不同组份的 InGaAsP 四元系材料依次外延生长后的 SEM 和 AFM 测试图

## 4.2 外延材料的大面积均匀性

### 4.2.1 $\Phi 2$ 英寸 InGaAs 外延层的组份均匀性

为了研究 InGaAs 外延材料的大面积均匀性，在  $\Phi 2$  英寸的 InP 衬底上生长了晶格匹配的 InGaAs 材料，生长速率为  $0.93 \mu\text{m}/\text{小时}$ 。生长时，首先在  $700^\circ\text{C}$  条件下生长  $200\text{nm}$  的 InP 缓冲层作为过渡，然后衬底温度降至  $560^\circ\text{C}$  左右进行  $\text{PH}_3/\text{AsH}_3$  切换，生长 InGaAs 外延材料。InGaAs 材料的组份用 XRD 测定，在  $\Phi 2$  英寸的 InGaAs 材料上，选取 x 轴和 y 轴两个坐标轴。在 x 轴和 y 轴上分别距离平均地选取 9 个测试点，距离中心点分别是正负方向  $5\text{mm}$ 、 $10\text{mm}$ 、 $15\text{mm}$  和  $20\text{mm}$ （如图 4.27 所示）。在每

个点上分别测量 In 的组份含量, 所得测试数据如表 4.1 和 4.2 所示。

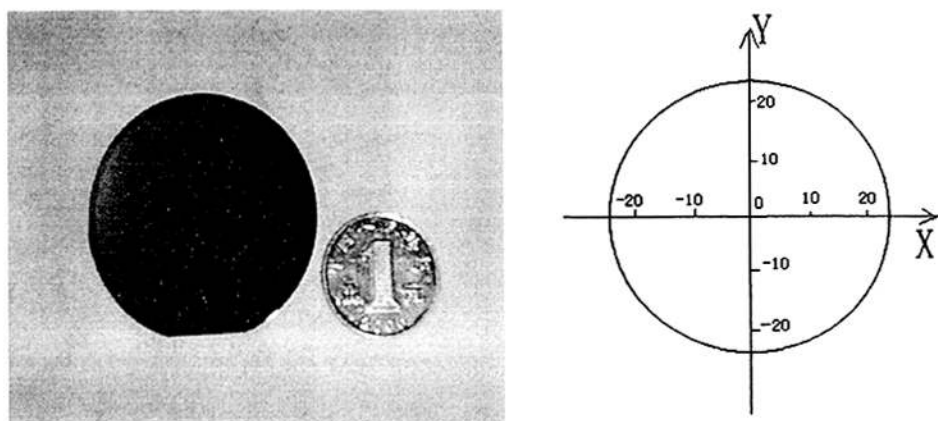


图 4.27  $\Phi 2$  英寸 InGaAs/InP 外延材料及组份测试坐标点

表 4.1  $\Phi 2$  英寸 InGaAs 外延层 X 轴的 In 组份含量测试数据

| X 轴坐标<br>(mm) | -20    | -15    | -10    | -5     | 0      | 5      | 10     | 15     | 20     | 平均    |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| In 含量 (%)     | 52.333 | 52.312 | 52.301 | 52.296 | 52.292 | 52.297 | 52.306 | 52.319 | 52.334 | 52.31 |

表 4.2  $\Phi 2$  英寸 InGaAs 外延层 Y 轴的 In 组份含量测试数据

| Y 轴坐标<br>(mm) | -20    | -15    | -10    | -5     | 0      | 5      | 10     | 15     | 20     | 平均    |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| In 含量 (%)     | 52.334 | 52.312 | 52.301 | 52.295 | 52.292 | 52.298 | 52.307 | 52.325 | 52.346 | 52.31 |

图 4.28 和 4.29 分别给出了实验测得的  $\Phi 2$  英寸 InGaAs 外延层在 X 轴和 Y 轴上各测试点的 In 组份含量分布, 图中用虚线标出了组份偏差为  $\pm 1\%$  的范围。可以看到, 所生长的 InGaAs 外延材料的 In 组份分布偏差在整个  $\Phi 2$  英寸的范围内均远小于  $1\%$ , 说明具有非常好的大面积组份均匀性。

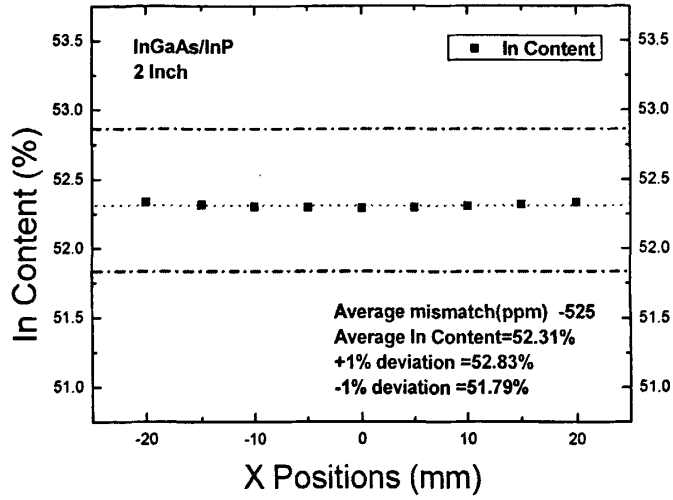


图 4.28  $\Phi 2$  英寸 InGaAs 外延层 X 轴的 In 组份均匀性

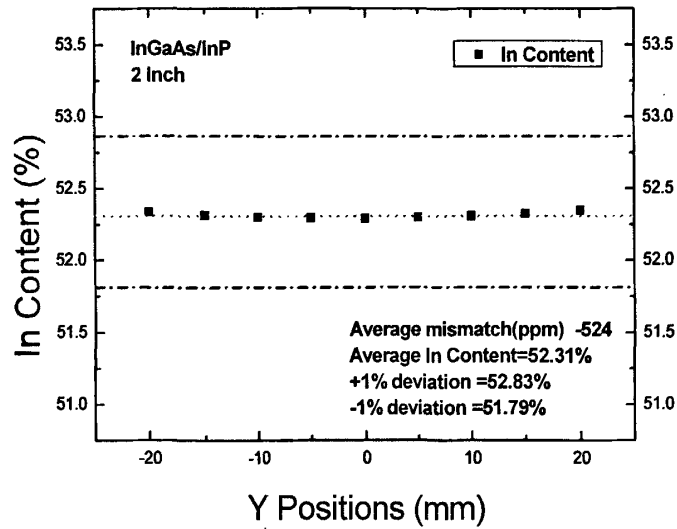


图 4.29  $\Phi 2$  英寸 InGaAs 外延层 Y 轴的 In 组份均匀性

#### 4.2.2 $\Phi 4$ 英寸 InGaP 外延层的组份均匀性

与 InGaAs 类似，我们也研究了在  $\Phi 4$  英寸 GaAs 衬底上生长的 InGaP 外延层的大面积组份均匀性，所用的生长速率约为  $1 \mu\text{m}/\text{小时}$ 。生长时，首先在  $700^\circ\text{C}$  条件下

生长 200nm 的 GaAs 缓冲层, 然后将衬底温度降至 600℃ 左右进行  $\text{AsH}_3/\text{PH}_3$  切换, 之后生长 InGaP 材料。InGaP 外延层的组份均匀性也用 XRD 进行表征, 在  $\Phi 4$  英寸的 InGaP 外延材料上选取 x 轴和 y 轴两个坐标轴。在 x 轴和 y 轴上再分别距离平均地选取 9 个测试点, 距离中心点分别是正负方向 10mm、20mm、30mm 和 40mm (如图 4.30 所示)。在每个点上分别测量 In 的组份含量, 所得数据如表 4.3 和 4.4 所示。

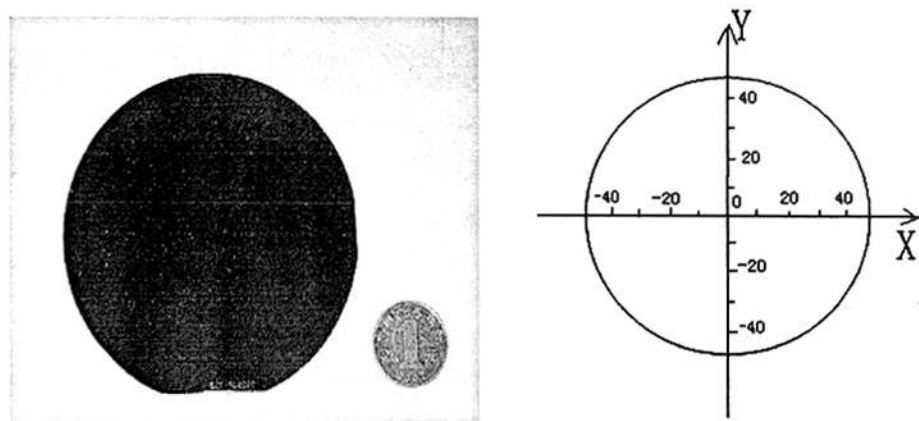


图 4.30  $\Phi 4$  英寸 InGaP 外延层组份测试坐标点

表 4.3  $\Phi 4$  英寸 InGaP 外延层 X 轴的组份测试数据

| X 轴坐标<br>(mm) | -40    | -30    | -20    | -10    | 0      | 10     | 20     | 30     | 40     | 平均    |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| In 含量 (%)     | 47.431 | 47.348 | 47.289 | 47.257 | 47.251 | 47.276 | 47.325 | 47.402 | 47.502 | 47.35 |

表 4.4  $\Phi 4$  英寸 InGaP 外延层 Y 轴的组份测试数据

| Y 轴坐标<br>(mm) | -40    | -30    | -20    | -10    | 0      | 10     | 20     | 30     | 40     | 平均    |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| In 含量 (%)     | 47.457 | 47.364 | 47.305 | 47.266 | 47.251 | 47.268 | 47.311 | 47.378 | 47.476 | 47.34 |

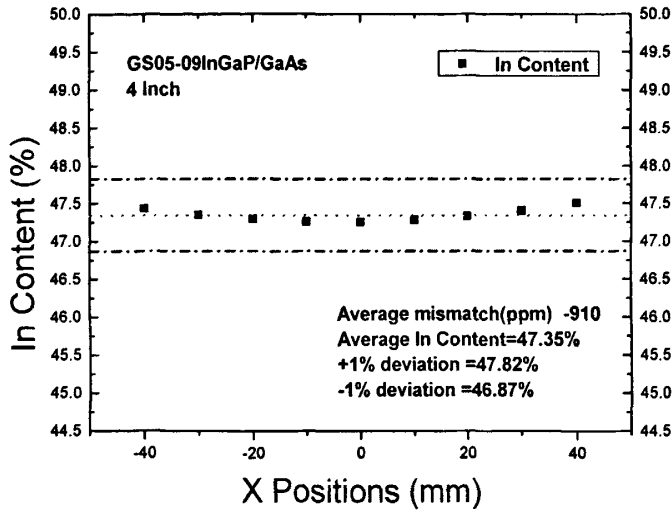


图 4.31  $\Phi 4$  英寸 InGaP 外延层 X 轴的 In 组份均匀性

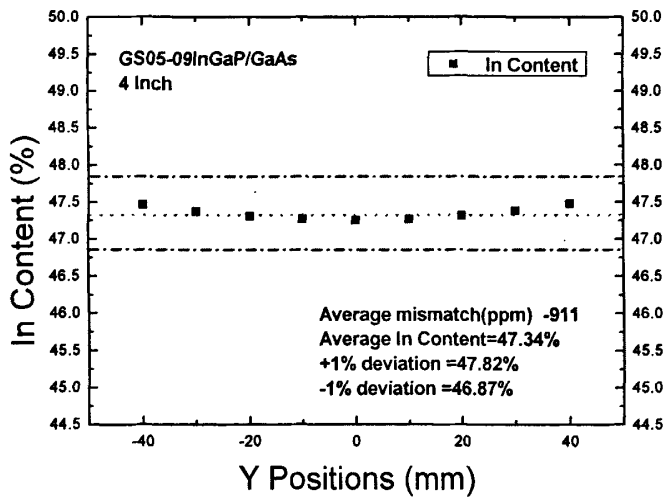


图 4.32  $\Phi 4$  英寸 InGaP 外延层 Y 轴的 In 组份均匀性

图 4.31 和 4.32 分别给出了实验所得  $\Phi 4$  英寸 InGaP 外延层 X 轴和 Y 轴上各测试点的 In 组份均匀性，图中也用虚线标出了组份偏差为  $\pm 1\%$  的范围。由图可见，所生长的 InGaP 外延材料 In 组份的分布偏差在整个  $\Phi 4$  英寸的范围内均小于 1%，说明也具有比较好的大面积组份均匀性。

### 4.3 InGaP/GaAs/InGaP 和 InP/InGaAs/InP DHBT 材料的 GSMBE 生长

在对 GaAs 基和 InP 基 DHBT 用各单层材料生长条件优化的基础上, 结合前面对 DHBT 材料结构设计的理论模拟和分析, 我们采用 GSMBE 技术, 设计和生长了新型结构 GaAs 基 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 材料和 InP 基 InP/InGaAs/InP DHBT 材料, 并对器件结构材料的性能进行了测试分析。

#### 4.3.1 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 材料的生长

本文设计的集电结带有 n-InGaP 插入层的 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 材料结构如表 4.5 所示。作为对比, 本文也设计和生长了如表 4.6 所示的常规 DHBT 结构。在这两种结构中, 除了有无集电结的插入层之外, 其他参数均一样。并且为了避免高浓度掺杂 p-GaAs 基区中的 p 型掺杂剂 Be 向基区两侧的扩散, 在基区两边均采用了不掺杂的 GaAs 隔离层 (spacer) 作为阻挡层, 以防止 p-n 结与异质结的偏移<sup>[107-109]</sup>。同时, 采用了 n 型高含 In 重掺杂的 InGaAs 作为盖顶层以减小发射极欧姆接触电阻。

表 4.5 集电结带有 n-InGaP 插入层的 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 材料结构

| Layer                   | Material                | Thickness (nm) | Doping ( $\text{cm}^{-3}$ ) |
|-------------------------|-------------------------|----------------|-----------------------------|
| Cap                     | Si: InGaAs ( $x=0.5$ )  | 50             | $1\text{E}19$               |
| Sub-cap                 | Si: InGaAs ( $x=0.5$ )  | 50             | $5\text{E}18$               |
|                         | ↑<br>Si: GaAs ( $x=0$ ) |                |                             |
| Sub-cap                 | Si: GaAs                | 100            | $5\text{E}18$               |
| Emitter                 | Si: InGaP               | 80             | $3\text{E}17$               |
| Spacer                  | i-GaAs                  | 5              | Undoped                     |
| Base                    | Be: GaAs                | 60             | $3\text{E}19$               |
| Spacer                  | i-GaAs                  | 5              | Undoped                     |
|                         | Si: InGaP               | 5              | $3\text{E}19$               |
| Collector               | Si: InGaP               | 500            | $3\text{E}16$               |
| Sub-collector           | Si: GaAs                | 500            | $5\text{E}18$               |
| (100) SI-GaAs substrate |                         |                |                             |

表 4.6 常规的 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 材料结构

| Layer                   | Material            | Thickness (nm) | Doping (cm <sup>-3</sup> ) |
|-------------------------|---------------------|----------------|----------------------------|
| Cap                     | Si: InGaAs (x=0.5)  | 50             | 1E19                       |
| Sub-cap                 | Si: InGaAs (x=0.5)  | 50             | 5E18                       |
|                         | ↑<br>Si: GaAs (x=0) |                |                            |
| Sub-cap                 | Si: GaAs            | 100            | 5E18                       |
| Emitter                 | Si: InGaP           | 80             | 3E17                       |
| Spacer                  | i-GaAs              | 5              | Undoped                    |
| Base                    | Be: GaAs            | 60             | 3E19                       |
| Spacer                  | i-GaAs              | 5              | Undoped                    |
| Collector               | Si: InGaP           | 500            | 3E16                       |
| Sub-collector           | Si: GaAs            | 500            | 5E18                       |
| (100) SI-GaAs substrate |                     |                |                            |

对于 InGaP/GaAs 和 InP/InGaAs 异质结构材料，由于是分别含有两种不同 V 族元素化合物的依次连续生长，在 GSMBE 生长过程中就涉及到多次 AsH<sub>3</sub> 和 PH<sub>3</sub> 气氛的切换。但由于 V 族元素具有较高的蒸气压，在生长室中很难被快速抽出，从而易出现所谓的记忆效应，导致异质结构材料的界面质量下降，而 HBT 器件性能对界面质量十分敏感，因此建立合适的 V 族气氛切换工艺非常重要，关系到异质界面质量的好坏和器件的性能。

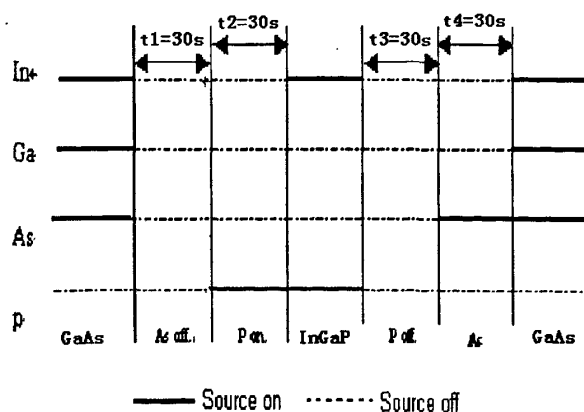


图 4.33 本文采用的 AsH<sub>3</sub>/PH<sub>3</sub> 束流切换工艺示意图

通常采用的切换方法是在 InGaP (或 GaAs) 层生长完之后, 先打开 As<sub>2</sub> (或 P<sub>2</sub>) 分子束源, 再关闭 P<sub>2</sub> (或 As<sub>2</sub>) 分子束源, 或者这种开闭操作同时进行, 然后再生长 GaAs (或 InGaP) 层。这种切换方法可以保证维持 V 族分子束对处于生长温度下的样品表面的保护作用, 但却难以使残留的前一种 V 族元素分子从生长室中被尽快抽出, 导致前一种 V 族元素的记忆效应, 在异质界面将形成一部分组份混溶的材料, 影响外延材料的界面质量和后续器件制作中腐蚀工艺的进行。我们经过大量的实验摸索, 对异质界面处 V 族气氛的切换采用了先关闭前一种 V 族分子束, 让生长室抽取一段时间以加快该种滞留 V 族元素分子的排空, 在适当的时间再打开另一种 V 族分子束源, 从而完成 V 族气氛的切换。在切换过程中, 外延生长将停顿一个最佳周期后, 再接下去生长下一层材料, 以避免各层界面的组份混溶而影响材料性能和后续器件工艺。本文所使用的 AsH<sub>3</sub>/PH<sub>3</sub> 切换工艺如图 4.33 所示。

图 4.34 为 InGaP/GaAsInGaP DHBT 材料剖面的 SEM 照片。可以看出, 整个结构各层之间的界面清晰平整, 各层厚度与设计要求完全一致。图 4.35 是 DHBT 结构材料表面的 SEM 照片。可以看出, 虽然经过多层材料的生长, 但整个结构材料仍具有较好的表面形貌, 看不到任何斑点和缺陷, 说明具有较好的外延质量。

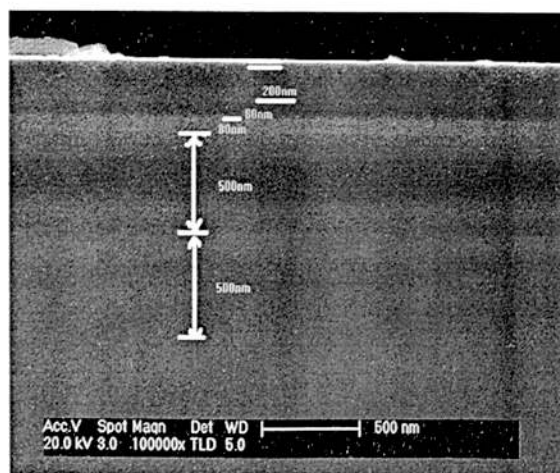


图 4.34 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 材料剖面的 SEM 照片

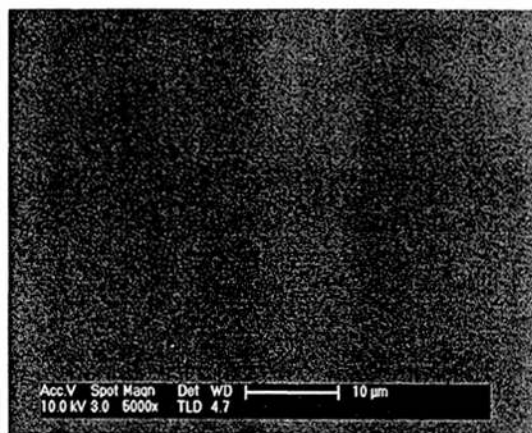


图 4.35 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 材料表面的 SEM 照片

图 4.36 给出了所生长的 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 外延材料的电化学 C-V 深度分析测试结果。从图中可以看出,不同 n 型掺杂浓度的材料层有较好的阶梯变化,同时基区两侧的 p-n 结界面陡峭,说明所确定的生长工艺和条件很好地抑制了基区重掺杂 Be 的扩散,没有发生 p-n 结的偏移,各层的厚度和掺杂浓度也与设计要求基本相符,说明所建立的生长工艺对外延材料性能具有良好的控制性。

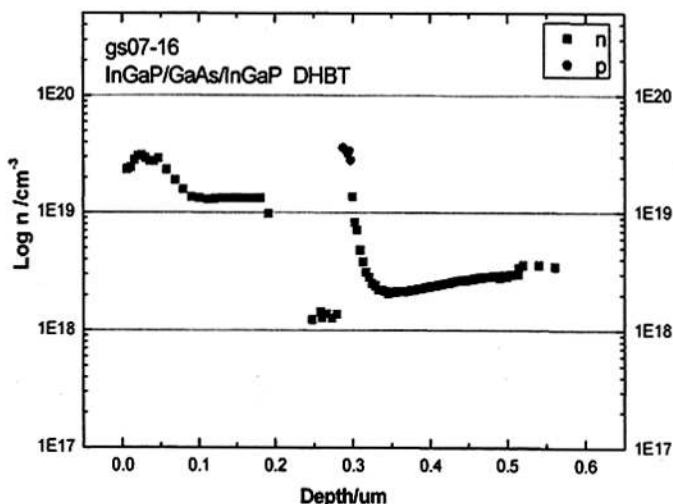


图 4.36 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 外延材料的电化学 C-V 测试结果

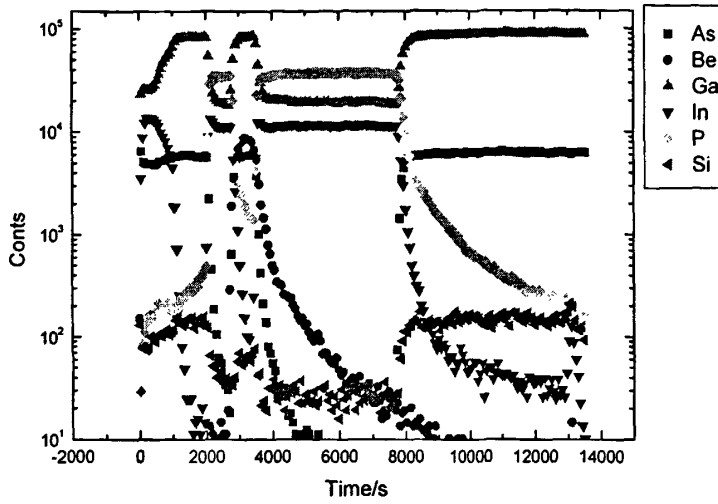


图 4.37 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 外延材料的 SIMS 测量结果

图 4.37 是 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 外延材料的二次离子质谱 (SIMS) 深度剖析测量结果。从图中可以看出, 各层结构及界面清晰陡峭。从 Si 和 Be 元素的分布也可以看出, 杂质分布与设计的结构非常吻合。在集电区与基区之间、基区与发射区之间的界面突变性非常好, 没有发生 p-n 结的偏移。这些结果, 也验证了所生长的 DHBT 材料结构完全符合设计的要求。

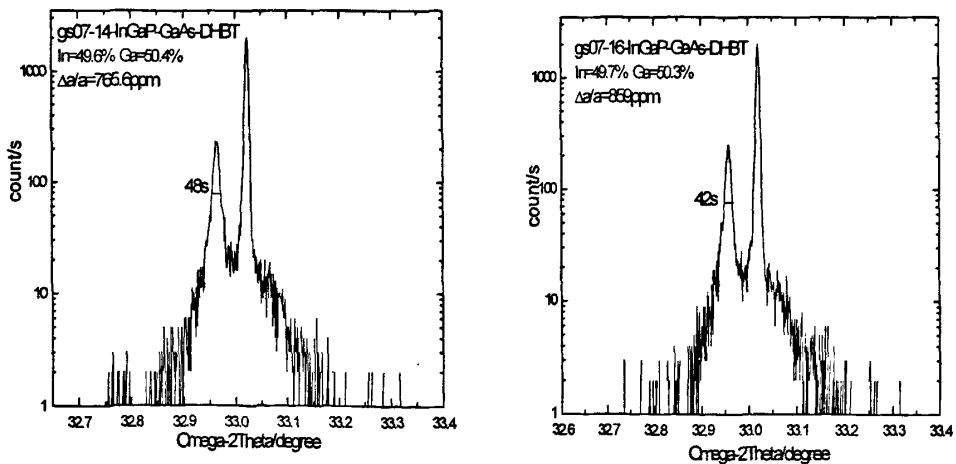


图 4.38 两种 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 外延材料的 XRD 摇摆曲线

所生长的两种 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 外延材料的 XRD 摇摆曲线如图 4.38 所示。由此可以得到这两种结构外延材料的晶格失配度分别为  $7.65 \times 10^{-4}$  和  $8.59 \times 10^{-4}$ ，外延层衍射峰的半高峰宽 (FWHM) 分别为 48 弧秒和 42 弧秒，说明这两种 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 结构材料都具有良好的晶体质量。

### 4.3.2 InP/InGaAs/InP DHBT 材料的生长

本文设计的带有能带阶梯缓变集电区的 InP/InGaAs/InP DHBT 外延材料结构如表 4.7 所示。

表 4.7 带有能带阶梯缓变集电区的 InP/InGaAs/InP DHBT 材料结构

| 材料名称                                                                                         | 厚度 (nm) | 掺杂元素 | 掺杂浓度 ( $\text{cm}^{-3}$ ) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------|---------------------------|
| InGaAs                                                                                       | 40      | Si   | $3\text{E}19$             |
| InP                                                                                          | 90      | Si   | $3\text{E}19$             |
| InP                                                                                          | 10      | Si   | $1\text{E}18$             |
| InP                                                                                          | 60      | Si   | $3\text{E}17$             |
| InGaAs                                                                                       | 5       | UID  | UID                       |
| InGaAs                                                                                       | 40      | Be   | $3\text{E}19$             |
| InGaAs                                                                                       | 20      | Si   | $2\text{E}16$             |
| $\text{In}_{0.73}\text{Ga}_{0.27}\text{As}_{0.58}\text{P}_{0.42}$<br>( $E_g=0.95\text{eV}$ ) | 10      | Si   | $2\text{E}16$             |
| $\text{In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.27}\text{P}_{0.77}$<br>( $E_g=1.15\text{eV}$ ) | 10      | Si   | $2\text{E}16$             |
| InP                                                                                          | 3       | Si   | $3\text{E}18$             |
| InP                                                                                          | 160     | Si   | $2\text{E}16$             |
| InP                                                                                          | 50      | Si   | $1.5\text{E}19$           |
| InGaAs                                                                                       | 25      | Si   | $3\text{E}19$             |
| InP                                                                                          | 300     | Si   | $3\text{E}19$             |
| (001) SI-InP 衬底                                                                              |         |      |                           |

所生长的 InP/InGaAs/InP DHBT 结构材料的 XRD 摇摆曲线如图 4.39 所示，外延层的晶格失配度为  $2.28 \times 10^{-4}$ ，半高峰宽 (FWHM) 为 34 弧秒，说明具有较好的晶

体质量。图 4.40 为 InP/InGaAs/InP DHBT 结构材料的电化学 C-V 测试结果。可以看出 p-n 结界面陡峭，说明所确定的生长工艺和条件很好地抑制了重掺杂 Be 的扩散。各层的厚度和掺杂浓度也与设计结构有很好的吻合。图 4.41 是 InP/InGaAs/InP DHBT 结构材料的 SIMS 测量结果。从图中可以看出，各层结构及界面清晰陡峭，掺杂特性也非常好，没有产生 p-n 偏移的现象，说明 Spacer 层的阻挡作用非常明显，与所设计的 DHBT 材料结构完全符合，达到了器件质量的要求。

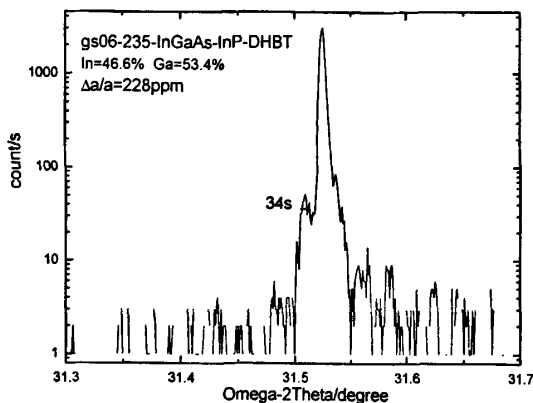


图 4.39 InP/InGaAs/InP DHBT 外延材料的 XRD 摇摆曲线

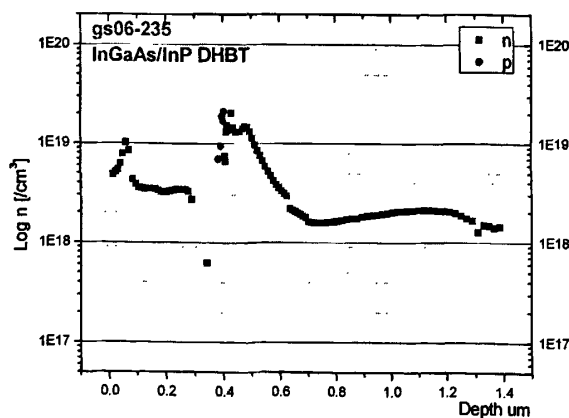


图 4.40 InP/InGaAs/InP DHBT 外延材料的电化学 C-V 测试结果

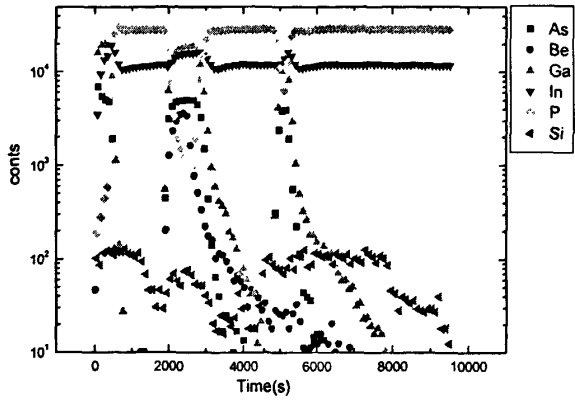


图 4.41 InP/InGaAs/InP DHBT 结构材料的 SIMS 测试结果

4.4 小结

采用 GSMBE 技术，对 GaAs、InP、InGaAs、InGaP，InGaAsP 等 DHBT 用各单层材料的外延生长进行了研究，利用 Hall 测试、电化学 C-V、XRD、AFM、SEM、PL 以及 SIMS 等方法对材料性能和质量进行了测试分析，并对  $\phi 4$  英寸 InGaP/GaAs 和  $\phi 2$  英寸 InGaAs/InP 异质结构材料的大面积均匀性进行了研究，优化了外延生长工艺和条件。在此基础上，分别设计和生长出新型结构 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 材料和 InP/InGaAs/InP DHBT 材料。结果表明，所生长的 DHBT 结构材料具有良好的电学特性和晶体质量，可以满足器件制作的要求。

## 第五章 GaAs 基和 InP 基 DHBT 器件制备与特性分析

本章利用所生长的 InGaP/GaAsInGaP DHBT 和 InP/InGaAs/InP DHBT 结构材料, 采用自对准工艺, 应用常规的腐蚀溶液进行湿法腐蚀, 进行了器件流片制作, 研制出台面结构 DHBT 器件, 并对其直流特性进行了测试分析, 验证了材料结构的设计和 外延材料的质量。

### 5.1 DHBT 器件工艺流程

本文工作所制备的 GaAs 基和 InP 基 DHBT 器件平面图和剖面图如图 5.1 所示, 整个器件工艺流程如表 5.1 所示。

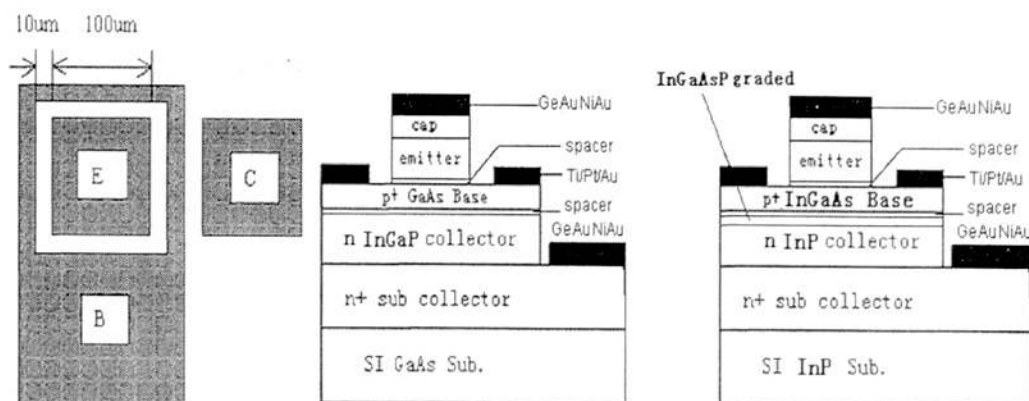


图 5.1 台面结构 DHBT 器件的平面图和剖面图

表 5.1 DHBT 器件工艺流程

| 序号      | 工艺步骤 | 工艺过程                                                             |
|---------|------|------------------------------------------------------------------|
| 蒸发发射极电极 |      |                                                                  |
| 1       | 清洗   | CCl <sub>4</sub> 、丙酮、乙醇各超声三次, 每次 5 分钟, 去离子水冲洗, N <sub>2</sub> 吹干 |
| 2       | 去氧化层 | 在 HCl : H <sub>2</sub> O = 1 : 10 溶液中漂洗, 时间: 20 秒                |
| 3       | 匀胶   | AZ6809, 4500rpm, 30 秒                                            |

|         |                                          |                                                                        |
|---------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 4       | 前烘                                       | 在烘烤板上, 100℃, 时间: 3 分                                                   |
| 5       | 曝光                                       | 时间: 12 秒                                                               |
| 6       | 浸泡氯苯                                     | 时间: 5 分                                                                |
| 7       | 显影                                       | MF 320, 时间: 7 秒                                                        |
| 8       | 表面处理                                     | 去氧化膜 $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=1:10$ , 时间: 20 秒                   |
| 9       | 电子束蒸发                                    | $\text{Ge}/\text{Au}/\text{Ni}/\text{Au}=150/330/100/1500 \text{ \AA}$ |
| 10      | 剥离                                       | 用丙酮浸泡, 剥离干净后乙醇→去离子水清洗, $\text{N}_2$ 吹干                                 |
| 发射极台面腐蚀 |                                          |                                                                        |
| 11      | 腐 蚀 盖 帽 层<br>$\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ | 柠檬酸溶液: $\text{H}_2\text{O}_2=5:1$ , 时间: 90 秒, 室温 25℃                   |
| 12      | 腐 蚀 发 射 区<br>$\text{InGaP}(\text{InP})$  | $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{HCl}=3:1$ , 时间: 1 分钟, 室温 25℃              |
| 溅射基极电极  |                                          |                                                                        |
| 13      | 匀胶                                       | AZ6809, 4500rpm, 30 秒                                                  |
| 14      | 前烘                                       | 烘箱: 100℃, 时间: 30 分                                                     |
| 15      | 曝光                                       | 时间: 12 秒                                                               |
| 16      | 浸泡氯苯                                     | 时间: 5 分                                                                |
| 17      | 显影                                       | MF 320, 时间: 7 秒                                                        |
| 18      | 表面处理                                     | $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=1:10$ , 时间: 20 秒                        |
| 19      | 磁控溅射                                     | $\text{Ti}/\text{Pt}/\text{Au}=100/200/1500 \text{ \AA}$               |
| 20      | 剥离                                       | 用丙酮浸泡, 剥离干净后乙醇→去离子水清洗, $\text{N}_2$ 吹干                                 |
| 基极台面腐蚀  |                                          |                                                                        |
| 21      | 匀胶                                       | AZ6809, 4500rpm, 30 秒                                                  |
| 22      | 前烘                                       | 烘箱: 100℃, 时间: 30 分                                                     |
| 23      | 曝光 (基极)                                  | 时间: 12 秒                                                               |
| 24      | 显影                                       | MF 320, 时间: 8 秒                                                        |
| 25      | 坚膜                                       | 烘箱: 120℃, 时间: 30 分钟                                                    |

|         |                              |                                                                                                 |
|---------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 26      | 腐蚀到集电区<br>(InGaAsP 阶梯缓变层的腐蚀) | 柠檬酸溶液: $H_2O_2=5:1$ , 时间: 2 分钟, 室温 $25^{\circ}C$<br>( $H_2SO_4:H_2O_2:H_2O=3:1:1$ 腐蚀, 时间: 1 分钟) |
| 27      | 腐蚀集电区                        | $H_3PO_4:HCl=3:1$ 腐蚀 InGaP 2 分 30 秒 (InP 集电区 10 秒)                                              |
| 28      | 去胶                           | 丙酮充分浸泡, 乙醇→去离子水浸洗, $N_2$ 吹干                                                                     |
| 蒸发集电极电极 |                              |                                                                                                 |
| 29      | 匀胶                           | AZ6809, 4500rpm, 30 秒                                                                           |
| 30      | 前烘                           | 烘箱: $80^{\circ}C$ , 时间: 30 分                                                                    |
| 31      | 曝光                           | 时间: 12 秒                                                                                        |
| 32      | 浸泡氯苯                         | 时间: 5 分                                                                                         |
| 33      | 显影                           | MF 320, 时间: 8 秒                                                                                 |
| 34      | 表面处理                         | $HCl:H_2O=1:10$ , 时间: 20 秒                                                                      |
| 35      | 电子束蒸发                        | $Ge/Au/Ni/Au=150/330/100/1500\text{ \AA}$                                                       |
| 36      | 剥离                           | 用丙酮浸泡, 剥离干净后乙醇→去离子水清洗, $N_2$ 吹干                                                                 |
| 37      | 合金                           | RTA: $380^{\circ}C$ , 60 秒                                                                      |

5.2 DHBT 器件工艺流片

在早期 InGaP/GaAs HBT 的流片工艺过程中, 由于  $H_3PO_4$  系腐蚀液对 InGaP/GaAs 的选择性腐蚀比较好, 所以一般采用  $H_3PO_4$  系腐蚀液来腐蚀 InGaP。但是  $H_3PO_4$  系腐蚀液的侧向腐蚀比较严重, 当器件尺寸减小时, 容易造成器件失效<sup>[110, 111]</sup>。在最近的研究中, 为了克服小器件腐蚀中的侧向腐蚀问题, 人们普遍采用柠檬酸系腐蚀液。柠檬酸系腐蚀液不仅侧向腐蚀较小, 而且选择性更高, 比  $H_3PO_4$  系腐蚀液有着明显的优越性<sup>[112]</sup>。柠檬酸:  $H_2O_2=10:1$  腐蚀液对 GaAs/InGaP 的选择比是 70:1, 而  $H_3PO_4:H_2O_2:H_2O=10:1:70$  腐蚀液对 GaAs/InGaP 的选择比则只有 35:1<sup>[113-115]</sup>。因此, 柠檬酸系腐蚀液目前得到了更多的应用<sup>[116,117]</sup>。在本工作中, 我们采用了柠檬酸溶液:  $H_2O_2=5:1$  的腐蚀液来腐蚀 GaAs 和 InGaAs 材料, 使用  $HCl:H_3PO_4=3:1$  的混合溶液来腐蚀 InGaP 材料。

在 InP/InGaAs/InP DHBT 器件的流片过程中, 我们在腐蚀方面遇到的主要问题是

InGaAsP 四元系材料的腐蚀液选择。目前所采用的腐蚀液主要有  $\text{HCl}/\text{H}_3\text{PO}_4$ <sup>[118]</sup>、柠檬酸/ $\text{H}_2\text{O}_2$ <sup>[119]</sup>、 $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ <sup>[120]</sup>、 $\text{FeCl}_3$ 、 $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ <sup>[121]</sup>、 $\text{OBr}^-$ <sup>[122]</sup> 和  $\text{HBr}:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ <sup>[123,124]</sup> 等溶液。在本工作中, 由于在 InP 基 DHBT 材料中的两层 InGaAsP 能带阶梯缓变层都比较薄, 并只有在腐蚀基区台面时才需要腐蚀, 而且制作的 DHBT 器件尺寸较大, 侧向腐蚀对器件的影响可以忽略, 所以选用了比较常规的  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$  腐蚀液。这种腐蚀液也比较容易配制保存, 试验中我们选取了  $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=3:1:1$  的腐蚀液配方来腐蚀两种不同组份的 InGaAsP 材料。因为本文采用的基本上是常规的 HBT 器件工艺, 所以下面主要对器件流片过程中遇见的一些实际问题和应注意的关键工艺做简要的分析。

### 5.2.1 发射极电极剥离

在蒸发发射极电极后的剥离过程中, 采用丙酮浸泡并用注射器冲洗的方法, 使光刻胶 AZ6809 上的金属剥离掉。使用注射器的方法对于操作要求比较高, 操作不当便会使一部分金属图形发生变形。例如图 5.2 所示, 在剥离金属过程中有部分金属没有剥离干净; 又如图 5.3 所示, 剥离金属过于严重, 使图形表面的金属有些翘起。

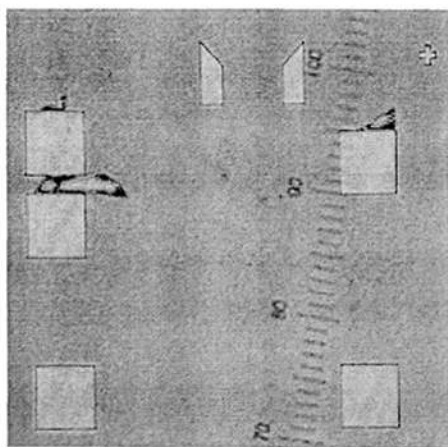


图 5.2 金属没有剥离干净的显微镜照片

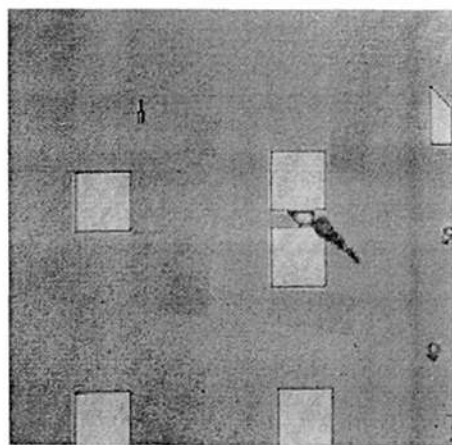


图 5.3 剥离金属翘起的显微镜照片

### 5.2.2 发射极台面腐蚀

对于 GaAs 基 DHBT, 发射极台面腐蚀采用柠檬酸溶液:  $\text{H}_2\text{O}_2=5:1$  腐蚀液腐蚀 GaAs 和 InGaAs 盖顶层。在  $25^\circ\text{C}$  的条件下, GaAs 的腐蚀速率为  $6\text{nm/s}$ , InGaAs 的腐蚀速率为  $17\text{nm/s}$ 。发射区 InGaP 材料采用  $\text{HCl}:\text{H}_3\text{PO}_4=3:1$  腐蚀液腐蚀。在  $25^\circ\text{C}$  的条件下, InGaP 的腐蚀速率为  $4\text{nm/s}$ 。对于 InP 基 DHBT, 发射区 InP 材料采用  $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{HCl}=3:1$  腐蚀液腐蚀。在  $25^\circ\text{C}$  的条件下, InP 的腐蚀速率为  $18\text{nm/s}$ 。图 5.4 为发射极台面腐蚀后材料表面的显微照片。可以看出, 整体上腐蚀的比较干净均匀, 在个别地方有些脏点和腐蚀岛, 可能是由于材料在最初的清洗过程中没有将污物清洗彻底造成的。

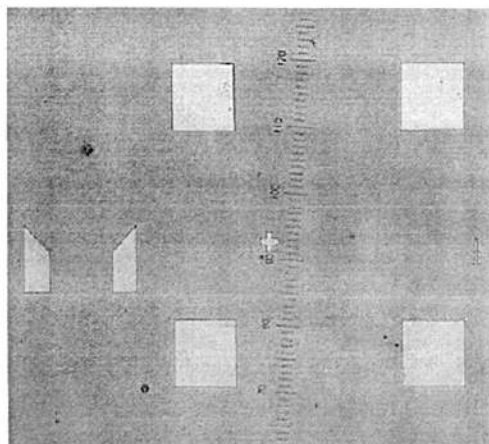


图 5.4 发射极台面腐蚀后材料表面的显微照片

在 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 器件制备过程中, 我们发现, 用柠檬酸系腐蚀液去掉 InGaAs-GaAs 盖帽层之后, 在使用  $\text{HCl}$  和  $\text{H}_3\text{PO}_4$  混合溶液腐蚀发射区 InGaP 层时, 腐蚀过后的表面不平整, 图形周围会有云状突出区域出现 (如图 5.5 所示), 而采用  $\text{H}_3\text{PO}_4$  系腐蚀液则不会出现这种现象<sup>[125,126]</sup>。这些腐蚀后形成的“岛”的存在将增加基区的串联电阻, 甚至造成 E-B 结的短路, 致使器件损坏<sup>[127]</sup>。由于我们选择的腐蚀液对 InGaP/GaAs 材料有良好的选择性, 并且制作的器件尺寸较大, 测向腐蚀对器件影响不大, 所以采取过腐蚀的方法来尽量减少腐蚀不彻底和表面质量不好的现象。

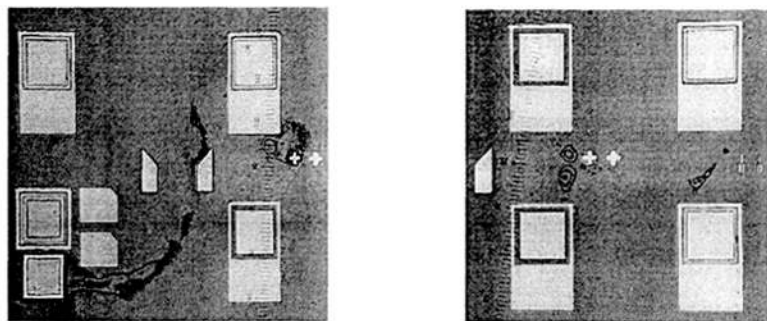


图 5.5 腐蚀表面存在腐蚀岛的显微照片

### 5.2.3 基极电极剥离

在基极电极剥离过程中，也采用了丙酮浸泡 30 分钟后用注射器冲洗使光刻胶 AZ6809 上的金属剥离掉的方法。但如果操作不当，也会出现剥离效果不好的情况。例如图 5.6 所示，少部分图形表面的金属边缘有些翘起，不够平整。又如图 5.7 所示，在剥离基极金属的过程中，有少部分图形的发射极金属与基极金属间没有剥离干净，使发射极和基极之间成为短路状态。

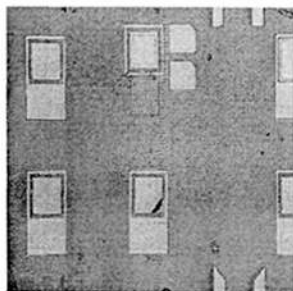


图 5.6 金属图形被剥离掉的显微镜照片

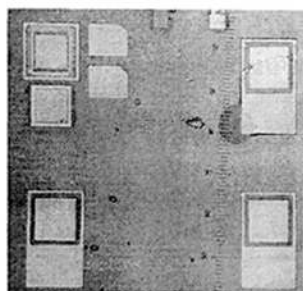


图 5.7 剥离金属不干净的显微镜照片

### 5.2.4 基区台面腐蚀

对于 GaAs 基 DHBT 材料，采用柠檬酸溶液： $H_2O_2=5:1$  腐蚀液进行基极台面腐蚀。在  $25^\circ\text{C}$  的条件下，GaAs 的腐蚀速率大约是  $6\text{nm/s}$ 。由于 GaAs 和 InGaP 对此种腐蚀液具有很好的选择性，因此不会腐蚀集电区的 InGaP 材料，可以实现基区台面的

自停止腐蚀。我们采用的腐蚀时间为 30s, 以保证基区 GaAs 的腐蚀干净到位。图 5.8 为用台阶仪测量的基极台面腐蚀后的结构示意图。可以看出, 基区 GaAs 层已经完全被腐蚀掉了, 并且用台阶仪测得的厚度与实际材料的设计厚度也符合的比较好。

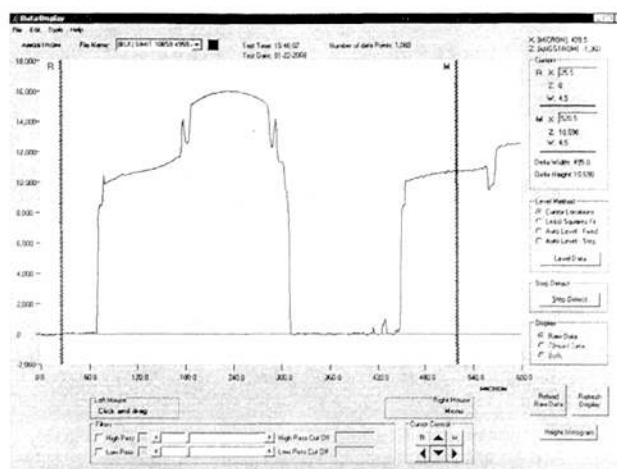


图 5.8 GaAs 基 DHBT 基区台面腐蚀后台阶仪的测试结果

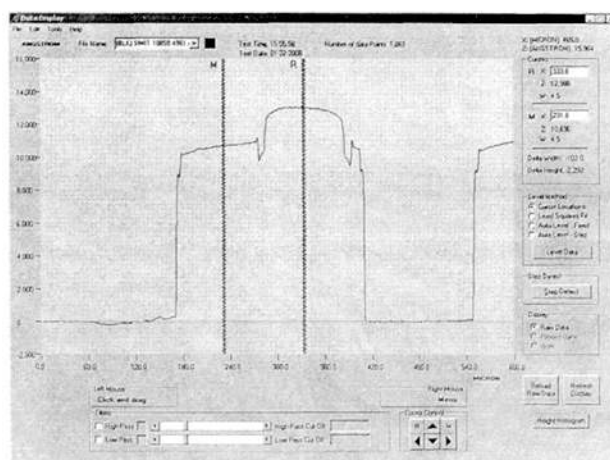


图 5.9 InP 基 DHBT 基区台面腐蚀后台阶仪的测试结果

对于 InP 基 DHBT 材料, 也采用柠檬酸溶液:  $\text{H}_2\text{O}_2=5:1$  腐蚀液腐蚀基区 InGaAs 材料。在  $25^\circ\text{C}$  的条件下, InGaAs 的腐蚀速率大约是  $17\text{nm/s}$ 。也腐蚀 30s 以保证基区

InGaAs 的腐蚀干净到位。对于 InGaAsP 能带阶梯缓变层的腐蚀, 经过试验条件优化, 选取了  $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=3:1:1$  的腐蚀液配方来腐蚀两种不同组份的 InGaAsP 材料。其中, 对于  $\text{In}_{0.73}\text{Ga}_{0.27}\text{As}_{0.58}\text{P}_{0.42}$ , 在  $25^\circ\text{C}$  的条件下腐蚀速率为  $1.25\text{nm/s}$ ; 对于  $\text{In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.27}\text{P}_{0.77}$ , 在  $25^\circ\text{C}$  的条件下腐蚀速率为  $8.5\text{nm/s}$ 。由于在所设计的 DHBT 结构中这两层 InGaAsP 都很薄, 腐蚀速率慢一点对腐蚀的控制是有好处的。同时, 所选择的腐蚀液对 InGaAsP/InP 材料体系也有良好的选择性, 并且由于制作的器件尺寸较大, 侧向腐蚀对器件的影响可以忽略不计, 因此实验中采取过腐蚀的方法, 以减少腐蚀不彻底、表面形貌不好的现象。图 5.9 是用台阶仪测量的基区台面腐蚀后的结构示意图。可以看出, 在基区台面腐蚀后, 发射区台面的金属表面有些毛刺, 平整性不够好。同时发现在腐蚀成功的台面边上会形成一条沟, 这一现象文献中也有所报道<sup>[128]</sup>。另外, 由于我们所用的腐蚀液的腐蚀速率比较快, 使得基区台面有些近似半圆弧形, 也与文献中所提到的现象相同<sup>[129-131]</sup>。

### 5.2.5 蒸发集电极电极

本文采用蒸发的  $\text{Ge}/\text{Au}/\text{Ni}/\text{Au}=150/330/100/1500\text{\AA}$  作为集电极电极。图 5.10 为已光刻制作完成的、发射极面积为  $100\times 100\mu\text{m}^2$  的 DHBT 在不同放大倍数下的显微照片。可以看到, 图形制作比较完整, 电极质量符合要求。

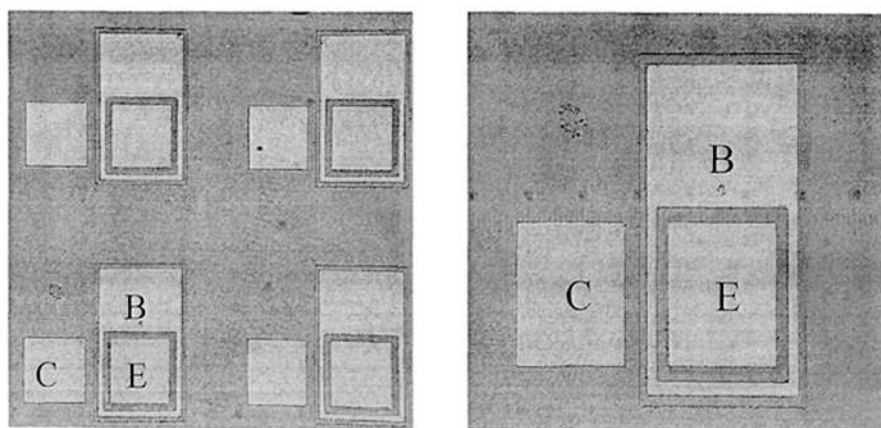


图 5.10 发射极面积为  $100\times 100\mu\text{m}^2$  的 DHBT 图形

### 5.3 DHBT 器件直流特性测试与分析

器件工艺流片完成后,我们用半导体参数测试仪对所研制的 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 器件和 InP/InGaAs/InP DHBT 器件的结特性和共发射极直流 I-V 特性进行了测试分析。

#### 5.3.1 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 器件特性与分析

图 5.11 给出了常规结构(即集电结未做过任何设计的) InGaP/GaAs/InGaP DHBT 器件 B-E 结和 B-C 结的直流 I-V 特性,其开启电压分别为 1.2V 和 1.3V。可以看出,该 DHBT 器件的结特性还是比较好的。图 5.12 是该器件的共发射极直流输出特性。可以看到,由于集电结存在明显的电流阻挡效应,所以其输出特性很不好。

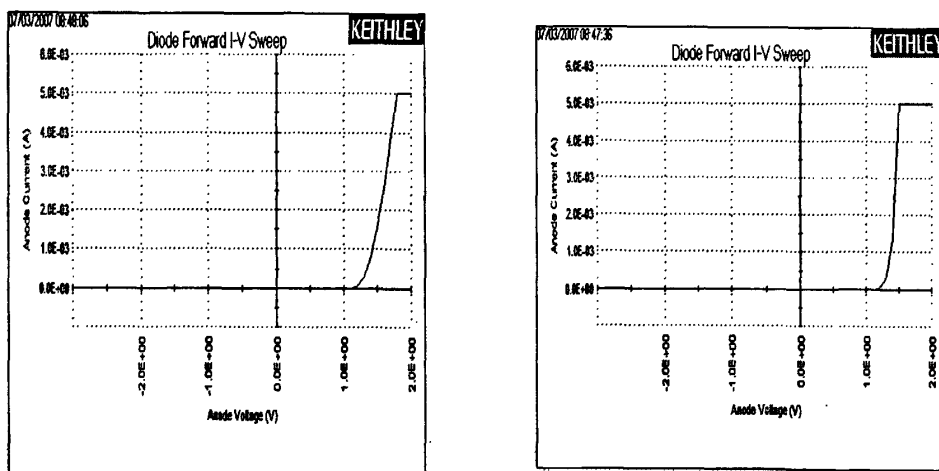


图 5.11 常规结构 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 器件 B-E 结和 B-C 结的 I-V 特性

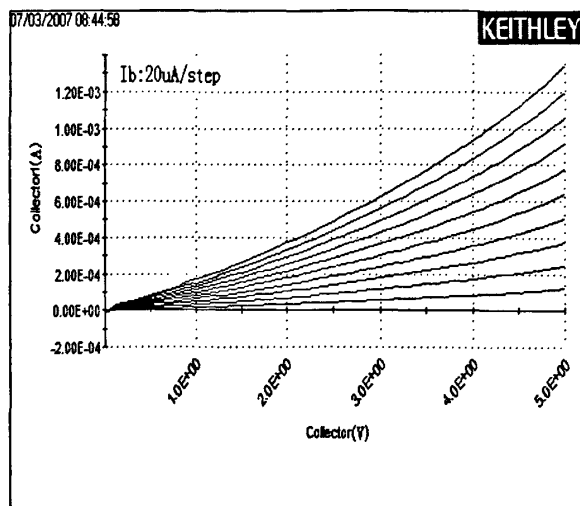


图 5.12 常规结构 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 器件的共发射极直流输出特性

图 5.13 为集电结带有 n 型 InGaP 插入层的 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 器件 B-C 结和 B-E 结的 I-V 特性曲线, 其开启电压均为 1V, 反映出所制备的 DHBT 器件具有良好的结特性。图 5.14 为所研制的 DHBT 器件共发射极直流输出特性, 开启电压约为 0.15V, 电流增益  $\beta$  为 170, 说明所设计和生长的 GaAs 基 DHBT 结构材料具有较好的晶体质量和电学性能。与图 5.12 所示的常规结构 DHBT 器件直流输出特性相比, 有了显著的改善, 也与前面理论模拟分析的结果也是相当符合的。

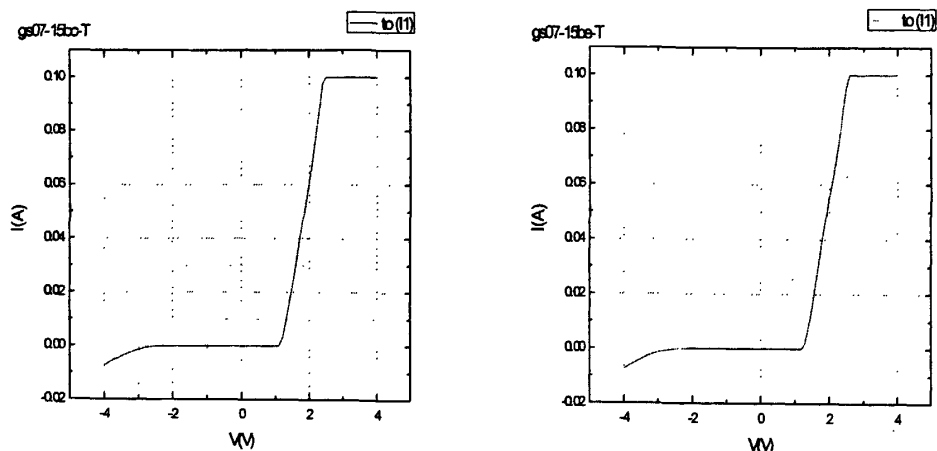


图 5.13 集电结带有 n-InGaP 插入层的 GaAs 基 DHBT 器件 B-C 结和 B-E 结 I-V 特性

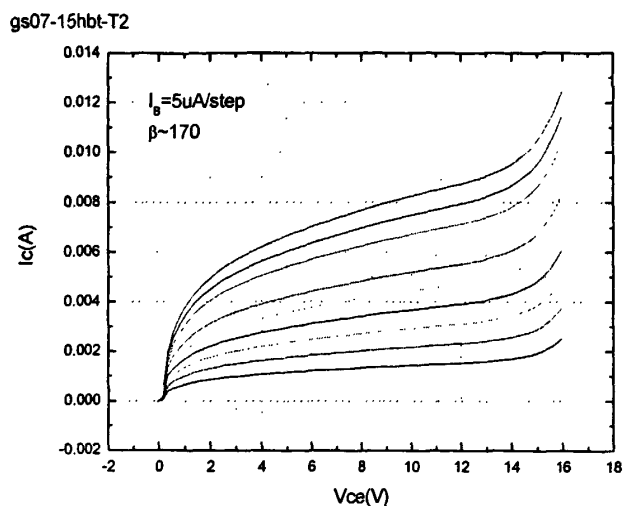


图 5.14 集电结带有 n-InGaP 插入层的 GaAs 基 DHBT 器件共发射极直流输出特性

图 5.15 给出了采用相似材料结构研制的 InGaP/GaAs 单异质结 HBT (SHBT) 的共发射极直流输出特性。可以看出, 其反向击穿电压仅有 8V 左右, 而所研制的 DHBT 器件的反向击穿电压达到 16V, 提高了一倍。通过对这两种 GaAs 基 HBT 器件直流特性的比较, 可以明显看出, 采用集电结具有 n 型掺杂 InGaP 插入层复合集电区的 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 结构, 可以很好地解决 DHBT 集电结导带势垒尖峰导致的电流阻挡问题, 也验证了前面理论模拟分析的结果。

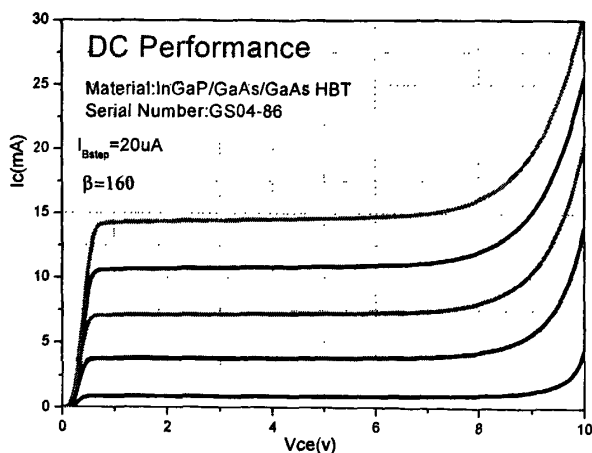


图 5.15 InGaP/GaAs 单异质结 HBT (SHBT) 器件的共发射极直流输出特性

### 5.3.2 InP/InGaAs/InP DHBT 器件特性与分析

图 5.16 给出了与器件研制单位合作, 采用亚微米工艺流程 (发射极尺寸  $0.8 \times 15 \mu\text{m}^2$ ) 所研制的带有能带阶梯缓变复合集电区 InP/InGaAs/InP DHBT 器件的共发射极直流输出特性, 其开启电压约为  $0.15\text{V}$ 。与图 5.17 给出的常规结构 (即集电结未做过任何设计的) InP/InGaAs/InP DHBT 器件的直流输出特性相比可知, 在集电结处采用能带阶梯缓变的两层 InGaAsP 插入层, 降低了 B-C 结导带的势垒尖峰高度, 从而有效克服了电流阻挡效应, 明显改善了 DHBT 器件的电流输出特性。这个结果与前面理论模拟分析的结论也是非常一致的。图 5.18 是带有能带阶梯缓变复合集电区 InP/InGaAs/InP DHBT 器件的高频特性测试结果。可以看到, DHBT 器件的截止频率  $f_T$  达到了  $170\text{GHz}$ , 最高振荡频率  $f_{\text{max}}$  达到了  $253\text{GHz}$ , 击穿电压  $BV_{\text{CEO}}$  大于  $6\text{V}$ , 说明该器件也具有很好的高频特性和功率特性。

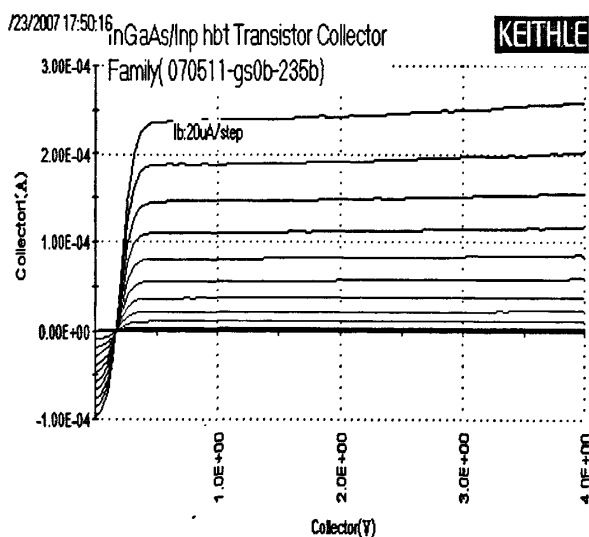


图 5.16 带有能带阶梯缓变集电区 InP 基 DHBT 器件的共发射极直流输出特性

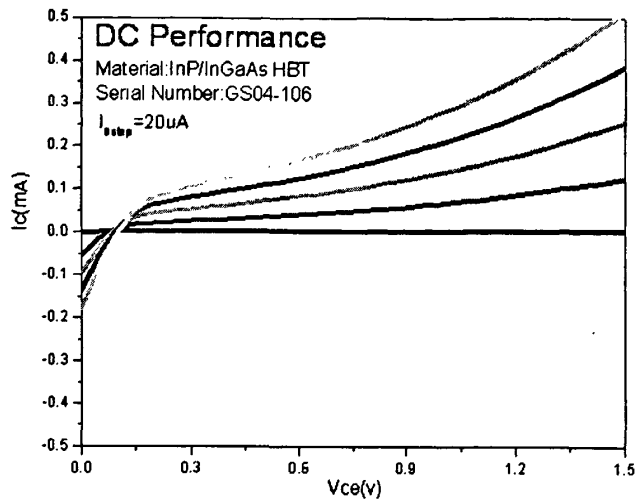


图 5.17 常规结构 InP/InGaAs/InP DHBT 器件的直流输出特性

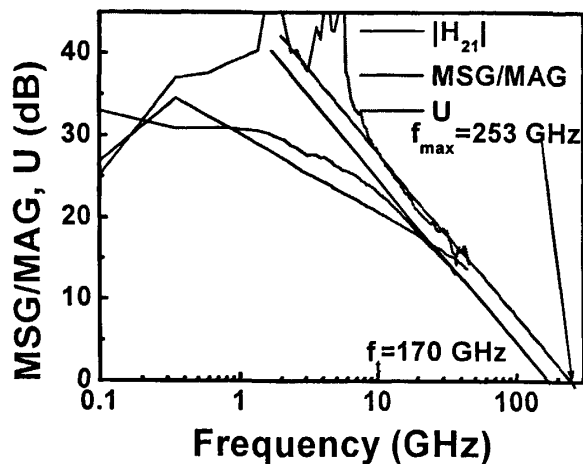


图 5.18 带有能带阶梯缓变集电区 InP 基 DHBT 器件的高频特性

#### 5.4 小结

采用自对准工艺研制出新型结构 InGaP/GaAsInGaP DHBT 和 InP/InGaAs/InP DHBT 器件。直流特性测试的结果表明, 所设计的集电结带有 n-InGaP 插入层的 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 器件开启电压约为 0.15V, 反向击穿电压达到 16V。与传统的单异质结 InGaP/GaAs HBT 相比, 反向击穿电压提高了一倍, 能够满足低损耗、较高功率及高频器件与电路制作的要求。所设计和研制的带有能带阶梯缓变复合集

电区的 InP/InGaAs/InP DHBT 器件开启电压约为 0.15V，结合亚微米工艺流程研制的 DHBT 器件截止频率  $f_T$  达到 170GHz，最高振荡频率  $f_{max}$  达到 253GHz，击穿电压  $BV_{CEO}$  大于 6V。这些结果，既表明了所生长的 DHBT 器件结构材料具有良好的电学特性和晶体质量，也验证了本工作设计的集电结带有 n 型插入层或能带阶梯缓变复合集电区的 DHBT 结构可以较好地解决常规 DHBT 结构集电结存在的导带势垒尖峰问题，明显改善 DHBT 器件的性能，与理论模拟分析的结果完全一致。

## 第六章 总结和展望

异质结双极晶体管 (HBT) 是光纤通信和无线通信系统中的关键器件之一, 在微波/毫米波功率器件和单片集成电路 (MMIC) 等领域具有重要的应用前景。特别是双异质结 HBT (DHBT), 具有开启电压低、反向击穿电压高、输出功率大等特点, 尤其适用于微波/毫米波功率放大等电路。但由于常规的 GaAs 基和 InP 基 DHBT 结构受集电结导带势垒尖峰的影响, 使其输出特性变差, 最大输出功率降低。为了优化 GaAs 基 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 和 InP 基 InP/InGaAs/InP DHBT 材料结构、特别是集电结结构的设计, 探索 GaAs 基和 InP 基 DHBT 的新结构, 本文以气态源分子束外延 (GSMBE) 技术为手段, 对新型结构 HBT 材料的结构设计、外延生长与器件制备进行了深入的研究, 重点围绕 InGaP/GaAs/InGaP 和 InP/InGaAs/InP DHBT 材料结构的设计、解决集电结导带势垒尖峰引起的电流阻挡效应展开, 结合理论模拟分析, 设计和生长了新型结构 GaAs 基和 InP 基 DHBT 结构材料, 并对所研制 DHBT 材料和器件特性进行了测试分析。取得的主要研究结果包括:

1. 采用基于热场发射和连续性方程的反射-透射模型, 对集电结带有 n 型 InGaP 插入层的 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 和带有能带阶梯递变 InGaAsP 复合集电区的 InP/InGaAs/InP DHBT 的电流传输特性及其对器件性能的影响进行了理论模拟和分析。结果表明, 通过采用优化的 n 型插入层厚度和掺杂浓度, 或选择合适的能带阶梯缓变结构, 都可以显著降低 DHBT 集电结的导带势垒尖峰高度, 从而有效克服集电结的电流阻挡效应, 获得较好的输出特性;
2. 通过对 GaAs、InP、InGaP、InGaAs、InGaAsP 等 DHBT 用各单层材料 GSMBE 生长特性的深入研究, 优化了生长工艺和条件, 成功地设计和生长出集电结带有 n 型 InGaP 插入层的 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 和带有能带阶梯递变 InGaAsP 复合集电区的 InP/InGaAs/InP DHBT 结构材料, 所生长的外延材料具有良好的晶体质量、电学特性和大面积均匀性, 可以满足器件与电路研制的要求;
3. 采用常规的湿法腐蚀工艺, 研制出发射极面积为  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$  的大尺寸新型结构 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 器件, 开启电压为 0.15V, 电流增益  $\beta$  为 170, 反向击穿电压达到 16V, 比传统的单异质结 InGaP/GaAs HBT 器件提高了一倍, 具有很好大功率应用前景;

4. 与器件研制单位合作, 研制出发射极面积为  $0.8 \times 15 \mu\text{m}^2$  的小尺寸新型结构 InP/InGaAs/InP DHBT 器件, 截止频率  $f_T$  达到 170GHz, 最高振荡频率  $f_{\text{max}}$  达到 253GHz, 击穿电压  $BV_{\text{CEO}}$  大于 6V, 具有较好的高频和功率特性。

本文通过理论分析、材料生长和器件验证, 对初步解决 GaAs 基 InGaP/GaAs/InGaP DHBT 和 InP 基 InP/InGaAs/InP DHBT 集电结的电流阻挡效应问题取得了一定的结果。但是, 要进一步提高 GaAs 基和 InP 基 DHBT 的性能, 满足电路设计的要求, 最终实现实用化还要大量的工作要做。我们觉得可以考虑从以下几个方面继续进行深入的研究:

1. 进一步深化理论分析, 对在 DHBT 集电结设计中采用 n 型插入层、能带阶梯渐变复合结构以及超晶格能带渐变等方法的效果进行详细的分析比较, 从而可以应用最优的方案进行能带设计;
2. 由于作为基区掺杂剂的 Be 在高温生长时易向基区两侧扩散, 从而对器件的电流增益和频率特性都有很大的负面影响。而采用碳 (C) 作为基区材料的 p 型掺杂剂就不存在高温生长时扩散的问题, 因此可以考虑采用碳 (C) 作为基区的 p 型掺杂源, 这样就不必再考虑杂质的扩散问题, 对于提高器件性能有很大的好处;
3. 在材料生长中应对各个异质结界面间呈现出的不同特性开展深入的研究, 同时对多元材料能带渐变层的生长进行深入研究, 控制 III 族和 V 族束源在很短的时间内束流比多次变化的精度, 以进一步提高外延材料的质量, 达到能带阶梯缓变的设计要求。
4. 建立小尺寸器件制作工艺流程, 同时提高欧姆接触性能, 引入新的工艺方法来减小特征尺寸, 优化器件制作工艺, 同时对器件工艺与 GaAs 基和 InP 基 DHBT 特性的关系进行深入研究和分析, 以进一步优化工艺, 提高器件性能。

## 参考文献

- [1] Kroemer H., Quasi-electric and quasi-magnetic fields in nonuniform semiconductors, RCA Review, 1957(9): 332-324
- [2] Z.Yingda Dong, Scott, D., Yun Wei, Parthasarathy N, Dahlstrom M, Kadow C., Paidi V., Rodwell M.J.W., Urteaga M., Pierson R., Rowell P., Brar B., Sangmin Lee, Nguyen N.X, Nguyen C., Transistor and circuit design for 100-200-GHz ICs, Griffith, Solid-State Circuits, IEEE Journal of, 2005(10): 2061- 2069
- [3]I. Harrison, M. Dahlstrom, S. Krishnan, Z. Griffith, Y.M. Kim, and M.J.W. Rodwell, Thermal limitations of InP HBTs in 80 and 160 Gb ICs, IEEE Trans. on Electron Devices, 2004 (4):529-534
- [4]H. Howe. Microwave Integrated Circuits--An Historical Perspective. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, 1984(9): 991-996
- [5]J. Ding, D. Linton, X. D. Smith, M. Steer Compact Electro-thermal Modelling and Simulation of InP HBT Based on the Local Reference Concept, Proceedings of the 1st European Microwave Integrated Circuits Conference, Manchester UK, September 2006
- [6]K. Mochizuki, R. J. Welty, and P. M. Asbeck, GaInP/GaAs C-up TC-HBT with zero-offset and low-knee-voltage characteristics, Electron.Lett., 2000(3):264-265
- [7] K. Mochizuki, R. J. Welty, P. M. Asbeck, C. R. Lutz, R. E. Welser, S. J. Whitney, and N. Pan, "GaInP/GaAs C-Up TC-HBTs: Optimization of fabrication process and epitaxial layer structure for high-efficiency high power amplifiers," IEEE Trans. Electron Devices, 2000(12):2277-2283
- [8]K. Mochizuki, T. Oka, and I. Ohbu, "Size and temperature-independent zero-offset current-voltage characteristics of GaAsInP/GaAs collector-up tunneling-collector heterojunction bipolar transistors," Electron.Lett., 2001(4):252-253
- [9]K. S. Ang and I. D. Robertson, Analysis and design of impedance-transforming planar Marchand baluns, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2001(2):402-406
- [10] Kim J H, Kim J H, Noh Y S and Park C S, Linearised HBT MMIC power amplifier with partially RF coupled active bias circuit for W-CDMA portable terminals applications, Electron. Lett., 2003 (10):781-783
- [11] Kim J H, Kim J H, Noh Y S and Park C S, An InGaP/GaAs HBT MMIC smart power amplifier for W-CDMA mobile handsets, IEEE J. Solid-State Circuits, 2003(6):905-910
- [12] Lee J M, Kim S I, Min B G and Lee K H, Fabrication and characteristics of multi-finger InGaP/GaAs power HBTs for high power microwave applications, J. Korean Phys. Soc., 2003:S234-S237
- [13]T. Wang and K. Wu, Size-reduction and band-broadening design technique of uniplanar hybrid ring coupler using phase inverter for M(H)MIC's, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 1999(2):198-206
- [14]K. Mochizuki, R. J. Welty, P. M. Asbeck, C. R. Lutz, R. E. Welser, S. J. Whitney, and N.

- Pan, GaInP/GaAs C-Up TC-HBTs: Optimization offabrication process and epitaxial layer structure for high-efficiency highpower amplifiers, IEEE Trans. Electron Devices, 2000(12):2277-2283
- [15] K. Mochizuki, T. Oka, and I. Ohbu, Size and temperature-independent zero-offset current-voltage characteristics of GaAsInP/GaAs collector-up tunneling-collector heterojunction bipolar transistors, Electron. Lett., 2001(4):252-253
- [16] Yasuo Osone, Kazuhiro Mochizuki, Senior Member, IEEE, and Ken'ichi Tanaka, Thermal Performance of Collector-Up HBTs for Small High-Power Amplifiers With a Novel Thermal via Structure Underneath the HBT Fingers IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2005(1):34-38
- [17] N. L. Wang, D. Dunnrowicz, X. Chen, W. Ma, H. F. Chau, X. Sun, Y. Chen, B. Lin, I. L. Lo, C. H. Huang, and M. H. T. Yang, High Efficiency 28V Class AB InGaP/GaAs HBT MMIC Amplifier with Integrated Bias Circuit, IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. 2003: 2397-2402
- [18] M.E. Kim, A.K. Oki, G.M. Gorman, D.K. Umemoto, and J.B. Camou, GaAs heterojunction bipolar transistor device and IC technology for high performance analog and microwave applications, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1989(MTT-37):1286-1303
- [19] Tzung-Han Wu, , Sheng-Che Tseng, , Chin-Chun Meng, and Guo-Wei Huang, GaInP/GaAs HBT Sub-Harmonic Gilbert Mixers Using Stacked-LO and Leveled-LO Topologies, IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques, 2007(5): 880-888
- [20] Yasuo Osone, Kazuhiro Mochizuki, Senior Member, IEEE, and Ken'ichi Tanaka Thermal Performance of Collector-Up HBTs for Small High-Power Amplifiers With a Novel Thermal via Structure Underneath the HBT Fingers IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2005(1):34-38
- [21] B.-G. Min, J.-M. Lee, Seong-Il Kim, K.-H. Lee, C.-W. Ju. Current Gain Improvement of InGaP/GaAs HBT by a Newly Developed Emitter Ledge Process. Journal of the Korean Physical Society, 2003: S518-S521
- [22] H. Howe, Microwave Integrated Circuits--An Historical Perspective. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, 1984(9): 991-996
- [23] Haddad G.I., Trew, R.J., Trew. Microwave solid-state active devices. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, 2002(3): 760-779
- [24] P. M. Smith, S. M. J. Liu, W-band High Efficiency InP-Based Power HEMT with 600GHz  $f_{max}$ , IEEE MGWL, 1995(7):230-232
- [25] [www.compoundsemiconductor.net/cws/article/news/32221](http://www.compoundsemiconductor.net/cws/article/news/32221)
- [26] H. Kroemer, Heterojunction bipolar transistors and integrated circuits, Proceedings of IEEE, 1982(1):13-25

- [27] S. S. Tan, A.G. Milnes, Consideration of the frequency performance potential of GaAs homojunction and heterojunction n-p-n transistors, IEEE Trans. Electron. Dev. 1983(10):1289-1294
- [28] Hong Wang and Geok-Ing Ng, Current transient in polyimide-passivated InP/InGaAs heterojunction bipolar transistors: systematic experiments and physical model, IEEE Transaction on Electron Devices, 2000(12):2261-2269
- [29] G.L. Patton, D.L. Harame, J.M.C. Stork, B.S. Meyerson, G.J. Scilla, E. Ganin. Graded-SiGe-base poly-emitter heterojunction bipolar transistors. Electron Device Letters, IEEE, 1989(12): 534-536
- [30] D.L. Harame, J.M.C. Stork, G.L. Patton, S.S. Iyer, B.S. Meyerson, G.J. Scilla, E.F. Crabbe, E. Ganin. High performance Si and SiGe-base p-n-p transistors. Electron Devices, Meeting Technical Digest., International, San Francisco, CA, USA, 1988, pp:889-891
- [31] Theodore Chung, Seth R. Bank, John Eppler et al., Current gain dependence on subcollector and etch-stop doping in InGaP/GaAs HBTs, IEEE Transactions on Electron Devices, 2001(5):835-840
- [32] N. Pan, J. Elliott, M. Knowles et al., High reliability InGaP/GaAs HBT, IEEE Electron Device Letters, 1998(4):115-117
- [33] Jae-Woo Park, Dimitris Pavlidis, Saeed Mohammadi, Improved emitter transit time using AlGaAs-GaN composite emitter in GaInP/GaAs heterojunction bipolar transistors, IEEE Transactions on Electron Devices, 2001(7):1297-1303
- [34] Oka T., Hirata K., Ouchi K., Uchiyama H., Taniguchi T., Mochizuki K., Nakamura T., Advanced performance of small-scaled InGaP/GaAs HBT's with  $f_T$  over 150 GHz and  $f_{max}$  over 250 GHz, Electron Devices Meeting, IEDM '98 Technical Digest. International, San Francisco, CA, USA, 1998. pp:653-656
- [35] P. C. Chang, A.G. Baca, N. Y. Li, X. M. Xie, H. Q. Hou, E. and Armour. InGaP/InGaAsN/GaAs NpN double-heterojunction bipolar transistor. Apply Physics Letters, 2000 (16): 2262-2264
- [36] P. C. Chang, A.G. Baca, N. Y. Li, P. R. Sharps, H. Q. Hou, J. R. Laroche and F. Ren. InGaAsN/AlGaAs P-n-p heterojunction bipolar transistor, Apply Physics Letters, 2000(19):2788-2790
- [37] C. R. Bolognesi and S. P. Watkins, InP-Based Double Heterojunction Bipolar Transistors: It May Not Have to Be GaInAs, Compound Semiconductor, 2000(2):94-99
- [38] P. C. Chang, N.Y. Li, A.G. Baca et al., Device characteristics of the GaAs/InGaAsN/GaAs p-n-p double heterojunction bipolar transistor, IEEE Electron Device Letters, 2001(3):113-115
- [39] P. C. Chang, A. G. Baca, N. Y. Li, X. M. Xie, H. Q. Hou, E. Armour, InGaP/InGaAsN/GaAs NpN double-heterojunction bipolar transistor. Apply Physics Letters. 2000(16): 2262-2264

- [40] Kazuhio Mochizuki, Rebecca J. Welty, Peter M. Asbeck et al., GaInP/GaAs collector-up tunneling-collector heterojunction bipolar transistors (C-up TC-HBTs): optimization of fabrication process and epitaxial layer structure for high-efficiency high-power amplifiers, *IEEE Transistors on Electron Devices*, 2000(12): 2277-2283
- [41] P. C. Chang, A. G. Baca, N. Y. Li, P. R. Sharps, H. Q. Hou, J. R. Laroche, F. Ren, InGaAsN/AlGaAs P-n-p heterojunction bipolar transistor *Apply Physics Letters*. 2000(19): 2788-2790
- [42] Monier C, Baca AG, Chang P C, Newman F D, Li N Y, Sun S Z, Armour E and Hou H Q, Significant operating voltage reduction on high-speed GaAs-based heterojunction bipolar transistors using a low band gap InGaAsN base layer, *IEEE Trans. Electron Devices*, 2002(8):1329-1335
- [43] DeLuca P M, Lutz C R, Welser R E, Chi T Y, Huang E K, Welty R J and Asbeck P M, Implementation of reduced turn-on voltage InGaP HBTs using graded GaInAsN base regions, *IEEE Electron Device Lett.*, 2002(10):582-584
- [44] 石瑞英, 刘训春. HBT 结构的新进展. *半导体技术*. 2002(6):72-76
- [45] Yasuyuki Suzuki, Masayuki Mamada, and Zin Yamazaki, Over-100-Gb/s 1:2 Demultiplexer Based on InP HBT Technology, *IEEE Journal of Solid-state Circuits*, 2007(11):2594-2599
- [46] Y. Baeyens, N. Weimann, V. Houtsma, J. Weiner, Y. Yang, J. Frackowiak, A. Tate, and Y. K. Chen, "High-power submicron InP D-HBT push-push oscillators operating up to 215 GHz," in *IEEE Compound Semiconductor. Integrated Circuit Symp.*, Palm Springs, CA, USA, Oct. 2005, pp:208-211.
- [47] Y. K. Chen, R. Kapre, W. T. Tsang, and M. C. InGaP/GaAs/InGaP double heterostructure bipolar transistors with carbon-doped base grown by CBE, 1992, *Electronics Letters*(13):1228-1230
- [48] A. W. Hanson, S. A. Stockman, and G. E. Stillman, A Comparison of In<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>P/GaAs: C Single and Double-Heterojunction Bipolar Transistors Grown by LP-MOCVD, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1992(11):2656
- [49] S. S. Lu and Y. J. Wang, A GSMBE Grown GaInP/GaAs Narrow Base DHBT Exhibiting N-Shape Negative Differential Resistance with Variable Peak-to-Valley Current Ratio up to  $1 \times 10^7$  at Room Temperature, *IEEE Electron Device Letters*, 1994(2):60-62
- [50] Jong-In Song, Catherine Caneau, Kyung-Bae Chough, and W.-P. Hong, GaInP/GaAs Double Heterojunction Bipolar Transistor with High  $f_T$ ,  $f_{max}$ , and Breakdown Voltage *IEEE Electron Device Letters*, 1994(1):10-12
- [51] Hong Wang, Geok-Ing Ng., Avalanche multiplication in InP/InGaAs double heterojunction bipolar transistors with composite collectors, *IEEE Transaction on Electron Devices*, June 2000(6):1125-1133

- [52]C. R. Bolognesi, N. Matine, M. W. Dvorak et al., Non-blocking collector InP/GaAs<sub>0.51</sub>Sb<sub>0.49</sub>/InP double heterojunction bipolar transistors with a staggered lineup base-collector junction, IEEE Electron Device Letters, 1999(4):155-157
- [53]Bolognesi C R, Watkins S P, InP-based double heterojunction bipolar transistors: It may not have to be GaInAs, Compound Semiconductor, 2000(2):94~99.
- [54]刘喆, 唐喆, 崔得良, 徐现刚, 一种基于能带工程设计的 CaAsSb/InP 异质结双极晶体三极管, 物理, 2002(5): 306-309
- [55]A. Y. Cho, Epitaxy by Periodic Annealing, Surface Sci., 1969(17):494-498
- [56]A. Y. Cho, Morphology of Epitaxial Growth of GaAs by a Molecular Beam Method: The Observation of Surface Structures, J. Appl. Phys., 1970(41): 2780-2783
- [57]A. Y. Cho, et al., Gallium Arsenide and Related Compounds, Third International Symposium on GaAs, London, UK, 1970:18-23
- [58]A. Y. Cho, A. Yariv and P. Yeh., Observation of confined propagation in Bragg waveguides, Appl. Phys. Lett., 1977(30):397-402
- [59]Casey H., Cho A., Barnes, P., Application of molecular-beam epitaxial layers to heterostructure lasers, IEEE, J. Quantum. Elec., 1975(11):467-471
- [60]Cheng, K Y; Cho, A Y; Wagner, W R; Bonner, W A, Molecular Beam Epitaxial Growth of Uniform In sub(0.53)Ga sub(0.47)As on InP With a Coaxial In-Ga Oven Appl. Phys. Lett., 198(2): 1015-1021
- [61]A. Y. Cho, Growth of Periodic Structures by the Molecular-Beam Method, J. Appl. Phys., 1971(11): 467-468
- [62]C.E.C. Wood, III - V Alloy Growth by MBE, Chapter 4 in InGaAsP Alloy Semiconductors, New York: Wiley-Interscience Publication, 1982:87-105
- [63]R. Fischer, J. Klem, T. J. Drummond, R. E. Thorne, W. Kopp, H. Morkoç, and A. Y. Cho, Incorporation rates of gallium and aluminum on GaAs during molecular beam epitaxy at high substrate temperatures J. Appl. Phys., 1983(54):2508-2511
- [64]M. Ilegems, R. Dingle, and L. W. Rupp Jr., Optical and electrical properties of Mn-doped GaAs grown by molecular-beam epitaxy J. Appl. Phys., 1975(46):3059-3065
- [65]J. R. Arthur, Interaction of Ga and As<sub>2</sub> Molecular Beams with GaAs Surfaces J. Appl. Phys., 1968(39):4032-4036
- [66]CHO, A. Y., and ARTHUR, J. R., 'Molecular beam epitaxy' in SOMORJAI, G., and MCCALDIN, Solide State Chemistry, 1975(10):157-191
- [67]Fan Ren, Cammy R. Abernathy, R. F. Kopf, et al. 300 °C GaN/AlGaN Heterojunction Bipolar Transistor. MRS Internet J. Nitride Semicond. Res., 1998(3): 41
- [68]Toshiki Makimoto, Kazuhide Kumakura and Naoki Kobayashi. Extrinsic Base Regrowth of p-InGaN for Npn-Type GaN/InGaN Heterojunction Bipolar Transistors. Japanese Journal of Applied Physics, 2004(43):1922-1924
- [69]Sarah Estrada, Andrew Huntington, Andreas Stonas, et al. n-AlGaAs/p-GaAs/n-GaN heterojunction bipolar transistor wafer-fused at 550-750 °C. Appl. Phys. Lett.,

- 2003(83):560
- [70]H. Howe.Microwave Integrated Circuits--An Historical Perspective. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, 1984(32): 991-996
- [71]J.I. Song,W.P. Hong,C.J. Palmstrom,B.P. van derGaag,K.B. Chough. Millimetre-wave InP/InGaAs heterojunction bipolar transistors with a subpicosecond extrinsic delay time. Electronics Letters, 1994(5): 456-457
- [72]M.J.W. Rodwell,M. Urteaga,T. Mathew,D. Scott,D. Mensa,Q. Lee,J. Guthrie,Y. Betser,S.C. Martin,R.P. Smith,S. Jaganathan,S. Krishnan,S.I. Long,R. Pullela,B. Agarwal,U. Bhattacharya,L. Samoska,M. Dahlstrom.Submicron scaling of HBTs. Electron Devices, IEEE Transactions on, 2001(11): 2606-2624
- [73]W. Hafez, J.-W. Lai, and M. Feng, InP/InGaAs SHBTs with 75 nm collector and  $f_T > 500$  GHz, IEEE Electronics Letters, 2003(20):1475-1476
- [74]W. Snodgrass, W. Hafez, N. Harff, and M. Feng, Pseudomorphic InP/InGaAs Heterojunction Bipolar Transistors (PHBTs) Experimentally Demonstrating  $f_T = 765$  GHz at  $25^\circ\text{C}$  Increasing to  $f_T = 845$  GHz at  $-55^\circ\text{C}$ , Internation Electron Devices Meeting, December 11 - 13, Hilton San Francisco and Towers San Francisco, CA, USA, 2006:22.1.1-22.1.4.
- [75]Dvorak, M.W. Bolognesi, C.R. Pitts, O.J. Watkins, S.P., 300 GHz InP/GaAsSb/InP double HBTs with high current capability and  $BV_{CEO} > 6$  V, IEEE Electron Device Letters, 2001(8):361-363
- [76] Snodgrass, William Wu, Bing-Ruey Cheng, K. Y. Feng, Milton, Type-II GaAsSb/InP DHBTs with Record  $f_T = 670$  GHz and Simultaneous  $f_T, f_{max} > 400$  GHz, Electron Devices Meeting, IEDM 2007. IEEE International, 2007: 663-666
- [77]钱永学, 自对准 GaInP/GaAs HBT 器件, 半导体学报, 2002(5):513-516
- [78]常冀萍, 微波功率器件及其电路, 半导体技术, 1994(4):17-20
- [79]孙英华等, 双极型微波器件失效分析与改进, 半导体技术, 1996(2):28-32
- [80]文剑, 曾健平, 晏敏, 微波功率器件材料的发展和应用前景, 电子与封装, 2005(11):1-7
- [81]王占国, 半导体材料研究的新进展, 半导体技术, 2003(3):8-14
- [82]Shamir N, Ritter D, Cytermann C, Beryllium doped InP/InGaAsP heterojunction bipolar transistors, Solid-State Electron., 1998(11): 2039-2045
- [83]Caffin D, Bouche M, Meghelli M, et al InP/InGaAs double-HBT technology for high bit-rate communication circuits, Electron Lett , 1997(2): 149-151
- [84]Hafez W, Jie-Wei Lai, Feng M, InP/InGaAs SHBTs with 75 nm collector and  $f_{sub} T > 500$  GHz, Electron Lett, 2003(20): 1475-1476
- [85]Ishii K, Nakajima H, Nosaka H, et al Over 40 Gbit/s 16:1 multiplexer IC using InP/InGaAs HBT technology, Electron Lett , 2003(12): 911-913
- [86]Michio Ohkubo, Akira Iketani, Tetsurou Ijichi, et al InGaAs/InP double-heterojunction bipolar transistors with step graded InGaAsP between InGaAs base and InP collector

- grown by metalorganic chemical vapor deposition, Appl Phys Lett , 1991(21): 2697-2699
- [87]Kurishima K, Nakajima H, Kobayashi T, et al Fabrication and characterization of high-performance InP/InGaAs double-heterojunction bipolar transistors, IEEE Trans Electron Devices, 1994 (8):1319-1326
- [88]Willen B, Westergren U, Asonen H High-gain, high-speed InP/InGaAs double-heterojunction bipolar transistors with a step-graded base-collector heterojunction[J], IEEE Electron. Device Lett , 1995(11): 479-481
- [89]Yang K, Munns G O, Haddad G.I High  $f_{max}$  InP double heterojunction bipolar transistors with chirped InGaAs/InP superlattice base-collector junction grown by CBE[J], IEEE Electron Device Letters, 1997(11): 553- 555
- [90]Lee, T.-W. Houston, P.A. Generalized analytical transport modeling of the DC characteristics of heterojunction bipolar transistors , Electron Devices, IEEE Transactions on ,1993(8):1390-1397
- [91]Beneking, H., The collector function in semiconductor devices, Electron Devices, IEEE Transactions 1996(9): 1416-1427
- [92]S.-C. Lee and H.-H. Lin, Transport theory of the double heterojunction bipolar transistor based on current balancing concept, J. Appl. Phys., 1986(5):1688-1695
- [93]B. Mazhari, G. B. Gao, and H. Morkoc, Collector-emitter offset voltage in heterojunction bipolar transistors, Solid State Electron., 1991(3):315-321
- [94]Ng, C.-M.S, Houston, P.A, Ho-Kwang Yow, Analysis of the temperature dependence of current gain in heterojunction bipolar transistors, Electron Devices, IEEE Transactions on ,1997(1): 17-24
- [95]McAlister, S.P.; McKinnon, W.R.; Driad, R., Interpretation of the common-emitter offset voltage in heterojunction bipolar transistors, Electron Devices, IEEE Transactions on, 2001(8):1745-1747
- [96]A. Elashabini-Riad and J. He, Investigation of injection mechanisms for InGaAs/InP double heterostructure bipolar transistors, Solid-State Electron., 1989(10):853-860
- [97]N Duhamel, P Henoc, F Alexandre, Influence of growth temperature on Be incorporation in molecular beam epitaxy GaAs epilayers, Appl. Phys. Lett., 1981(1):49-51
- [98]Jong-Lam Lee, Long Wei, Shoichiro Tanigawa, and Mitsuo Kawabe ,Effects of impurities Si and Be on the creation of Ga vacancies and Ga interstitials in GaAs grown by molecular beam epitaxy Appl. Phys. Lett. 1991(14):1524-1526
- [99]C. R. Abernathy, S. J. Pearton, R. Caruso, F. Ren and J. Kovalchik, Ultrahigh doping of GaAs by carbon during metalorganic molecular beam epitaxy., Appl. Phys.Lett. 1989(17):1750-1752
- [100] Bijan Tadayon, Saied Tadayon, W. J. Schaff, M. G. Spencer, G. L. Harris, P. J. Tasker, C. E. C. Wood and L. F. Eastman, Reduction of Be diffusion in GaAs by migration-enhanced epitaxy., Appl. Phys. Lett. 1989(1):59-61

- [101] BPR Marioton, TY Tan, U Gösele, Influence of dislocations on diffusion-induced nonequilibrium point defects in III-V compounds, *Appl. Phys. Lett.* 1989(9):849-851
- [102] 刘恩科等, 半导体物理学, 第4版, 北京: 国防工业出版社, 96-97
- [103] J. F. Carlin, A. Rudra, R. Houdré, J. L. Staehli and M. Illegems, Growth of GaInAs by chemical beam epitaxy, *J. Crystal Growth*, 1991(1-4):1057-1059
- [104] K. Muraki, S. Fukatsu, Y. Shiraki and R. Ito, Surface segregation of In atoms and its influence on the quantized levels in InGaAs/GaAs quantum wells, *J. Crystal Growth*, 1993(1-4):546-549
- [105] T. Uchida, Toshi K. Uchida, N. Yokouchi, T. Miyamoto, F. Koyama and K. Iga Photoluminescence characterization of  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$  ( $0 \leq x \leq 0.32$ ) strained quantum wells grown on InP by chemical beam epitaxy, *J. Crystal Growth*, 1992(1-4):357-361
- [106] 徐安怀, InP基及含磷异质结双极晶体管材料结构设计及气态源分子束外延生长研究, 中国科学院博士学位论文, 2004
- [107] AI Likun, XU Anhuai, SUN Hao, ZHU Fuying, and QI Ming InGaP/InGaAs/GaAs DHBT Structural Materials Grown by GSMBE, *RARE METALS*, 2006 (2):20-23
- [108] 徐安怀, 邹璐, 陈晓杰, 齐鸣: InGaAs/InP HBT材料的光束生长及其特性研究, *稀有金属*, 2004(3):516-518
- [109] Anhuai Xu, LiKun Ai, Hao Sun and Ming Qi, InP/InGaAs/InP DHBT structures with N+ Doping Composite Collector Grown by Gas Source Molecular Beam Epitaxy, *Journal of Ceramic Processing Research*. 2006 (2):177-179
- [110] U. H., O. H., e. al. Fabrication of sub-transistor via holes for small and efficient power amplifiers using highly selective GaAs/InGaP wet etching. *J. Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2006, 24(2): 664-668
- [111] Y. S.F., N. T.K., Z. H.Q. Low damage and low surface roughness GaInP etching in  $\text{Cl}_2/\text{Ar}$  electron cyclotron resonance process. *J. Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2001, 19(5): 1775-1781
- [112] A.W. Hanson, D. D., K.A. Bacher, e. al. selective gate recess process utilizing MBE-grown  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$  etch-stop layers for GaAs-based FET technologies. Gallium Arsenide Integrated Circuit (GaAs IC) Symposium, 1998. Technical Digest 1998, 20th Annual, 1998: 195-197
- [113] A. Girardot, A. Henkel, S.L. Delage, M.A. DiForte-Poisson, E. Chartier, D. Floriot, S. Cassette, P.A. Rolland. High-performance collector-up InGaP/GaAs heterojunction bipolar transistor with Schottky contact. *Electronics Letters*, 1999 (8): 670-672
- [114] Mochizuki K.; Welty, R.J.; Asbeck, P.M.; Lutz, C.R.; Welser, R.E.; Whitney, S.J.; Pan, N. GaInP/GaAs collector-up tunneling-collector heterojunction bipolar transistors (C-up TC-HBTs): optimization of fabrication process and epitaxial layer structure for high-efficiency high-power amplifiers, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2000(12):2277- 2283
- [115] Mochizuki K, Tanaka K.-I, Uchiyama H, Ohta H, Terano A, Kikawa T, Taniguchi T,

- Mita, R, Characterization and modeling of bias-stressed InGaP/GaAs collector-up tunneling-collector HBTs fabricated with boron-ion implantation, *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 2005(10):2144- 2149.
- [116]A.W. Hanson,D. D.,K.A. Bacher,e. al.selective gate recess process utilizing MBE-grown  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$  etch-stop layers for GaAs-based FET technologies. Gallium Arsenide Integrated Circuit (GaAs IC) Symposium, Technical Digest 20th Annual, 1998:195-197
- [117]Uchi Yama Hiroyuki, Ota Hiroshi, Shiota Takashi, Takubo Chisaki, Tanaka Kenichi, Mochizuki Kazuhiro, Fabrication of Sub-transistor Via-holes Using Citric-acid-based Wet Etching, *IEIC Technical Report*, 2006(93):63-68
- [118]P. Eliá, a, V. Cambela, S. Hasenöhrla, P. Hudekb and J. Nováka, SEM and AFM characterisation of high-mesa patterned InP substrates prepared by wet etching, *Materials Science and Engineering B*, 1999(1-3):15-20
- [119]DeSalvo G C,Tseng W F,Comas J. Etch rates and selectivities of citric acid/hydrogen peroxide on GaAs,  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ ,  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ,  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ,  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  and InP. *J Electrochem Soc*, 1992(3):831-835
- [120]Theuwis A,Gomes W P. A fundamental study on n- and p- $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  in  $\text{H}_2\text{O}_2$  solution. *J Electrochem Soc*, 1997(4):1390-1393
- [121]Theuwis A, Vermeir I E. On the selective etching of  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  and  $\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{As}_{0.61}\text{P}_{0.39}$  versus InP in alkaline  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$  solutions. *J Electrochem Soc*, 1999(3):1172-1180
- [122]Theuwis A,Gomes W P. Electrochemical and etching behavior of InP and  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  in alkaline hypobromite solutions. *J Electrochem Soc*, 1999(5): 1903-1909
- [123]Eun-Hyun Park and Young-Se Kwon, Chemical Etching of InGaAsP InP Using  $\text{HBr-H}_3\text{PO}_4\text{-K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  and Its Application to Microlens Array, *Indium Phosphide and Related Materials Conference*, Williamsburg, VA, USA, 2000, pp: 190-192
- [124]Hui Huang, Xingyan Wang, Xiaomin Ren, b Qi Wang, and Yongqing Huang, Selective wet etching of InGaAs/InGaAsP in  $\text{HCl}/\text{HF}/\text{CrO}_3$  solution:Application to vertical taper structures in integrated optoelectronic devices, *J. Vac. Sci. Technol. B* 2005(4):1650-1653
- [125]U. H.,O. H.,e.al. Fabrication of sub-transistor via holes for small and efficient power amplifiers using highly selective GaAs/InGaP wet etching. *J. Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2006 (2): 664-668
- [126]T. Kitano, S. Izumi, H. Minami, T. Ishikawa, K. Sato, T. Sonoda, and M.Otsubo, Selective wet etching for highly uniform GaAs/ $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  heterostructure field effect transistors ,*J. Vac. Sci. Technol. B*, 1997(1):167-170
- [127]许兆鹏, GaAs,GaP,InP,InGaAsP,AlGaAs,InAlGaAs的化学腐蚀研究, *固体电子学研究与进展*, 1996(1): 56-63
- [128]石瑞英,孙海锋,刘训春,刘洪民 100mm InGaP/ GaAs HBT 及相关电路关键工艺.

半导体学报, 2005(1): 106-110

- [129]I. Shiota, K. Motoya, T. Ohmi, N. Miyamoto, and J. Nishizawa, Auger Characterization of Chemically Etched GaAs Surfaces, J. Electrochem. Soc., 1977(1): 155-157
- [130]J. L. Richards and A. J. Crocker, Etch Pits in Gallium Arsenide J. Appl.Phys.,1960(3):611-612
- [131]EW Jensen, Polishing Compound Semiconductors, Solid State Technology, 1973(8):49-52

## 攻读博士学位期间发表论文目录

## 一、学术期刊论文

1. Ai Likun, Xu Anhuai, Sun Hao, Zhu Fuying and Qi Ming, InGaP/InGaAs/GaAs DHBT structural materials grown by GSMBE, Rare Metals, 2006, **25** (z2): 20-23
2. 艾立鹏, 徐安怀, 孙浩, 朱福英, 齐鸣, 带有阶梯缓变集电区的 InP/InGaAs/InP DHBT 材料研究, 固体电子学研究与进展, 2008, **28** (1): 138-141
3. Anhuai Xu, Likun Ai, Hao Sun and Ming Qi, InP/InGaAs/InP DHBT structures with  $n^+$  doping composite collector grown by gas source molecular beam epitaxy, Journal of Ceramic Processing Research, 2006, **7** (2): 177-179
4. Anhuai Xu, Ming Qi, Fuying Zhu, Hao Sun, Likun Ai, Heavily carbon-doped p-type InGaAs grown by gas source molecular beam epitaxy for application to heterojunction bipolar transistors, J. Crystal Growth, 2007, **301-302**: 212-216
5. 齐鸣, 徐安怀, 艾立鹏, 孙浩, 朱福英, InP 基及含磷化合物 HBT 材料的 GSMBE 生长与特性研究, 半导体学报, 2007, **28** (Supplement): 182-185
6. 孙浩, 齐鸣, 徐安怀, 艾立鹏, 朱福英, 重碳掺杂 p 型 GaAsSb 的 GSMBE 生长及其特性研究, 半导体学报, 2007, **28** (11): 1765-1768
7. 孙浩, 齐鸣, 徐安怀, 艾立鹏, 苏树兵, 刘新宇, 刘训春, 钱鹤, 带有复合掺杂层集电区的 InP/InGaAs/InP DHBT 直流特性分析, 半导体学报, 2006, **27** (8): 1431-1435

## 二、学术会议论文

8. Likun Ai, Anhuai Xu, Hao Sun, Fuying Zhu, Ming Qi, GSMBE growth of InGaAsP step-graded composite collector structure applied to DHBT, The 15th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Aug. 3-8, 2008, Vancouver, Canada
9. Ai L. K., Xu A. H., Sun H., Zhu F. Y., Qi M., InGaP/InGaAs/GaAs DHBT structural materials grown by GSMBE, The 10th China-Korea Workshop on Advanced Materials, Aug. 21-24, 2006, Huangshan, China
10. 艾立鹏, 徐安怀, 孙浩, 朱福英, 齐鸣, InP 基 DHBT 阶梯缓变集电区结构的 GSMBE 生长及其特性研究, 第七届全国分子束外延学术会议, 2007 年 10 月, 江西南昌
11. Anhuai Xu, Likun Ai, Hao Sun and Ming Qi, InP/InGaAs/InP DHBT structures with  $n^+$  doping composite collector grown by gas source molecular beam epitaxy, The 9th Korea-China Workshop on Advanced Materials, Oct.12-14, 2005, Kyungju, Korea
12. Hao Sun, Ming Qi, Anhuai Xu, Likun Ai, Fuying Zhu, Growth of GaAsSb with heavily carbon doping by GSMBE for HBT application, The 15th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Aug. 3-8, 2008, Vancouver, Canada
13. Anhuai Xu, Ming Qi, Fuying Zhu, Hao Sun, Likun Ai, Heavily carbon-doped p-type InGaAs grown by gas source molecular beam epitaxy for application to heterojunction

bipolar transistors, The 14th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Sept. 3-8, 2006, Tokyo, Japan

14. 齐鸣, 徐安怀, 艾立鹏, 孙浩, 朱福英, InP 基及含磷化合物 HBT 材料的 GSMBE 生长与特性研究, 第十四届全国化合物半导体材料、微波器件和光电器件学术会议, 2006 年 11 月, 广西北海
15. 孙浩, 齐鸣, 徐安怀, 艾立鹏, 朱福英, 重碳掺杂 p 型 GaAsSb 的 GSMBE 生长及其特性研究, 第七届全国分子束外延学术会议, 2007 年 10 月, 江西南昌

## 致 谢

本论文是在我的导师齐鸣研究员的悉心指导下完成的。导师渊博的学识和严谨的治学态度使我受益菲浅。从导师身上我不仅仅学到了知识，更学到了对待学业、对待工作一丝不苟、勇于探索的精神，这都是我终身受用的。

感谢在我的论文写作和论文工作中给予我巨大帮助的徐安怀副研究员和孙浩同学。从结构设计、材料生长、器件流片以及特性测试，每一步工作，每一个数据，都是在两位的协助下完成的，共同在 MBE 设备上工作的日日夜夜，使我获得了详实的实验数据，得以完成博士论文。

感谢曹俊诚研究员、张永刚研究员、龚谦研究员、李爱珍研究员、于广辉副研究员、徐刚毅副研究员、李晓良副研究员、郑燕兰高工在实验过程中给予的指导与建议。感谢朱福英实验师、蒋守顺实验师、李存才技师、胡建实验师、丁慧凤实验师、王嘉宽工程师、郝幼申工程师在材料测试与工艺制作方面的帮助。

感谢田招兵同学、李耀耀同学、王伟同学、李世国同学在工艺方面的有益探讨和大力支持。感谢顾溢、李华、林朝通、王新中、李健、张永亮、赵德印、薛伟等同学在学习和生活中的帮助。

感谢中科院上海技术物理所孙艳助研、曹萌同学在 SEM 测试方面的帮助。

在材料结构设计和器件制作过程中，得到了中国科学院微电子研究所刘新宇研究员、金智研究员和中电集团第十三研究所李献杰研究员的大力支持和帮助，对他们致以衷心的感谢。

感谢研究生部老师对我学习和生活上的关心及帮助。

感谢我的至爱亲人。无论在成功时还是失败时，他们都是我最坚强的后盾，给予我不断的鼓励，给予我不断的支持，给予我巨大的力量。

## 作者简历

姓名：艾立鵬

性别：男

出生年月：1977 年 3 月

籍贯：黑龙江鹤岗

主要经历：

|               |                    |              |    |
|---------------|--------------------|--------------|----|
| 1996.9~2000.6 | 长春光学精密机械学院         | 电子材料元器件专业    | 学士 |
| 2000.9~2003.6 | 长春理工大学             | 光学工程专业       | 硕士 |
| 2003.7~2004.4 | 长春理工大学             |              | 教师 |
| 2004.5~2008.6 | 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 |              | 助研 |
| 2005.9~2008.6 | 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 | 微电子学与固体电子学专业 | 博士 |

参加课题：

1. 新结构异质结双极晶体管（HBT）器件（国家 973 项目）
2. InP 基 RTD/HBT 量子单片微波集成电路关键技术研究（国家自然科学基金项目）
3. 新型结构 InP 基及含磷半导体微结构外延材料（支撑项目）