

## 半导体量子器件物理讲座

## 第三讲 异质结双极晶体管 (HBT)\*

王 良 臣

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

**摘 要** 文章首先给出了同质结双极晶体管和异质结双极晶体管(HBT)在材料结构参数上的差异.这种差异表明,在器件的材料结构设计上已从掺杂设计步入了能带工程设计.和同质结双极晶体管相比,HBT具有更优越的性能.接着介绍了HBT的工作原理、典型的材料结构及器件的制作.

**关键词** 双极型晶体管,能带工程设计

## HETEROJUNCTION BIPOLAR TRANSISTORS

WANG Liang-Chen

(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract** The differences between the material structural parameters of a homojunction bipolar transistor and those of a heterojunction bipolar transistor (HBT) are discussed briefly. It is shown that doping design for the device's material structure has evolved into band engineering design. In comparison to a homojunction bipolar transistor, the HBT offers superior performance. The principle of operation, typical material structures and HBT fabrication procedures will be described.

**Key words** HBT, band engineering design

## 1 前言

1951年,Schokley提出了宽禁带材料作晶体管发射结的原理<sup>[1]</sup>.1957年,H.Kroemer系统叙述了若发射区材料的禁带宽度大于基区的禁带宽度,可获得很高的注入比<sup>[2]</sup>.1972年,Dumke<sup>[3]</sup>利用液相外延方法首先制成了AlGaAs/GaAs异质结双极晶体管.随着分子束外延(MBE)技术的出现与发展,1978年Bell实验室利用MBE获得了调制掺杂AlGaAs/GaAs异质结构.在此之后,1980年用MBE方法制成了AlGaAs/GaAs异质结双极晶体管.近些年来,人们利用能带工程又得到了不同材料结构的异质结双极晶体管.

从同质的硅双极晶体管发展到异质结双极晶体管,在设计上发生了根本变革,人们从掺杂工程设计进入到能带工程设计,调整了发射区和基区的掺杂浓度,从而降低了发射结电容和基区电阻,提高了增

益.异质结双极晶体管(HBT)的电流增益截止频率 $f_T$ 高,驱动能力强,适合于高速电路.它的相位噪声低,功率密度大,在低噪声大功率方面将发挥其特长.

## 2 双极型晶体管的原理及基本材料结构

同质结双极晶体管是利用同种半导体材料(如硅材料)制成的具有两个p-n结的晶体管,它是由电子和空穴两种载流子参与导电过程的半导体器件.两个p-n结形成了发射区E、基区B和集电区C.其基本结构分p-n-p型和n-p-n型,如图1.

实际应用电路中晶体管有3种连接方法:共基极、共发射极和共集电极,如图2所示.这3种连接方法中,发射结均为正偏置,集电结均为负偏置.

发射结在正偏置下,对于p-n-p型晶体管,空

\* 2000-06-20收到初稿,2000-11-24修回

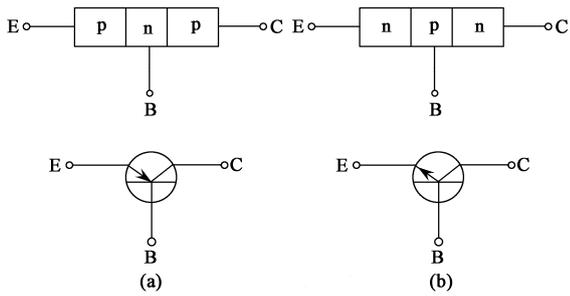


图1

(a) p-n-p型晶体管; (b) n-p-n型晶体管的结构和符号

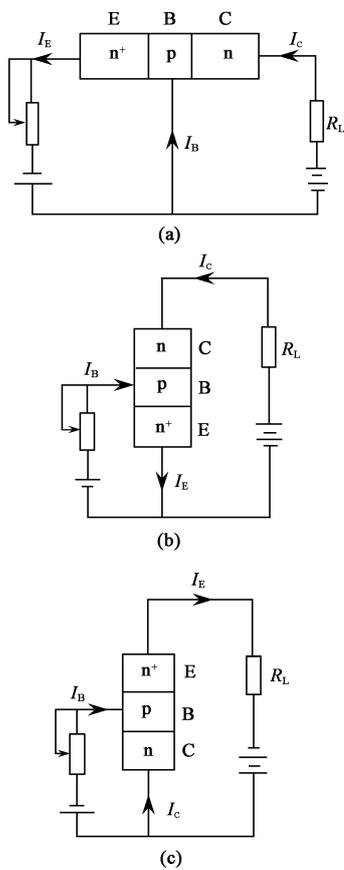


图2

(a) 晶体管共其极; (b) 晶体管共发射极; (c) 晶体管共集电极的接法

穴从发射区向 n 型基区注入,电子从 n 型基区向 p 型发射区注入.由于集电结处于反偏置,当基区宽度较窄时,注入到基区的空穴将被集电结强电场扫过集电结耗尽区,形成集电极电流.如果大部分从发射区注入到基区的空穴在运输过程中未被复合掉而到达集电极,那么集电极电流就接近发射极空穴电流.显然,共基极接法中晶体管不起电流放大作用,但由

于发射结为正偏置,正向电阻小,集电结反偏置有大的反向电阻,因此具有电压放大和功率放大作用.

除共基极连接方式之外,共发射极被广泛采用,因为它具有电流和功率放大作用.

以 n-p-n 型双极晶体管为例,共发射极电流放大系数(增益)  $\beta \approx I_C / I_B$  受发射效率  $\eta$  ( $\eta = I_{nE} / I_E$ ) 和基区输运因子  $\alpha_B$  的影响.发射效率表示由发射区注入到基区的电子电流  $I_{nE}$  与发射极总电流  $I_E$  之比,对放大有贡献的是注入到基区的电子电流  $I_{nE}$ .若忽略 EB 结界面复合电流,理想情况下  $\eta$  接近 1.基区输运因子  $\alpha_B$  表征了到达集电结的电子电流  $I_{nC}$  与注入到基区的电子电流  $I_{nE}$  之比,它反映了载流子在输运过程中在基区和 BC 结界面区的复合损失情况.这种复合损失越小,  $\alpha_B$  越接近 1.显然在理想情况下  $\eta \approx 1$ ,  $\alpha_B \approx 1$ ,  $I_{nE} \approx I_{nC} \approx I_C$ ,而  $I_B = I_E - I_C$ ,表明  $I_B$  很小,所以电流增益  $\beta = I_C / I_B$  可达到很大.

HBT 的材料结构为较为成熟的 N-p-n 型,与同质双极晶体管 n-p-n 型比较,用大写字母“N”替换小写“n”,其含义表示发射区为 n 型宽禁带材料.图 3 表示 n-p-n 同质结和 N-p-n 异质结双极晶体管的能带图.图 4 表示其掺杂分布图.

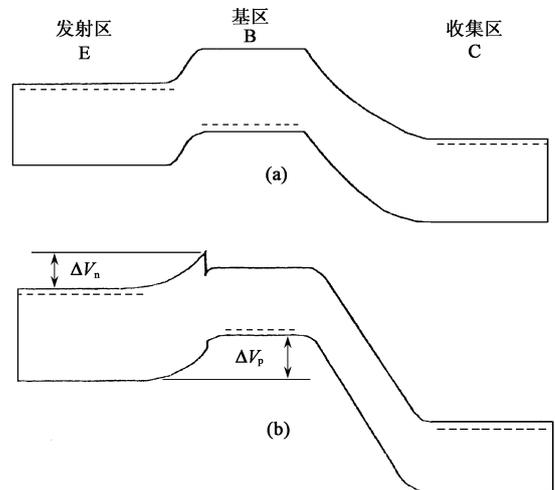


图3

(a) 共发射极 n-p-n 同质结双极晶体管; (b) N-p-n 异质结双极晶体管的能带图

由上图不难看出,同质结双极晶体管和异质结双极晶体管在能带结构上存在着差异,在掺杂分布上也存在着差异.同质结双极晶体管的发射区和基区有相同禁带宽度,即  $\Delta E_g = 0$ .而 HBT 中  $\Delta E_g$  不等于零;在掺杂分布上,前者的发射区为高掺杂,而

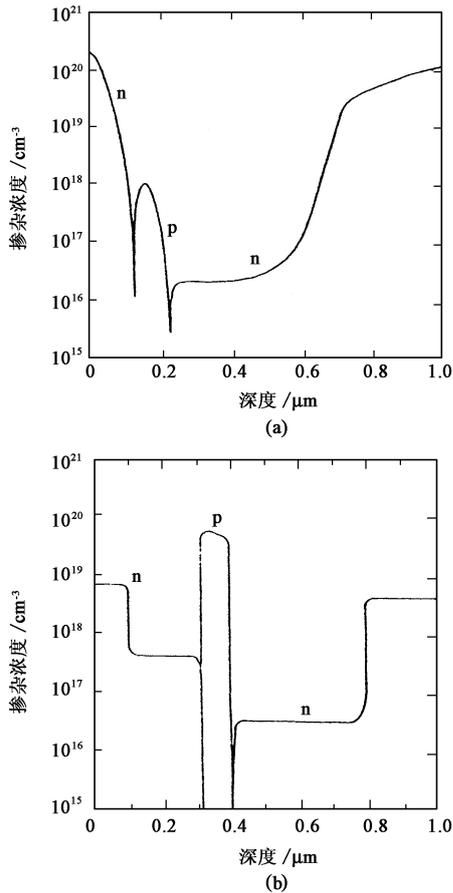


图 4

(a) Si 同质结双极晶体管掺杂分布; (b) AlGaAs/GaAs 异质结双极晶体管的掺杂分布

HBT 的发射区掺杂浓度要低;前者的基区掺杂浓度要低于 HBT 基区的掺杂浓度.它集中反映了由同质结双极晶体管发展到异质结双极晶体管,在材料结构参数的设计上发生的根本变化,其内在因素将作重点分析.

### 3 异质结双极晶体管的特性分析<sup>[4]</sup>

在 同质结双极晶体管中,描述载流子输运过程的模型有扩散模型、热电子发射模型和隧道模型等.对于异质结双极晶体管来讲,仍可采用这些模型,但必须考虑异质结中的能带断续、能带的渐变及各种复合等诸方面对载流子输运的影响,最终得到表征载流子输运过程的  $I-V$  特性.当然,若载流子的输运过程是几种形式的组合,则可采用复合模型.

#### 3.1 渐变异质结及 $I-V$ 特性

以  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  单异质结双极晶体管(N-p-n 型)为例,若 E-B 结发射区  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  一侧,

$x$  缓变,可得到平滑而连续的能带结构,消除了图 3(b) 能带图上的“尖峰”,得到了所谓渐变异质结.这时可采用与同质结相似的扩散模型分析载流子输运过程.

E-B 结在正偏置下,宽禁带 N- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  发射区向窄禁带的 p- $\text{GaAs}$  基区注入电子,p 型  $\text{GaAs}$  基区向 N- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  发射区注入空穴.电子流与空穴流之比称为注入比.如果满足:(1) 异质结空间电荷区以外区是电中性;(2) 载流子浓度可用玻尔兹曼统计来近似;(3) 在小注入情况下(注入少子的浓度比多子少得多);(4) E-B 结空间电荷区及外表面无复合产生,可得到在平衡状态时和正向偏置下发射区和基区的电子、空穴浓度.然后求解稳态电流连续方程,可以得到从发射区向基区注入的电子流  $j_{n1}$  和从基区向发射区注入的空穴流  $j_{p2}$ .

电子和空穴的扩散电流为

$$j_{n1} = \frac{qD_{n1}n_{10}}{L_{n1}} \left| \exp\left[\frac{qV_a}{kT}\right] - 1 \right|, \quad (1)$$

$$j_{p2} = \frac{qD_{p2}p_{20}}{L_{p2}} \left| \exp\left[\frac{qV_a}{kT}\right] - 1 \right|, \quad (2)$$

其中  $L_n, L_p, D_n, D_p$  分别为作为少子的电子和空穴的扩散长度和扩散系数.脚标 1 表示 p- $\text{GaAs}$ ,脚标 2 表示 N- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ .  $V_a$  表示偏置电压,  $n_{10}$  和  $p_{20}$  表示平衡状态下的电子、空穴浓度.总电流可表示为

$$j = j_{n1} + j_{p2} = \left| \frac{qD_{n1}n_{10}}{L_{n1}} + \frac{qD_{p2}p_{20}}{L_{p2}} \right| \left| \exp\left[\frac{qV_a}{kT}\right] - 1 \right|. \quad (3)$$

这就是利用扩散模型给出的渐变异质结 N-p 的伏安特性.

由(1)式和(2)式可以得到发射结的注入比为

$$\frac{j_{n1}}{j_{p2}} = \frac{D_{n1}L_{p2}}{D_{p2}L_{n1}} \cdot \frac{n_{10}}{p_{20}} = \frac{D_{n1}L_{p2}}{D_{p2}L_{n1}} \cdot \frac{n_{1i}^2}{p_{10}} \cdot \frac{n_{20}}{n_{2i}^2}. \quad (4)$$

如果杂质完全电离,  $n_{20}$  和  $p_{10}$  分别等于宽带 N- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  和窄带 P- $\text{GaAs}$  的掺杂浓度  $N_{D2}$  和  $N_{A1}$ .在 同质结中,  $n_{1i} = n_{2i}$ , 则

$$\frac{j_{n1}}{j_{p2}} = \frac{D_n \cdot L_p \cdot N_{D2}}{D_p \cdot L_n \cdot N_{A1}}. \quad (5)$$

由上式可以看出,同质结中注入比主要取决于 n 区和 p 区的掺杂浓度比 ( $N_{D2}/N_{A1}$ ),这就是为什么只能利用掺杂工程设计同质结双极晶体管.

本征载流子浓度与材料的禁带宽度有关,即

$$n_i = \frac{2(2\pi kT)^{\frac{3}{2}}(m_p m_n)^{\frac{3}{4}}}{h^3} \exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right], \quad (6)$$

代入(4)式,可得到

$$\frac{j_{nl}}{j_{p2}} = \frac{D_{nl} L_{p2} (m_{pl} m_{nl})^{\frac{3}{2}}}{D_{p2} L_{nl} (m_{p2} m_{n2})^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{N_{D2}}{N_{A1}} \exp[(E_{g2} - E_{g1})/kT], \quad (7)$$

即注入比

$$\frac{j_{nl}}{j_{p2}} \propto \frac{N_{D2}}{N_{A1}} \exp(\Delta E_g/kT). \quad (8)$$

显然,异质结双极晶体管的注入比与发射区和基区的禁带宽度差  $\Delta E_g$  呈指数关系,这样人们就可以从能带结构来设计异质结双极晶体管.由于  $\Delta E_g$  对注入比的影响远大于发射区与基区的掺杂浓度比对它的影响,这样就可降低发射区掺杂浓度来减小发射结电容.同时,提高基区浓度,降低基区电阻,来改善器件的频率、噪声等性能.不难看出,异质结晶体管材料结构的设计是一次从掺杂工程设计到能带工程设计的变革.下面举一个简单的例子来说明在异质结构中  $\Delta E_g$  对注入比的影响:

(7)式中右边第一项系数可近似取为1,注入比

$$\frac{j_{nl}}{j_{p2}} \approx \frac{N_D}{N_A} \exp(\Delta E_g/kT).$$

对于同质结,  $\Delta E_g = 0$ ,  $\frac{j_{nl}}{j_{p2}} \approx \frac{N_D}{N_A}$ ; 对于异质结 N-

$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{p-GaAs}$ ,  $\Delta E_g = 0.403\text{eV}$ ,  $\frac{j_{nl}}{j_{p2}} \approx$

$$\frac{N_D}{N_A} \exp(\Delta E_g/kT) = \frac{N_D}{N_A} \exp 15.59 = \frac{N_D}{N_A} \cdot 5.9 \times 10^6.$$

由上述简单的计算,可以看出异质结构中带隙差对提高注入比起决定性作用.  $\Delta E_g$  对注入比的大幅度提高给我们创造了重新调整  $N_D, N_A$  的条件.当然要保证有足够大的注入比,减少体内和表面的复合也是很重要的.

### 3.2 突变异质结及 I-V 特性

#### 3.2.1 扩散模型

上面分析了利用扩散模型得到的渐变异质结 I-V 特性,是指发射区和基区导带之间没有所谓“尖峰”的存在.对于一个理想的突变异质结来讲,能带图上导带有一个势垒“尖峰”(见图5).

安德森(Anderson)<sup>[5]</sup>在扩散理论的基础上分析了存在“尖峰”时的载流子输运情况.由于在异质结界面,导带和价带的断续  $\Delta E_c$  和  $\Delta E_v$  的存在,电子和空穴两种载流子越过异质结时应克服不同的势垒,若只考虑电子流在输运过程中起主要作用,那么在平衡状态时,宽禁带 N- AlGaAs 发射区中,只有那

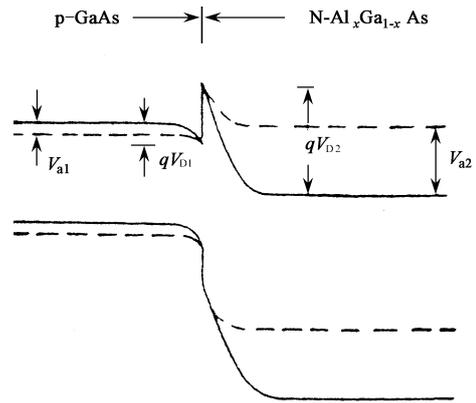


图5 加正向偏压后的理想突变异质结能带图

些能量大于  $qV_{D2}$  的电子才能在窄带 GaAs 材料的边界上聚集,并以扩散方式向窄带 GaAs 区运动.若外加偏压为  $V_a$  时,能带图为图5中的虚线所示;  $V_a$  分别加在两种材料上,即  $V_a = V_{a1} + V_{a2}$ ,这时 N区势垒  $V_{D2} - V_{a2}$ , p区势垒为  $V_{D1} - V_{a1}$ .安德森认为异质结界面对载流子有一定反射,而引入一个透射系数  $x$ ,且  $n_{20} = N_{D2}$ ,最终得到 I-V 特性为

$$J = qx \left| \frac{D_n D_{n2}}{L_n} \right| \exp \left| - \frac{qV_{D2}}{kT} \right| \cdot \left| \exp \left| \frac{qV_{a2}}{kT} \right| - \exp \left| - \frac{qV_{a1}}{kT} \right| \right|, \quad (9)$$

若正向偏置时忽略  $\exp \left| - \frac{qV_{a1}}{kT} \right|$ , 则

$$J \propto \exp \frac{qV_{a2}}{kT},$$

即总电流与外加偏压呈指数变化关系.

#### 3.2.2 热电子发射模型<sup>[6]</sup>

安德森的异质结扩散模型认为,能量大于  $qV_{D2}$  的电子是以扩散方式向窄带区运动,而热电子发射模型则认为这些电子是以热电子发射方式,以很高的速度 ( $v = 10^7 - 10^8 \text{cm/s}$ ) 向前运动,这样大大缩短了基区的渡越时间.

用与安德森扩散模型中类似的处理方法,最终得到

$$J = qxN_{D2} \left| \frac{kT}{2\pi m} \right|^{\frac{1}{2}} \exp \left| - \frac{qV_{D2}}{kT} \right| \cdot \left| \exp \left| \frac{qV_{a2}}{kT} \right| - \exp \left| - \frac{qV_{a1}}{kT} \right| \right|. \quad (10)$$

比较(9)式与(10)式的差别仅在于系数的差异.

#### 3.2.3 隧道模型

隧道模型认为电子在没有到达越过“尖峰”的能

量时,可以以隧道方式穿过势垒进入基区,隧道电流是入射电子流与隧穿几率的乘积,这里不作详细叙述.

在运用上述三种基本模型时,实际上还应考虑其他因素的影响,如空间电荷区的复合电流、表面复合电流和基区复合电流等(见图6和图7).

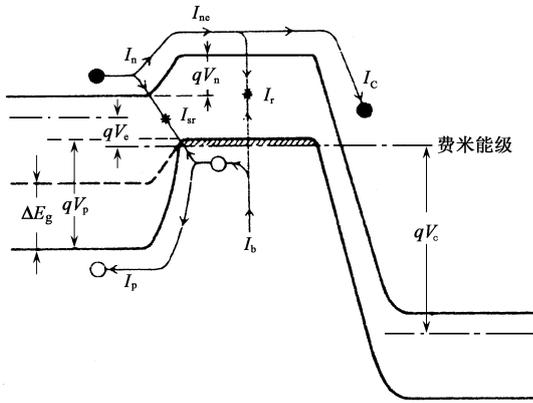


图6 N-p-n型 HBT 能带图及电流成分示意图

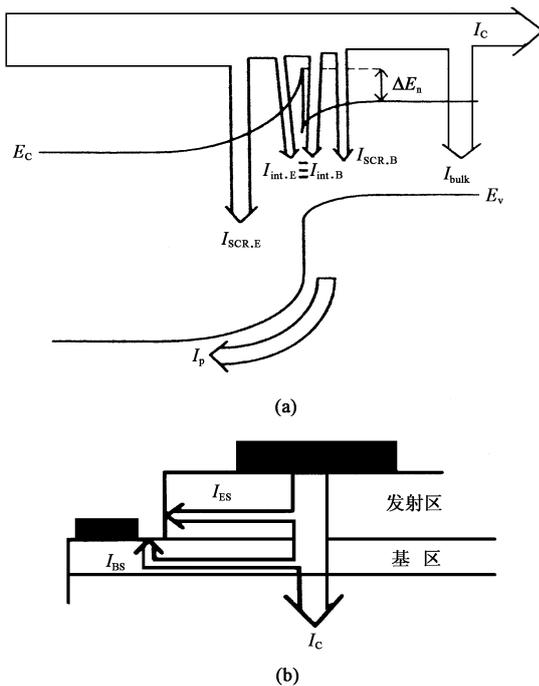


图7

(a) 表明空间电荷区复合电流( $I_{SCR,E}$ 和 $I_{SCR,B}$ )界面复合电流( $I_{int,E}$ 和 $I_{int,B}$ )、基区体复合电流( $I_{bulk}$ )及反向空穴电流( $I_p$ )的能带图;(b) 发射区外表面复合电流( $I_{ES}$ )和基区外表面复合电流( $I_{BS}$ )

异质结双极晶体管的发射极电流  $I_E$  可由 3 部分组成:

(1) 电子从发射区越过势垒到达基区的电流

$I_{nE}$ ;

(2) 注入的电子和注入的空穴在空间电荷区的复合电流  $I_{sr}$ ;

(3) 基区空穴越过势垒进入发射区的空穴电流  $I_p$ .

$$\text{即 } I_E = I_{nE} + I_{sr} + I_p.$$

基区电流  $I_B$  包括:

(1) 基区空穴进入发射区的空穴流  $I_p$ ;

(2) 基区的体复合电流  $I_{vr}$ ;

(3) 空间电荷区的空间复合电流  $I_{sr}$ ;

(4) 基区外表面的复合电流  $I_{fr}$  (实际器件所应考虑);

(5) 基极欧姆接触界面复合电流  $I_{tr}$  (实际器件所应考虑).

$$\text{即 } I_B = I_p + I_{vr} + I_{sr} + I_{fr} + I_{tr} = I_p + I_{sr} + I_{br},$$

其中  $I_{br} = I_{vr} + I_{fr} + I_{tr}$ ,  $I_{br}$  统称为基区复合电流.

集电极电流  $I_C$  为

$$I_C = I_E - I_B = I_{nE} - I_{br},$$

即集电极电流等于注入到基区的电流减去基区复合电流. ( $I_{nE} - I_{br}$ )/ $I_{nE}$ , 即  $I_C/I_{nE}$  称为基区输运因子.

共发射极电流增益  $\beta$  为

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_{nE} - I_{br}}{I_p + I_{sr} + I_{br}}. \quad (11)$$

因此,要想提高增益,降低基区复合电流  $I_{br}$  空间电荷区的复合电流  $I_{sr}$  及表面复合电流<sup>[7,8]</sup>是非常重要的.表面复合电流往往在有较大的发射极面积与周长比时可以忽略.这时共发射极电流增益的最大值  $\beta_{max}$  为

$$\beta_{max} = I_{nE}/I_p. \quad (12)$$

显然,最大增益  $\beta_{max}$  实际上就是异质结的注入比 ( $I_{nE}/I_p$ ). 这说明了增益和注入比有关.前面谈到的要提高增益,就要降低基区复合电流 ( $I_{br}, I_{sr}$ ), 这实际上也说明了增益与基区的输运因子有关.输运因子  $\alpha_B = I_{nE}/I_{nE}$ , 基区复合损失减小才可使到达集电区的电流增大,增益提高.概括来讲,共发射极电流增益的提高,主要依赖于注入比的提高和减少复合.

#### 4 异质结双极晶体管的材料结构设计考虑及制作工艺要点概述

异质结双极晶体管的材料结构基础是异质结,也就是说,它是利用不同禁带宽度的材料组合成发射结和集电结.为减少在界面处产生的位错、缺陷而

导致的载流子复合,不同材料的晶格常数应尽量接近.此外,材料生长过程是一个高温过程,异质结材料的热膨胀系数的一致性也是重要的.

HBT发射结和集电结(重要的是发射结)材料的组合原则,还必须考虑不同材料的禁带宽度之差  $\Delta E_g$ ,导带和价带的断续量  $\Delta E_c$  和  $\Delta E_v$ ,材料迁移率的大小,表面复合速度和热导率等等.例如 InGaAs ( $E_g = 0.75\text{eV}$ ) 比 GaAs ( $E_g = 1.42\text{eV}$ ) 有较小的禁带能量,较高的迁移率,InGaAs 有较小的表面复合速度,约  $10^3\text{cm/s}$ ,而 GaAs 为  $10^6\text{cm/s}$ ,这样,InGaAs 为基区的 HBT 的增益比 GaAs 要高.InP 基材料(包括 InP,InGaAs 和 InAlAs)有比 GaAs 高 50% 的热导率.因此,在相同的功耗下,InP 基 HBT 散热好.下面列出一些采用较多的 HBT 发射区、基区和集电区材料组合结构(见表 1).

表 1 HBT 发射结和集电结材料组合结构

发射区(n型)	基区(p型)	集电区(n型)	衬底
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	GaAs	GaAs	GaAs
$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$	GaAs	GaAs <sup>[9]</sup>	GaAs
$\text{Al}_x\text{Ga}_{0.52-x}\text{In}_{0.48}\text{P}$	GaAs	GaAs <sup>[10]</sup>	GaAs
InP	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$	InP	InP
$\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$	InP	InP
$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{As}_{1-y}$	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$	InP	InP
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	GaN	GaN <sup>[11]</sup>	蓝宝石
GaN	SiC	SiC <sup>[12]</sup>	硅
Si	$\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$	Si	硅

在上面列举的材料组合中,很多发射区采用了三元系或四元系材料,其晶格常数是通过调整合金组分来控制,同时其禁带宽度也发生了变化.

HBT 的低开启电压和小功耗要求发射结有小的内建电势  $V_{bi}$ ,InP 基 HBT 用窄禁带的 InGaAs 作基区可获得比 GaAs 基 HBT(GaAs 作基区)更低的开启电压和小功耗<sup>[13]</sup>.

但是对于一个理想突变的结构来讲<sup>[14]</sup>,能带图上存在“尖峰和(能)谷”,窄带区的能谷(势阱)将会收集发射区注入来的电子,对电子的进一步注入有抑制作用.其典型值为几个毫电子伏,有时常常忽略.导带边“尖峰”的存在,说明了与渐变异质结相比,电子从发射区向基区注入要克服一个附加势垒,减小了注入比.上面已经谈到渐变异质结,我们有  $q(V_p - V_n) = \Delta E_g$ ,

$$\frac{I_{nE}}{I_p} \propto \exp(\Delta E_g/kT).$$

对于突变异质结来讲,  $q(V_p - V_n) \approx \Delta E_v$ , 所以

$$\frac{I_{nE}}{I_p} \propto \exp(\Delta E_v/kT). \quad (13)$$

这就是说,理想的突变异质结,电流增益与价带的断续量  $\Delta E_v$  呈指数变化关系.在设计突变异质结双极晶体管时,要获得高增益,发射区与基区的材料组合要有大的  $\Delta E_v$ .另外,  $\Delta E_v$  大,器件就具有优良的高温特性.例如上面列出的材料组合中  $\text{Al}_x\text{Ga}_{0.52-x}\text{In}_{0.48}\text{P/GaAs}$  是近几年研究较多的高温 HBT 之一.  $\text{Al}_x\text{Ga}_{0.52-x}\text{In}_{0.48}\text{P}$  在与 GaAs 晶格匹配的 III-V 族化合物中,具有最大的价带不连续量  $\Delta E_v$  ( $0.27-0.63\text{eV}$ ).宽禁带 GaN/SiC, AlGaN/GaN HBT 属这一类器件.

#### 4.1 发射区 - 基区异质结的设计考虑

渐变发射结组分渐变距离要适当<sup>[15]</sup>.渐变距离太短,导带的尖峰不能消除;渐变距离太长,在正偏压下导带上会产生一个对电子起陷阱作用的场,降低了注入效率.组分渐变若按抛物线规律,势垒尖峰消失得更为平滑.以  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As/GaAs}$  为例,若  $N_D = 2 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ,渐变距离为  $300\text{\AA}$  较为合适.

发射结附近实际存在着两个界面,一个是异质界面,另一个是 p-n 结界面,理想情况是二者重合.对于突变异质结容易确定交界面范围,渐变结则不易确定.在材料生长过程中(或在其他高温过程中),若使用扩散系数较大的掺杂剂,如 p 型掺杂剂 Be 和 Zn,则 p-n 结界面容易位移到发射区之中<sup>[16]</sup>,这相当于发射区形成了一个同质 p-n 结,降低了注入比.为避免这种情况,可在异质结界面窄带区一侧或两侧加入一非掺杂层.也可选择扩散系数更小的 p 型掺杂剂,如碳,以防止在材料生长过程中 p 型掺杂剂拖尾到 N 型宽带材料区.

HBT 频率特性的提高,还依赖于减少发射结面积,减少发射区的掺杂浓度.发射区掺杂浓度的减小虽然使发射结电容降低了,但是增加了发射区电阻,因此,要与发射区的厚度等结合起来考虑.  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As/GaAs}$  SHBT,发射区  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  典型的掺杂浓度是  $(2-5) \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ,厚度为  $1000\text{\AA}$  左右.

综合上述,对于发射结  $\Delta E_c$  大的 HBT,要设法实现理想的组分渐变,保证 HBT 的电流增益.对于突变结 HBT,选择大的  $\Delta E_v$  的发射结材料组合.总之,利用能带工程设计 HBT,可以更合理地调整掺杂浓度.

#### 4.2 基区设计考虑

HBT 基区层的设计,尤其是工作在微波频率,它

起着关键作用,因为它强烈地影响着  $f_T$  和  $f_M$ . 这里我们主要分析载流子在基区的渡越时间和基区体电阻对 HBT 性能的影响.

我们知道  $f_T$  与少数在基区的渡越时间  $\tau_b$  有关,即

$$\tau_b = W_b^2 / 2 D_b, \quad (14)$$

式中扩散系数

$$D_b = \mu_e kT / q.$$

不难看出,减小  $\tau_b$ , 可提高  $f_T$ . 此外,选择迁移率高的材料作基区. 当器件发射区-基区外表面被钝化时(降低表面复合),影响基区电流的主要是发射结空间电荷区的复合电流<sup>[17]</sup>和基区体复合电流. 因此减少基区宽度,从而减少渡越基区时间  $\tau_b$ , 合适的基区掺杂提高少数寿命以及减小各种复合是对基区材料参数(几何尺寸和掺杂浓度)设计必须考虑的重要因素.

HBT 应用于开关电路,开关时间可表示为<sup>[19]</sup>

$$\tau_s = \frac{5}{2} R_b C_c + \frac{R_b}{R_L} + (3 C_c + C_L) R_L. \quad (15)$$

这里  $R_b$  为基区电阻,  $C_c$  为集电极电容,  $R_L$  和  $C_L$  为负载电阻和电容. 依上式,降低  $R_b$  可以缩短开关时间.

除了上述谈到的合理的基区宽度及掺杂浓度设计之外,基区还可以采用带隙渐变基区结构. 调整二元系或多元系基区组分,使禁带宽度发生变化,产生的附加电场减小了少数在基区的渡越时间,少数在基区的渡越时间也可表示为

$$\tau_b = \frac{q W_b^2}{\mu (E_{g1} - E_{g2})}, \quad (16)$$

式中  $E_{g1} - E_{g2}$  为基区的带隙变化,产生的附加电场

$$E = \frac{E_{g1} - E_{g2}}{q W_b}.$$

在双异质结双极晶体管中,若集电区采用比基区大的带隙材料,这样,在 CB 结处空穴势垒增加,基区的掺杂浓度可进一步提高.

### 4.3 集电区的设计考虑

集电区的厚度与载流子在集电区的渡越时间  $\tau_c$  有关,厚度增加,渡越时间加长,同样  $f_T$  将下降. 集电区的渡越时间由下式表示:

$$\tau_c = W_c / 2 v_s + C_c (R_E + R_C), \quad (17)$$

式中  $W_c$  为集电区厚度,  $v_s$  为集电区中的电子饱和速度,  $C_c$  为集电结电容,  $R_E$ ,  $R_C$  为发射极和集电极电阻.

要减小集电结电容,有效的办法是减少基区欧姆接触区面积和缩短发射区到基极接触的间距. 因此,在制作工艺中往往采用自对准工艺形成基区的欧姆接触区.

为保证一定的击穿电压和减小  $C_c$ , 收集区采用较低掺杂浓度. 为了使单异质结双极晶体管 (SHBT) 源漏电极能够互换,集电区也可采用宽带隙材料,如将 AlGaAs/GaAs/GaAs 结构改为 AlGaAs/GaAs/AlGaAs 结构. 发射区和集电区保持相同的掺杂浓度,这就是双异质结双极晶体管 (DHBT).

在单突变结 SHBT 中,因为导带出现断续  $\Delta E_C$ . 当 B-C 也是突变结构时,注入到基区的电子将在两个  $\Delta E_C$  组成的势阱中多次碰撞而可能被复合掉. 因此, B-C 结要做成分组缓变. 也有的在基区和集电区加入一层带隙介于基区和集电区之间的材料,使带隙宽度变化呈台阶梯度. 例如,在 InP/InGaAs/InP HBT 中 B-C 结中加入 GaInAsP ( $E_g = 0.94\text{eV}$ ), 变成 InP(E)/InGaAs(B,  $E_g = 0.78\text{eV}$ )/GaInAsP( $\Delta E_g = 0.94\text{eV}$ )/InP(C,  $E_g = 1.35\text{eV}$ ) 结构.

### 4.4 发射区、基区和收集区掺杂浓度的选择

HBT 的 E, B, C 区掺杂浓度与同质结双极晶体管相比,尤其是 E, B 区有较大差异. 为了降低  $C_{EB}$  和  $R_b$ , 一般来讲, NpN 型 HBT 的发射区掺杂浓度为  $10^{17}\text{cm}^{-3}$  量级,基区掺杂浓度在  $10^{18} - 10^{19}\text{cm}^{-3}$ , 为提高 B, C 结击穿电压,收集区的浓度为  $10^{16}\text{cm}^{-3}$  量级. EC 的欧姆接触区浓度要大于  $10^{18}\text{cm}^{-3}$ . 另外, E, C 接触区若采用与 E 或禁带宽度不同的材料,如 N-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 作发射区,其接触区 (cap layer) 要采用 n<sup>+</sup>GaAs, 而且从 N-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 到 n<sup>+</sup>GaAs 的生长也最好采用组分缓变,这样有利于载流子的注入. 宽禁带材料的 HBT (例如 AlGaInGaN 等), 由于其良好的高温特性,国外已开始研制. HBT 的材料结构设计举例见表 2.

表 2 Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As/GaAs HBT 材料结构

	材料	厚度/nm	浓度/cm <sup>-3</sup>
cap	n <sup>+</sup> -GaAs	100-150	$2 \times 10^{18}$
	n-Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	30-50	$x=0-0.3$ 时为 $(3-5) \times 10^{17}$
E	n-Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As	100-150	$x=0.3$ 时为 $(3-5) \times 10^{17}$
	n-Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	30-50	$x=0.3-0$ 时为 $(3-5) \times 10^{17}$
B	p-GaAs	80-100	$2 \times 10^{19}$
C	n-GaAs	400-500	$(5-10) \times 10^{16}$
	n <sup>+</sup> -GaAs	400-500	$2 \times 10^{18}$

### 4.5 异质结双极晶体管的制作工艺要点概述

图 8 给出台面结构的 HBT 管芯剖面示意图.

物理

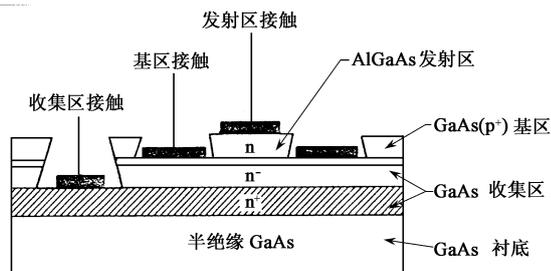


图8 采用自对准技术制作的 HBT 剖面图

以 AlGaAs/GaAs 单异质结 HBT 为例,发射区和集电区的接触区均为高掺杂的  $n^+$  型 GaAs,其欧姆接触金属采用 Au - Ge - Ni,基区为  $P^+$  - GaAs,选用 Au - Zn 作欧姆接触.如果不考虑小尺寸的要求,制作工艺上的难点集中在以下几方面:(1)对发射区台面的腐蚀要求有准确的精度控制.因为基区的厚度是有限的,过腐蚀会造成欧姆接触金属做到收集区上.若剩余基区厚度太薄,在金属化的过程中有可能与集电区连通,造成 B,C 短路.因此,发射区台面腐蚀终点要准确控制.发射区是 AlGaAs,Al 的含量  $x < 0.3$ (高 Al 会产生复合中心),通常采用的  $H_3PO_4$  或  $NH_4OH$  系列腐蚀液对 GaAs 腐蚀的选择性并不强.而 AlGaInP/GaAs HBT 则可采取选择比大的腐蚀液.如,1 HCl: 1  $H_2O$  对 AlGaInP 发射区台面可选择性腐蚀,对 GaAs 基区是不腐蚀的.总之,腐蚀的终点控制是非常重要的.(2)为了减少发射区、基区曝露外表面产生的复合电流,应对其作钝化保护.(3)缩短发射区到基区电极之间的距离也是必要的(减小复合和减小基区串联电阻),在工艺上往往采用基区自

对准工艺.钝化层可采用 SiON,用 PECVD 淀积.基区自对准,要求发射区台面形成倒台结构,基区的厚度也要控制,否则将造成 E,B 结短路.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Shockley W. US patent ,1951 ,2569347
- [ 2 ] Kroemer H. Proc . IRE ,1957 ,45 :1535
- [ 3 ] Dumke W P , Woodall J M , Rideout V L. Solid State Electronics , 1972 ,15 :1339
- [ 4 ] 虞丽生.半导体异质结物理.北京:科学出版社,79—123[ Yu L S. Semiconductor Heterojunctions Physics . Beijing : Science Press , 79—123( in Chinese ) ]
- [ 5 ] Anderson R J. Solid State Electronics ,1962 ,5 :34
- [ 6 ] Perlman S S , Feucht D L. Semiconductor Heterojunctions . Oxford : Pergamon Press ,1964 .7 ,911
- [ 7 ] Henry C H , Logan R A , Merrit F R . J . Appl Phys . ,1978 ,49 :3530
- [ 8 ] Hao Hsiung Lin , Lee S C . Appl . Phys . Lett . ,1985 ,47 :839
- [ 9 ] William Liu *et al* . IEEE Electron Device Lett . ,1992 ,13 :510
- [ 10 ] Yow H K , Houston P A . IEEE Transactions on Electron Devices , 1996 ,43 :2
- [ 11 ] Fan Ren *et al* . MJF NSR ,1998 ,3 : Article 41
- [ 12 ] Pankove J I , Leksono M , Chang S S *et al* . MJF NSR ,1996 ,1 : Article 39
- [ 13 ] Pelouard J L , Littlejohn M A . SPIE InP and Related Material for Advanced and Optical Devices ,1989 ,1144 :582
- [ 14 ] Hayes I R *et al* . Appl . Phys . Lett . ,1983 ,43 :949
- [ 15 ] Maik R J , Capasso F , Stall R A *et al* . Appl . Phys . Lett . ,1985 ,46 :600
- [ 16 ] Liu W , Costa D , Harris J S . IEEE Trans . Electron Dev . ,1992 ,39 :2422
- [ 17 ] Nobuyuk , Hayama *et al* . IEEE Electron Device Lett . ,1987 ,EDL-8 :246

## 2001 年第 7 期《物理》内容预告

### 研究快讯

铋系高温超导直流电缆的研制(林玉宝等) .

### 评 述

高温超导薄膜无源微波器件的应用(李林);  
微米/纳米尺度热科学与工程学中的若干重要问题  
及进展(刘静) .

### 知识和进展

结构生物学的新进展(张景强);  
半导体材料的华丽家族——氮化镓基材料简介(孙殿照);  
光与新型氧化物材料的相互作用及其应用(郝建华);

核爆模拟——惯性约束聚变在核武器上的应用(曾先才等) .

### 物理学和高新技术

重离子束在医学治疗中的应用(卫增泉等) .

### 实验技术

纳米压痕技术在材料科学中的应用(谢存毅) .

### 讲 座

半导体量子器件物理讲座 第四讲 共振隧穿器件  
及其电路应用(李国华) .

### 物理学史和物理学家

$\pi$  介子理论的提出——记日本物理学家汤川秀树  
(姚立澄) .