

新结构复合收集区 InGaP/GaAs 异质结双极晶体管结构设计及特性^{*}

石瑞英¹ 刘训春² 袁志鹏² 王润梅² 孙海锋²

(1 四川大学物理系, 成都 610064)

(2 中国科学院微电子中心, 北京 100029)

摘要: 利用电子运动速度过冲现象, 设计出了一种新结构复合收集区 InGaP/GaAs 异质结双极晶体管。这种结构不仅提高了器件的截止频率, 而且降低了影响器件直流性能的补偿电压。所制备器件的截止频率达到 77GHz, 直流电流增益高达 100, 补偿电压低至 70mV。同时, 把所制备器件的微波和直流特性与已发表的文献进行了比较, 充分显示了这种结构的优越性。

关键词: 电子运动速度过冲; 复合收集区; 异质结双极晶体管; 直流和射频特性

EEACC: 1350F; 0260; 2560B; 2560J

中图分类号: TN 303

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)03-0316-05

1 引言

由于 InGaP/GaAs 异质结双极型晶体管(HBT)优越的直流和微波特性^[1,2]、噪声特性^[3]和高可靠性^[4]及相对成熟的制造工艺^[5], 使得它在微波及毫米波领域有着广泛的应用前景^[6]。目前, 研究最多和市场应用最广泛的仍然是 GaAs HBT 及其相关电路。

微波及毫米波技术的飞速发展对器件的频率特性提出了更高的要求。由于 GaAs 材料的电子迁移率和电子运动饱和速度均比 InP 的低, 这就使得 GaAs HBT 的截止频率很难达到 InP HBT 的水平。但在选定了器件所用的材料后, 可以从器件结构设计上去提高其频率特性。而与集电区材料及结构相关的集电结耗尽区电子渡越时间常数 $\tau_{se} = X_{del}/2V_{sat}$ ^[7] 在整个渡越时间常数中所占的比重很大, 对频率特性的影响也很大, 因此, 集电区结构的设计就显得尤为重要。虽然减少集电区的厚度是减少集电结耗尽区电子渡越时间常数、提高器件频率特性的

有效方法, 但会使器件的击穿电压降低。在许多微波及毫米波电路(如光调制器驱动电路)中, 不仅要求器件有很高的截止频率, 而且也要求器件有较高的击穿电压。提高截止频率和提高击穿电压的矛盾限制了器件的应用范围, 能否解决这个矛盾是决定器件能否在更高频率应用的关键所在。

针对上述问题, 本文提出了一种新的 InGaP/GaAs 复合收集区 HBT 结构。这种结构充分利用电子速度过冲效应对集电结耗尽区电子渡越时间常数的减小及器件截止频率的提高, 使得在集电区厚度不很薄的情况下, 器件达到相当高的截止频率。

2 器件结构设计

在 GaAs 中, Γ 能谷与 L 能谷相差 0.31eV。在强电场作用下, Γ 能谷中的电子跃迁到 L 能谷, 使电子运动的速度降低^[8]。电子到达 L 能谷后, 将以 $8 \times 10^6 \text{ cm/s}$ 的饱和速度运动。可是, 瞬变过程伴随着电子动量和能量的改变, 在强电场下, 由于动量弛豫时间小于能量弛豫时间, 完成瞬变所需时间为能量

* 国家重点基础研究发展计划资助项目(编号: G200006830403)

石瑞英 女, 副教授, 目前主要从事化合物半导体器件和微波单片集成电路等方面的研究。

刘训春 男, 教授, 博士生导师, 研究兴趣是半导体器件、电路和微细加工。

2003-03-02 收到, 2003-05-19 定稿

© 2004 中国电子学会

弛豫时间量级. 在 GaAs 中电子在跃迁到 L 能谷之前存在 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ s 的能量弛豫时间, 在能量弛豫时间内, 电子的速度存在过冲现象, 过冲速度高达 5×10^7 cm/s, 电子要以这个速度在 Γ 能谷中运动一段距离. 能量弛豫时间后, 电子跃迁到 L 能谷, 以 8×10^6 cm/s 的饱和速度运动. 集电区越薄, 电子以过冲速度运动的距离在整个耗尽区中所占的比例越大. 因此, 对时间常数的减少也就越多, 从而对器件频率特性的提高也就越有利. 如果在整个集电结耗尽区内电子均以较高的速度运动, 而不是以 8×10^6 cm/s 的饱和速度运动, τ_{sc} 将大大降低, 器件的频率特性将显著提高. 可是, 电子在 GaAs 材料中以过冲速度运动的距离有限, 要想使电子在整个集电结耗尽区内均以较高的速度运动, 集电区必须做得很薄, 这将使器件的击穿电压大大降低, 以至器件在许多领域无法应用. 为了解决上述矛盾, 本文设计了一种新结构复合集电区 InGaP/GaAs 异质结双极晶体管, 在集电区的厚度不必很薄的情况下, 也能使电子停留在 Γ 能谷中, 从而获得较高的电子运动速度, 使器件的频率特性得以提高, 具体结构如表 1 所示.

表 1 复合收集区 InGaP/GaAs HBT 结构

Table 1 Compound collector InGaP/GaAs HBT structure

层	材料	掺杂类型
帽层	In _{0.5} Ga _{0.5} As	N ⁺⁺
	0.5	
	In _y Ga _{1-y} As	N ⁺⁺
发射区	y	
基区	0	
GaAs		N ⁺
In _x Ga _{1-x} P		N
GaAs		P ⁺⁺
收集区	6 GaAs	N ⁺
5 GaAs		N ⁻
4 GaAs		P ⁺
3 GaAs		N ⁺
2 GaAs		N ⁻
1 GaAs		P ⁺
亚收集区	GaAs	N ⁺
衬底	半绝缘 GaAs	

从表 1 可以看出, 这种结构与常规结构不同之处在于收集区的设计, 它所采用的是复合收集区. 在亚收集区上, 复合收集区依次包括重掺杂的 P 型 GaAs 1, 轻掺杂的 N 型 GaAs 2, 重掺杂的 N 型 GaAs 3. 其中 1 层与 3 层厚度相同且比 2 层薄很多, 并且 1, 3 层为偶极掺杂. 4, 5, 6 层分别为 1, 2, 3 层

的重复.

由于收集区的 N⁺ 层 6 很薄, 所以它是完全耗尽的, 而收集区的 N⁻ 层 2、N⁻ 层 5 也要完全或部分耗尽, 在收集区的 N⁺ 层 6 和 N⁻ 层 5 中电场方向由收集区指向基区, 如图 1(a), (c) 所示. 这个电场对电子加速, 电子从这个电场中获得能量, 速度增加. 当电子的速度达到过冲速度时, 它将以过冲速度运

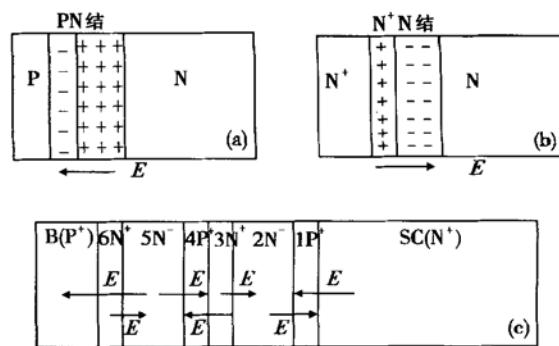


图 1 (a) PN 结电场的方向; (b) N⁺ N 接触电场的方向; (c) 各结电场方向

Fig. 1 (a) Electric field direction of PN junction;
(b) Electric field direction of N⁺ N junction; (c)
Electric field direction of each junction

动一段距离, 然后进入 L 能谷. 设法减弱收集区耗尽层的电场强度, 就可以使电子以过冲速度运动的距离增加, 停留在 Γ 能谷中的时间延长, 使器件的截止频率提高, 收集区 N⁺ 层 6 与 N⁻ 层 5 的设计就可以达到这个目的. 由于收集区的 N⁺ 层 6 中电子的浓度高而收集区的 N⁻ 层 5 中的电子浓度低, 因此它们之间形成一阻滞场, 这个电场的方向与图 1(a) 中 BC 结电场的方向相反, 如图 1(b), (c) 所示, 它可以起到减弱 BC 结电场, 增加电子以过冲速度运动距离的作用. 电子在 N⁺ 层 6、N⁻ 层 5 中运动获得足以到达 L 能谷的能量并经过能量弛豫时间后就要跃迁到 L 能谷, 这时它的运动的速度就要降低, 电子迁移率减少, 这对提高器件的频率特性极为不利. 在电子到达 L 能谷之前, 设法使电子运动的速度降低, 就可以使电子停留在 Γ 能谷, 从而使电子有较高的电子迁移率. P⁺ 层 4 的设计就可以起到这个作用. N⁻ 层 5 与 P⁺ 层 4 之间形成一个电场, 其方向由 N⁻ 层 5 指向 P⁺ 层 4, 如图 1(a), (c) 所示, 它可以起到阻碍电子运动, 降低其运动速度的作用. 电子经过 P⁺ 层 4 以后, 速度降低, 这时需要一个加速场区提高电子运动的速度, N⁺ 层 3 的设计可以达到

这个目的。电子进入 N⁺ 层 3、N⁻ 层 2 和 P⁺ 层 1 后，重复 N⁺ 层 6、N⁻ 层 5 和 P⁺ 层 4 的运动过程。当电子进入亚收集区后，P⁺ 层 1 与亚收集区之间的电场加速电子的运动。之所以设计收集区的 N⁺ 层 3、N⁻ 层 2 和 P⁺ 层 1，是因为为了获得较高的电子运动的速度，每一层的厚度不能太厚，如果只有 N⁺ 层 6、N⁻ 层 5 和 P⁺ 层 4 的话，集电区的厚度不可能太厚，这样器件的击穿电压将不能达到要求。在收集区设计 N⁺ 层 3、N⁻ 层 2、P⁺ 层 1 后，既可以使集电区较厚以满足击穿电压的需要，又可以使电子在整个集电区均以较高的速度运动，以获得较高的截止频率。根据击穿电压的需要可以设计多次重复的 N⁺ 层 6、N⁻ 层 5、P⁺ 层 4 集电区结构。

从上面的分析可以看出，这种结构的基本设计思想是：当电子运动速度较低时，设计一个电场让其加速运动，而当电子运动速度较高时，则设计一个电场让其减速运动。图 1(c) 中，电场的方向由右指向左的为电子的加速场，而由左指向右的则为电子的减速场。设计加速与减速场的目的就是为了既让电子以较高的速度运动，又不能让其获得足以由 Γ 能谷跃迁到 L 能谷中的能量。也就是说，要让电子停留在 Γ 能谷中，而不是像其它器件一样电子大部分时间在 L 能谷中运动。

3 器件制备及特性

制备器件所用外延材料是从台湾元砷光电科技股份有限公司购买的，其外延层结构如表 1 所示。外延层是用 MOCVD 法在 GaAs(100) 衬底上生长的，Si 和 C 分别用于 n 型和 p 型掺杂。各层的厚度及掺杂浓度如下：亚收集区是掺杂浓度为 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，厚度为 500nm 的 n 型 GaAs；复合收集区依次包括掺杂浓度为 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、厚度为 10nm 的 P⁺ 型 GaAs 1，掺杂浓度为 $1.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ，厚度为 130nm 的 N⁻ 型 GaAs 2，掺杂浓度为 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，厚度为 10nm 的 N⁺ 型 GaAs 3，以及分别与 1、2、3 层重复的 4、5、6 层；基区是掺杂浓度为 $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ，厚度为 60nm 的 p 型 GaAs；发射区是掺杂浓度为 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，厚度为 60nm 的 n 型 InGaP 层。帽层包括 50nm 厚、掺杂浓度为 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 GaAs 层；50nm 厚，掺杂浓度为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的 In_xGa_{1-x}As(x 由 0 变到 0.5) 层和 50nm 厚、掺杂浓度为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的 In_{0.5}Ga_{0.5}As 层。

器件的主要制造过程：蒸发 TiPtAu 为发射极金属，然后以发射极金属为掩模，用柠檬酸加过氧化氢腐蚀帽层；再用 HCl + H₃PO₄ 腐蚀 InGaP 层，腐蚀出发射极台面，露出基区；然后蒸发基区金属，形成发射极—基区金属的自对准。蒸发基区后，浸泡剥离；涂胶，用基区版曝光、显影，然后以胶为掩膜腐蚀基区到亚集电区；隔离版光刻，以胶为掩膜腐蚀到衬底形成隔离区；最后蒸发集电区和布线金属完成整个器件的制备。

用上述结构及制备方法所制备的器件，用 HP4155 所测发射极面积为 $5 \times 20 \mu\text{m}^2$ 时共发射极 I-V 特性曲线如图 2 所示。从图中可以看出，它具有非常优越的直流特性，其补偿电压 V_{offset} 仅为 70mV，当电流密度高达 $3.4 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 时饱和压降 V_{sat} 只有 0.92V， β 值接近 100。它的补偿电压 V_{offset} 比文献中报道的 GaInP/GaAs HBT^[9]、InP DHBT^[10,11] 的均小。而它的饱和压降 V_{sat} 也低于同样电流密度下常规 GaInP/GaAs HBT^[9]，说明这种结构的 HBT 有优越的直流特性。

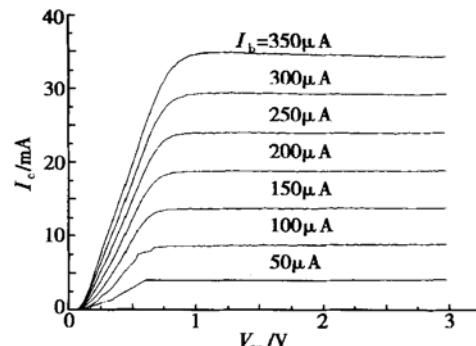


图 2 直流特性 $S_e = 5 \times 20 \mu\text{m}^2$

Fig. 2 DC characteristics $S_e = 5 \times 20 \mu\text{m}^2$

在 BE 结电压为 1.45V，CE 结电压为 2.0V 时，用 HP8510c 所测发射极面极为 $3 \times 15 \mu\text{m}^2$ 器件的高频特性如图 3 所示。在 26.5GHz 时 H_{21} 大于 10dB，它的截止频率为 77.24GHz。发射极面积为 $5 \times 20 \mu\text{m}^2$ 的器件，同样条件下测得的器件的截止频率为 72GHz。文献[11]报道的 GaAsSb/InP DHBT 的截止频率约为 77GHz，它的集电极厚度为 300nm，基区厚度只有 40nm，发射极面积为 $4 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ 。忽略基区厚度的影响，我们所制备的发射极面积为 $5 \times 20 \mu\text{m}^2$ 的器件其截止频率不低于文献[11]报道的结果。由于 InP 材料比 GaAs 有更高的电子迁移率

及更大的电子运动饱和速度, 所以 InP HBT 比 GaAs HBT 有更高的频率。而文中的结果已经可以与文献[11]报道的同样集电极厚度 GaAsSb/InP DHBT 的截止频率相比拟, 说明这种结构的器件其微波特性也是非常良好的。进一步优化器件结构和改进制备工艺, 必将得到更加优越的直流和微波特性。

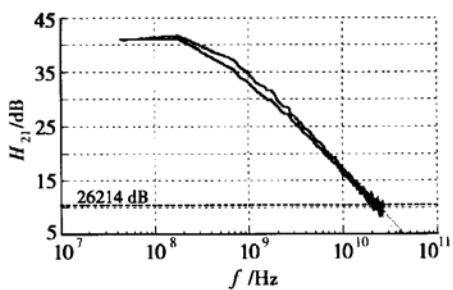


图 3 微波特性 $S_e = 3 \times 15\mu\text{m}^2$

Fig. 3 Microwave characteristics $S_e = 3 \times 15\mu\text{m}^2$

4 结论

文中利用电子速度过冲现象首次设计了一种新结构复合收集区 GaInP/GaAs HBT。从上面的结果及讨论可以看出, 这种新结构的 HBT 具有优越的直流和微波特性。它的补偿电压仅为 70mV, 高电流密度下的饱和压降只有 0.92V, 优于文献中报道的结果。而它的截止频率也可以和同样集电极厚度下的 GaAsSb/InP DHBT 相比拟。器件结构的优化设计和制备工艺的改进, 必将使器件的直流和微波特性得到进一步提高。

参考文献

- [1] Hartmann Q J, Fresina M T, Ahmari D A, et al. Effect of collector design on the d. c. characteristics of $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}/\text{GaAs}$ heterojunction bipolar transistors. Solid-State Electron, 1995, 38(12): 2017
- [2] Ahmari D A, Fresina M T, Hartmann Q J, et al. High-speed InGaP/GaAs HBT's with a strained $\text{In}_{x}\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ base. IEEE Electron Device Lett, 1996, 17(5): 226
- [3] Chen Y K, Kapre R, Tsang W T, et al. Carbon-doped InGaP/GaAs/InGaP double heterojunction bipolar transistors with very low $1/f$ noise corner frequency of 108kHz grown by chemical beam epitaxy. J Cryst Growth, 1994, 136: 221
- [4] Pan N, Elliott J, Knowles M, et al. High reliability InGaP/GaAs HBT. IEEE Electron Device Lett, 1998, 19(4): 115
- [5] Meyer M. GaAs remains a hot topic at Mantech. Compound Semiconductor, 2001, 7(4): 41
- [6] Uchida K, Matsuura H, Yakihara T, et al. A series of InGaP/InGaAs HBT oscillators up to D-band. IEEE Trans Microw Theory Techn, 2001, 49(5): 858
- [7] Liu W. Handbook of III-V compound semiconductors. Wiley-Interscience Publication, 1998: 726
- [8] Ferry D K, Grondin G O. Physics of submicron devices. New York: Plenum Press, 1991: 14
- [9] Zampardi P J, Chang C E, Fitzsimmons S, et al. Demonstration of low-knee voltage high-breakdown GaInP double HBT using novel compound collector design. IEEE Trans Electron Devices, 2002, 49(4): 540
- [10] Willén B, Asonen H. High-gain, high-speed InP/InGaAs double-heterojunction bipolar transistors with a step-graded base-collector heterojunction. IEEE Electron Device Lett, 1995, 16(11): 479
- [11] Xu Xiangang, Liu Zhe, Cui Deliang. GaAsSb/InP HBT growth on InP substrates. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(9): 962 (in Chinese) [徐现刚, 刘喆, 崔得良. 基于 InP 衬底的 GaAsSb/InP 异质结晶体管. 半导体学报, 2002, 23(9): 962]

A Novel Compound Collector InGaP/GaAs Heterojunction Bipolar Transistor^{*}

Shi Ruiying¹, Liu Xunchun², Yuan Zhipeng², Wang Runmei² and Sun Haifeng²

(1 Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

(2 Microelectronics R&D Center, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: A novel compound collector InGaP/GaAs heterojunction bipolar transistor is designed based on electron velocity overshoot phenomena. Cutoff frequency f_T not only increases, offset voltage but also reduces in this structure. The cutoff frequency of 77GHz, with a DC current gain of 100, and the offset voltage down to 70mV are obtained. At the same time, DC and microwave characteristics are compared with a reported paper.

Key words: velocity overshoot; compound collector; heterojunction bipolar transistor; DC and microwave characteristics

EEACC: 1350F; 0260; 2560B; 2560J

Article ID: 0253-4177(2004)03-0316-05

* Project supported by State Key Development Program for Basic Research of China (No. G200006830403)

Shi Ruiying female, was born in 1963, associate professor. Her research interests are compound semiconductor device and MMICs.

Liu Xunchun male, was born in 1943, professor. His research interests are compound semiconductor device and high density plasma etching technology.