

# 低开启电压的 InGaP/GaAsSb/GaAs 双异质结晶体管

郑丽萍 严北平 孙海锋 刘新宇 和致经 吴德馨

(中国科学院微电子中心, 北京 100029)

**摘要:** 采用窄禁带宽度材料 GaAsSb 作为异质结晶体管的基区材料, 成功研制出了能有效降低电路工作电压和功率损耗的低开启电压的 NPN InGaP/GaAsSb/GaAs 双异质结晶体管(double heterojunction bipolar transistor, DHBT)。器件性能如下: BE 结的正向开启电压(turn-on voltage)仅为 0.73V; 当  $I_B = 1\mu A/step$  时, 直流增益达到了 100,  $BV_{CEO} = 5 \sim 6V$ 。通过对基区不同 Sb 含量器件的比较得到, 器件的直流特性与基区 Sb 的含量有关。

**关键词:** 开启电压; GaAsSb; 双异质结晶体管

**EEACC:** 2560J

中图分类号: TN325<sup>+</sup>.3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)03-0318-04

## 1 引言

InGaP/GaAs SHBT 具有良好的器件特性<sup>[1,2]</sup>, 如: 功率密度高、大电流处理能力强、击穿电压高等优点, 已成为目前微波功率器件的首选。但由于 InGaP/GaAs SHBT BE 结的开启电压比较高(一般为 1.1V), 因此电路的最小工作电压大、直流功耗大、功率附加效率低, 尤其是对于低电压下工作的电路, 该问题更为严重。所以, 降低器件 BE 结的开启电压对于提高电路的功率附加效率是必要的。

器件 BE 结的开启电压与其基区材料的禁带宽度有直接关系。为了降低开启电压, 必须采用窄禁带宽度的材料作器件的基区材料。本文采用 p<sup>+</sup>-GaAsSb 作为晶体管的基区材料。GaAsSb 的禁带宽度与 Sb 的含量和温度有关, 在室温下, 设 GaAsSb 中 Sb 的含量为  $x_{Sb}$ , 则与 GaAs 相比的带宽差与价带偏移量分别为<sup>[3,4]</sup>:

$$\begin{aligned}\Delta E_g(x_{Sb}) &= 1.79x_{Sb} - 1.54x_{Sb}^2 \\ \Delta E_v(x_{Sb}) &= 1.97x_{Sb} - 1.69x_{Sb}^2\end{aligned}\quad (1)$$

本文中基区 Sb 的含量为 10.4%, 由(1)式可知:  $\Delta E_g(x_{Sb}) = 0.17eV$ ;  $\Delta E_v = 0.19eV$ 。GaAsSb 的

禁带宽度为 1.26eV, 相比于 InGaP/GaAs SHBT 的基区材料 GaAs(禁带宽度为 1.43eV), GaAsSb 的禁带宽度更窄。因此, 以 GaAsSb 为基区制得的器件的 BE 结开启电压会比较低。

以 InGaP/GaAsSb/GaAs 系材料, 采用标准的湿法腐蚀工艺制作了 InGaP/GaAsSb/GaAs 双异质结晶体管。测量得到器件 BE 结的正向开启电压仅为 0.73V。并且通过与基区不同 Sb 含量的器件比较得到, 器件的直流特性与基区 Sb 的含量有关。

## 2 器件工艺

MOCVD 生长的 DHBT 材料是由香港大学提供的。其外延层结构如下: 半绝缘衬底上生长 500nm 厚的 n<sup>+</sup>-GaAs 亚集电区, 掺杂浓度为  $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ; 500nm 厚的 n<sup>-</sup>-GaAs 集电区, 掺杂浓度为  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ; 50nm 厚的 p<sup>+</sup>-GaAs<sub>0.89</sub>Sb<sub>0.104</sub> 基区, C 掺杂浓度为  $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ; 50nm 厚的 n<sup>+</sup>-InGaP 发射区, 掺杂浓度为  $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ; 170nm 厚的 n<sup>+</sup>-GaAs 帽层, 掺杂浓度为  $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ; 50nm 厚的 In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As 缓变层, 掺杂浓度为  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ; 50nm 厚的 InGaAs 接触层, 掺杂浓度为  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。

郑丽萍 女, 1975 年出生, 博士研究生, 主要从事 HBT 器件和电路的研究。

2002-05-29 收到, 2002-08-19 定稿

©2003 中国电子学会

由于 InGaP/GaAsSb/GaAs 材料有良好的选择性腐蚀, 采用湿法腐蚀制作台面结构。器件制作的主要工艺流程如下: 蒸发金属 Ti/Au, 剥离制作发射极电极; 以发射极金属为掩膜, 柠檬酸系腐蚀液腐蚀发射极盖帽层,  $H_3PO_4$ : HCl 腐蚀 InGaP 至基区表面; 蒸发 Ti/Au 做基极电极, 剥离后以光刻胶为掩膜, 用柠檬酸系腐蚀液腐蚀 BC 结合面至亚集电区; 光刻并蒸发 Ni/Ge/Au 制作集电极电极, 在  $N_2$  气氛中合金化作欧姆接触; 蒸发互连金属 Ti/Au 以连接三个不同的电极; 最后采用微空气桥技术实现器件隔离, 即以光刻胶为掩膜保护有源区, 以  $H_3PO_4$ : HCl = 1:1 作为腐蚀液, 利用湿法腐蚀各向同性的特征, 侧向刻蚀去发射极和基极金属下的半导体以实现器件隔离<sup>[5,6]</sup>。器件的 SEM 照片如图 1 所示。

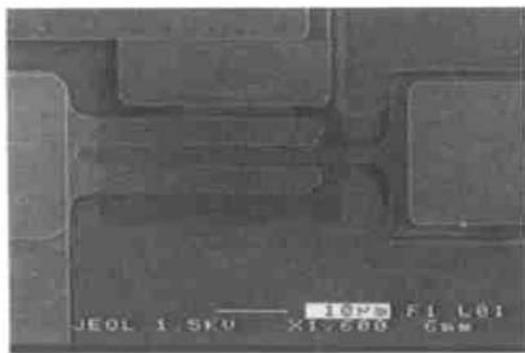


图 1 微空气桥隔离器件的 SEM 照片

Fig. 1 SEM photograph of the device fabricated by micro airbridge process

### 3 结果与分析

利用 HP4155 半导体参数分析仪测量了器件的直流特性。图 2 给出了 BE 结的特性曲线。图中实线是 InGaP/GaAsSb/GaAs DHBT 的 BE 结  $I-V$  特性, 虚线为相同工艺条件下制作的普通 InGaP/GaAs SHBT 的 BE 结  $I-V$  特性。从图中可以看到, InGaP/GaAsSb/GaAs DHBT 的 BE 结正向开启电压仅为 0.73V, 而 InGaP/GaAs SHBT BE 结的正向开启电压达到了 1V(设定 BE 结开启电压为集电极电流密度为  $0.01A/cm^2$  时所对应的 BE 结电压)。可见, 利用这种新型 DHBT 有利于提高小电压应用的功率器件的效率。此外, 与文献[7]相比可知, 该器件具有更低的开启电压(文献[7]中基区 GaAsSb 中 Sb 的含量为 8%, BE 结的开启电压大于 0.8V)。我们认为

这是因为 Sb 的含量越高, GaAsSb 的禁带宽度就越窄, 因此得到的器件开启电压就越小。

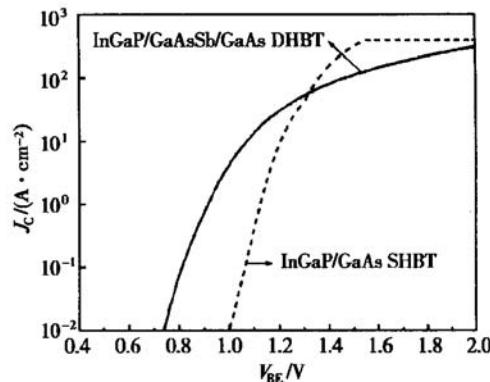


图 2 InGaP/GaAsSb/GaAs DHBT 与 InGaP/GaAs SHBT BE 结开启特性的比较 发射极面积为  $3\mu m \times 30\mu m$

Fig. 2 Collector current turn-on characteristics for our InGaP/GaAsSb/GaAs DHBT (solid) compared to those from InGaP/GaAs SHBTs also fabricated in our laboratory

图 3 给出了 InGaP/GaAsSb/GaAs DHBT 的共发射极  $I-V$  特性。当基区电流  $I_B = 1\mu A/step$  时, 器件的直流增益为 100, 我们认为小电流直流增益较大的原因是基区掺杂浓度较低, 发射极注入效率较大的缘故。从图中还可以看到, 器件的膝点电压小于 0.5V,  $BV_{CEO} = 5 \sim 6V$ 。

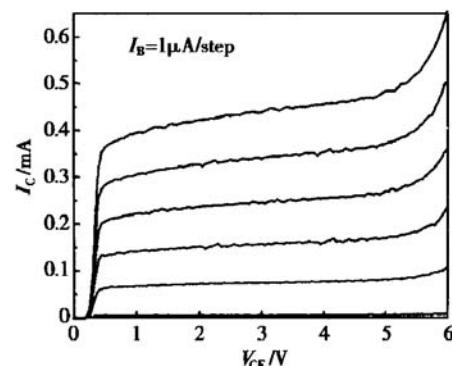


图 3 InGaP/GaAsSb/GaAs DHBT 的共发射极  $I-V$  特性 发射极面积为  $3\mu m \times 30\mu m$

Fig. 3 Common emitter  $I-V$  characteristics of the InGaP/GaAsSb/GaAs DHBT with an emitter size of  $3\mu m \times 30\mu m$

图 4 给出了测量的 Gummel 曲线。集电极电流的理想因子为 1.05, 基极电流的理想因子为 1.54, 可见, 空间电荷区的复合电流是基区电流的主要成分。与文献[7]相比, 基极电流理想因子增大(文献

[7] 中基区电流的理想因子为 1.12). 我们认为, 这个差别主要是由于基区 Sb 含量的不同引起的, 因为 GaAsSb 与 GaAs 的晶格不匹配, Sb 含量的增加会使缺陷增加, 由于基区比较薄, 这种缺陷会影响到 BE 结的空间电荷区, 从而使 BE 结空间电荷区的复合电流增大. 此外, 在材料生长上, 由于 Sb 含量增大, 基区掺杂浓度会下降, 也会导致空间复合电流增大. 由此知道, 尽管增大 GaAsSb 中 Sb 的含量会使 BE 结的开启电压减小, 但同时还会使材料中的缺陷增加, 基区掺杂浓度降低, 从而使基区的复合电流增大, 影响器件的直流特性. 因此基区 Sb 含量的选择应考虑这两种因素折衷决定.

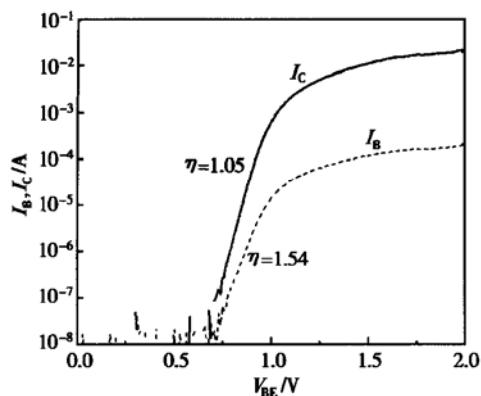


图 4 InGaP/GaAsSb/GaAs DHBT 的 Gummel 特性曲线  
Fig. 4 Gummel curve of InGaP/GaAsSb/GaAs DHBT

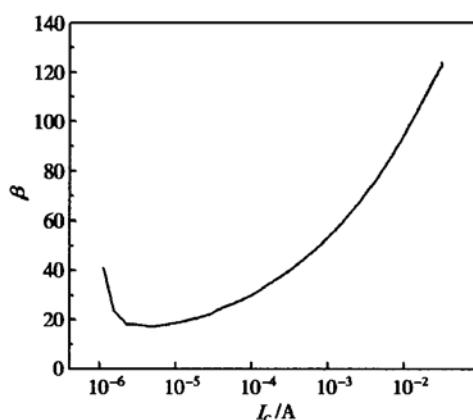


图 5 器件的直流增益随集电极电流的变化曲线  
Fig. 5 Current gain's dependence on  $I_C$

图 5 给出了直流增益随集电极电流的变化曲线. 当集电极电流较小时( $< 10^{-5}$  A), 直流增益随集电极电流的增大而减小. 我们认为出现这种反常现象的原因可能是光生电流的影响. 随着集电极电流继续增大, 光生电流基本可以忽略, 此时直流增益随集电极电流的增大而增大, 最大直流增益约为 130.

## 4 结论

采用  $p^+$ -GaAsSb 作为基区材料, 利用湿法腐蚀工艺成功研制出了 InGaP/GaAsSb/GaAs DHBT. 当基区 GaAsSb 的含量为 10.4% 时, 器件 BE 结的开启电压仅为 0.73V. 因此 GaAsSb 作为基区材料可以有效地降低器件 BE 结的开启电压. 该性质对于提高小电压工作的功率器件的效率是很有利的. 通过与基区不同 Sb 含量的器件比较得出, DHBT 的直流特性与基区的 Sb 含量有直接关系.

## 参考文献

- [1] Liu W. Handbook of heterojunction bipolar transistor. John Wiley & Sons, 1998
- [2] Ueda O, Kawana A. Current status of reliability of InGaP/GaAs HBTs. Solid State Electron, 1997, 41: 1605
- [3] Teissier R, Sicault D, Harmand J C, et al. Temperature-dependent valence band offset and band-gap energies of pseudomorphic GaAsSb on GaAs. J Appl Phys, 2001, 89( 10) : 5473
- [4] Dvorak M W, Bolognesi C R, Pitts O J, et al. 300GHz InP/GaAsSb/InP double HBTs with high current capability and  $BV_{CEO} > 6V$ . IEEE Electron Device Lett, 2001, 22( 8) : 361
- [5] Yan Beiping, Zhang Heming, Dai Xianying. High power density self-aligned AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22( 2) : 247 (in Chinese) [严北平, 张鹤鸣, 戴显英. 高功率密度自对准结构 AlGaAs/GaAs 异质结晶体管. 半导体学报, 2001, 22( 2) : 247]
- [6] Yan B P, Wang Hong, Pan Yang, et al. The influence of different isolation processes on the performance of AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors for power applications. Solid State Electron, 2000, 44: 1989
- [7] Yan B P, Hsu C C, Wang X Q, et al. Low turn-on voltage InGaP/GaAsSb/GaAs DHBT double HBTs grown by MOCVD. IEEE Electron Device Lett, 2002, 23( 4) : 170

## Low Turn-on Voltage of InGaP/GaAsSb/GaAs Double Heterojunction Bipolar Transistor

Zheng Liping, Yan Beiping, Sun Haifeng, Liu Xinyu, He Zhijing and Wu Dexin

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

**Abstract:** A NPN InGaP/GaAsSb/GaAs double heterojunction bipolar transistor with low turn-on voltage is fabricated using GaAsSb as the narrow band gap material for the base layer of GaAs HBTs. The devices have a great potential for reducing operating voltage and power dissipation. The turn-on voltage of the InGaP/GaAsSb/GaAs DHBT is only 0.73V, the DC current gain is about 100 and the breakdown voltage of emitter-collector  $BV_{CEO}$  is 5~6V at a base current step of  $I_B = 1\mu A$ . Moreover, the results show that the DC performances of the DHBT are related to the percentage of the Sb in GaAsSb.

**Key words:** turn-on voltage; GaAsSb; double heterojunction bipolar transistor

**EEACC:** 2560J

**Article ID:** 0253-4177(2003)03-0318-04

Zheng Liping female, was born in 1975, PhD candidate. Her research fields are in HBT devices and circuits.

Received 29 May 2002, revised manuscript received 19 August 2002

©2003 The Chinese Institute of Electronics