

# 钝化边的制作及其对不同尺寸自对准 InGaP/GaAs HBT 性能的影响\*

郑丽萍 刘新宇 袁志鹏 孙海锋 和致经 吴德馨

(中国科学院微电子中心, 北京 100029)

**摘要:** 采用全耗尽的 InGaP 材料在基区 GaAs 表面形成钝化边(passivation ledge)的方法, 研制出了带钝化边的自对准 InGaP/GaAs 异质结双极晶体管(HBT)。通过对不同尺寸、有无钝化边器件性能的比较得出: 钝化边对提高小尺寸器件的直流增益有明显效果, 对器件的高频特性无明显影响。此外, 钝化边的形成改善了所有实验器件的长期可靠性。

**关键词:** 钝化边; 直流增益; 异质结双极晶体管

**EEACC:** 2560J

中图分类号: TN 325<sup>+ . 3</sup>

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)03-0312-04

## 1 引言

近年来, GaAs 器件的应用越来越广泛, InGaP/GaAs HBT 已经取代 AlGaAs/GaAs HBT 成为主流产品<sup>[1~3]</sup>。在研究 AlGaAs/GaAs HBT 时人们发现, 由于 AlGaAs/GaAs HBT 基区材料 GaAs 的表面复合速率达到  $10^6 \text{ cm/s}$ , 使基区表面复合电流增大, 影响了器件的性能<sup>[4]</sup>; 而且 GaAs 氧化物中的  $\text{As}_2\text{O}_3$  极不稳定, 因此表面钝化始终是 GaAs 器件制作工艺中的重点和难点。实际上, GaAs HBT 器件性能变差的主要原因是器件基区有一部分是裸露的高表面复合速率的 GaAs, 引起较大的基区表面复合, 如果能用一种低表面复合材料覆盖在裸露的 GaAs 上, 就可以起到钝化的效果。由此人们提出氢钝化或氮钝化<sup>[5,6]</sup>、硫化<sup>[7]</sup>和钝化边<sup>[8,9]</sup>等方法。氢钝化的缺点是 H 易与 GaAs 反应, 不能形成良好的介质膜来保护表面; 氮钝化主要是在 GaAs 表面形成高带隙的 GaN, 从而达到钝化的目的; 硫化法是用  $\text{Na}_2\text{S}$ 、 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ 、 $\text{P}_2\text{S}_5$ 、 $\text{As}_2\text{S}_3$  等在 GaAs 表面形成硫化物薄膜而达到钝化效果, 但该方法钝化后形成的

硫化物薄膜稳定性不好, 器件在钝化一段时间以后性能又会变差; 钝化边法是利用一层致密的  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , 使原本裸露的 GaAs 被全耗尽的发射极材料覆盖以减小基区表面复合, 从而达到钝化的效果。钝化边法对发射极的厚度有一定要求, 首先它必须大于电子的平均自由程, 其次它应使发射极处于全耗尽态。理论计算和实验表明, 发射极材料厚度为  $50\text{ nm}$  可以满足要求。人们对钝化的非自对准器件已经作了较详尽的研究<sup>[4,9]</sup>, 而对自对准器件, 由于湿法腐蚀存在较大的侧向腐蚀, 因此钝化边对其性能也有影响。本文采用钝化边法制作了自对准的 InGaP/GaAs HBT 器件, 比较有无钝化边器件的直流特性和高频性能, 并研究了钝化边对不同尺寸器件性能的影响。

## 2 器件制作工艺

本文所用的 InGaP/GaAs HBT 材料是用 MOCVD 技术生长的, 由台湾 Southeipi 公司提供。其外延层结构如表 1 所示。

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 60146001)

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。

2003-03-21 收到, 2003-07-02 定稿

©2004 中国电子学会

表 1 InGaP/GaAs HBT 材料的外延层结构

Table 1 Material structure of InGaP/GaAs HBT

Layer name	Material	Doping/cm <sup>-3</sup>	Thickness/nm
Cap layer	In <sub>0.5</sub> Ga <sub>0.5</sub> As	>1×10 <sup>19</sup>	50
Cap layer	In <sub>1-x</sub> Ga <sub>x</sub> As(x=0~0.5)	>1×10 <sup>19</sup>	50
Cap layer	n <sup>+</sup> -GaAs	4×10 <sup>18</sup>	100
Emitter	n-InGaP	4×10 <sup>17</sup>	50
Base	p <sup>+</sup> -GaAs	4×10 <sup>19</sup>	100
Collector	n <sup>-</sup> -GaAs	1×10 <sup>16</sup>	700
Sub-collector	n <sup>+</sup> -GaAs	4×10 <sup>18</sup>	500
Si GaAs			

器件制作的主要工艺流程如下: 蒸发发射极金属 Ti/Au; 以发射极金属为掩膜, 腐蚀盖帽层和 In-GaP 至基区表面; 蒸发基极接触金属 Ti/Au, 剥离后形成发射极金属和基极金属自对准; 光刻集电区并湿法腐蚀到集电极, 电子束蒸发集电极接触金属 Ni/Ge/Au, 在 N<sub>2</sub> 气氛中合金化形成欧姆接触; 湿法腐蚀实现器件隔离; 最后蒸发互连金属 Ti/Au 以连接三个不同的电极。钝化边工艺是在腐蚀盖帽层后, 用 PECVD 淀积厚度适当的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, 然后用 RIE 刻蚀 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, 由于存在侧向腐蚀, 发射极金属下的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 会保留下; 这时再腐蚀 InGaP 层, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 下的 InGaP 得以保留, 形成钝化边。

钝化边制作工艺有两个难点, 一是对刻蚀的陡直性要求很高, 否则在蒸发自对准基极金属时易引起 BE 结短路, 通过选择合适的刻蚀气体我们成功地解决了该问题; 二是对于不同的外延结构, 选取适当厚度的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 是制作钝化边的关键, 如果淀积的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 太薄, 由于 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 中针孔的存在, 保护不了下面的 InGaP 而失去钝化效果, 如果淀积的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 太厚, 因边缘的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 较厚, 易引起 BE 结短路。通过多次实验, 最终我们选取以 CHF<sub>3</sub>/O<sub>2</sub> 为刻蚀气体, 淀积的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 厚度为 50nm。器件的 SEM 照片显示, 钝



图 1 钝化边的 SEM 图

Fig. 1 SEM photograph of passivation ledge

化边已形成, 长度约为 80nm, 器件的 BE 结无短接现象。随机抽取了 20 个器件测试, BE 结特性均正常。图 1 给出了钝化边的 SEM 照片。

### 3 结果与分析

器件的直流参数由 HP4155 半导体参数分析仪测得。图 2 为有无钝化边器件的共发射极 I-V 特性, 发射极尺寸为 4μm × 30μm, ΔI<sub>B</sub> = 50μA。可以看到, 有钝化边器件的直流增益明显高于无钝化边器件的直流增益, 分别为 95 和 64。因此, 钝化边的制作改善了该尺寸器件的直流特性。

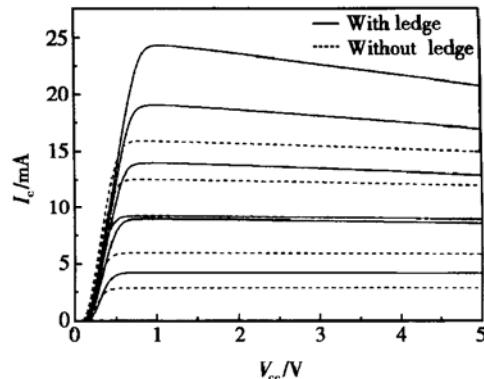


图 2 有无钝化边器件的共发射极 I-V 特性 器件的尺寸为 4μm × 30μm, 实线、虚线分别表示有和没有 ledge 的器件。

Fig. 2 Common emitter I-V characteristics of In-GaP/GaAs HBT with and without passivation ledge

图 3 给出器件高频测试的结果, 由 HP8510C 网络分析仪测得。测量结果显示, 不论器件有无钝化边, 它们的高频特性均相同。对于 4μm × 30μm 的器

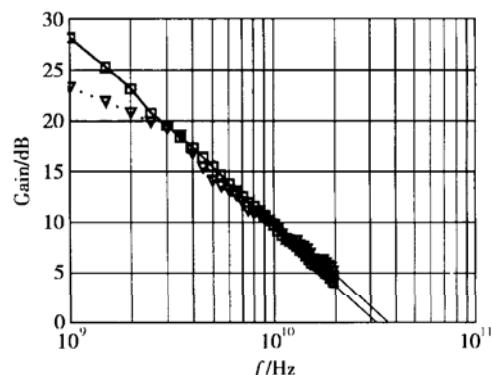


图 3 InGaP/GaAs HBT 的高频特性 器件的尺寸为 4μm × 30μm, 实线为 h(2,1), 虚线为 MAG/MSG。

Fig. 3 High-frequency performance of InGaP/GaAs HBT with an emitter 4μm × 30μm

件,当偏置电压  $U=2V$ , 偏置电流  $I=300\mu A$  时,由  $h_{21}$  和 MAG/MSG 的曲线延长得到器件的截止频率和最高振荡频率分别为 32GHz、35GHz。

为了研究器件的尺寸效应, 分别制作了发射极尺寸为  $4\mu m \times 30\mu m$ (小)、 $7\mu m \times 30\mu m$ (中)、 $50\mu m \times 50\mu m$ (大)的器件, 比较它们的特性。图 4 给出了小尺寸和中等尺寸有无钝化边器件的直流增益随集电极电流的变化曲线。由图可见, 对于小尺寸器件, 有无钝化边器件的最大直流增益分别为 96 和 65; 中等尺寸有无钝化边器件的最大直流增益分别为 95 和 80。对于大尺寸器件, 有无钝化边器件的直

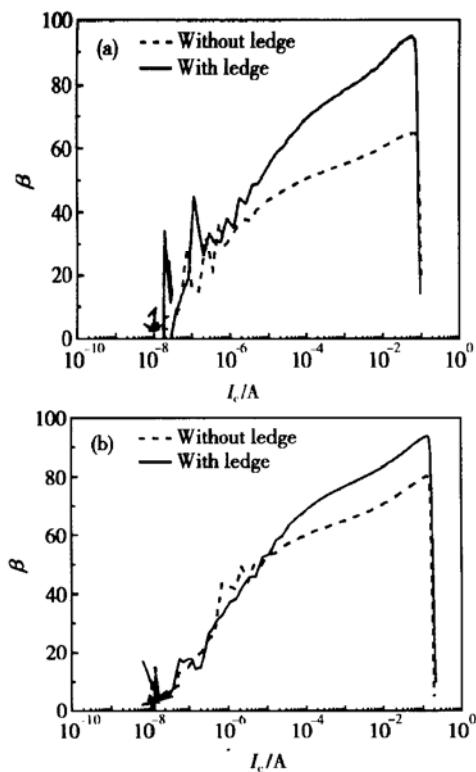


图 4 有无钝化边 HBT 器件的直流增益随集电极电流的变化曲线 (a) 发射极尺寸为  $4\mu m \times 30\mu m$ ; (b) 发射极尺寸为  $7\mu m \times 30\mu m$

Fig. 4 Measured current gain of InGaP/GaAs HBT with and without passivation ledge

增益基本相同。显然, 钝化边的形成对器件直流特性的影响与发射极的尺寸有关, 发射极尺寸越小, 器件直流特性的改善越显著。我们认为, 这是因为对于不同尺寸器件, 基区表面复合电流在基区复合电流中所占的比例不同而导致的。对于小尺寸器件, 基区表面复合电流是基区复合电流的一个主要成分, 钝化边能有效减小基区表面复合电流, 因此也就有效地减小了基区复合电流, 使器件的直流增益增大;

对于大尺寸器件, 基区表面复合电流并不是基区复合电流的主要成分, 这时减小基区表面复合电流并不会对基区复合电流产生显著影响, 也就不会明显改善器件的直流增益。所以, 钝化边的制作能够显著改善小尺寸器件的直流特性, 对于大尺寸器件的影响则较小。HBT 器件的高频特性主要取决于材料的外延结构、器件的横向尺寸等, 与基区表面复合无关。高频测试结果也显示对于任何一种尺寸, 有无钝化边器件的高频特性都相同。

我们将有无钝化边的器件同时暴露在空气中放置了 3 个月。测量结果显示: 有钝化边器件的直流输出特性没有变化, 而无钝化边器件的直流输出特性变差, 这一点对于所有尺寸的器件都相同。所以, 钝化边的制作能够明显改善器件的可靠性, 这对于器件的产品化是非常重要的。

## 4 结论

通过生长一层厚度合适的  $Si_3N_4$ , 成功制作了带钝化边的自对准 InGaP/GaAs HBT 器件。测试结果显示: 钝化边的制作对器件的高频特性影响不大, 但能明显改善小尺寸器件的直流特性, 发射极尺寸越小, 效果越明显。此外, 钝化边的制作能有效地改善任何尺寸器件的长期可靠性。因此, 制作钝化边对于自对准 InGaP/GaAs HBT 器件的实用化是很有意义的。

## 参考文献

- [1] Ueda O, Kawana A. Current status of reliability of InGaP/GaAs HBTs. Solid-State Electron, 1997, 41: 1605
- [2] Takahashi T, Sasa S, Kawano A, et al., High reliability InGaP/GaAs HBT fabricated by self-aligned process. Proc IEMD, 1994: 191
- [3] Zheng Liping, Yan Beiping, Sun Haifeng, et al. Low turn-on voltage of InGaP/GaAsSb/GaAs double heterojunction bipolar transistor. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(3): 318(in Chinese) [郑丽萍, 严北平, 孙海峰, 等. 低开启电压的 InGaP/GaAsSb/GaAs 双异质结晶体管. 半导体学报, 2003, 24(3): 318]
- [4] Liu W. Handbook of heterojunction bipolar transistor. John Wiley&Sons, 1998
- [5] Sugata S, Takamori A, Takado N, et al. GaAs cleaning with a hydrogen radical beam gun in an ultrahigh-vacuum system. J Vac Sci Tech, 1988, B6(4): 1087

- [ 6 ] Wang Q, Yang E S. Electron cyclotron resonance hydrogen and nitrogen plasma surface passivation of AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors. *IEEE Electron Device Lett*, 1992, 13(2): 83
- [ 7 ] Sandroff C J, et al. Dramatic enhancement in the gain of a GaAs/AlGaAs heterostructure bipolar transistor by surface chemical passivation. *Appl Phys Lett*, 1987, 51(1): 33
- [ 8 ] Fresina T, et al. Selective self-aligned emitter ledge formation for heterojunction bipolar transistors. *IEEE Electron Device Lett*, 1996, 17(12): 555
- [ 9 ] Yan B P, Yang Y F, Hsu C C, et al. A reliability comparison of InGaP/GaAs HBTs with and without passivation ledge. *Microelectronics Reliability*, 2001, 41: 1959

## **Passivation Ledge Fabrication and Its Effect on Performance of Self-Aligned InGaP/GaAs HBT with Variety of Emitter Sizes<sup>\*</sup>**

Zheng Liping, Liu Xinyu, Yuan Zhipeng, Sun Haifeng, He Zhijing and Wu Dexin

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

**Abstract:** The self-aligned InGaP/GaAs heterojunction bipolar transistors (HBTs) with passivation ledge are fabricated. The performances of the HBTs with and without passivation ledge are compared. The results show that they have the same high-frequency performance both for the devices without passivation ledge and for the devices with passivation ledge. But the improvement of the current gain is different for the devices with different emitter sizes. The devices with smaller size of emitter are more sensitive to the passivation ledge. Moreover, the reliability of all devices with the passivation ledge is improved.

**Key words:** passivation ledge; current gain; heterojunction bipolar transistor

**EEACC:** 2560J

**Article ID:** 0253-4177(2004)03-0312-04

\* Project supported by National Natural Science Foundation of China(No. 60146001)

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

Received 21 March 2003, revised manuscript received 2 July 2003

©2004 The Chinese Institute of Electronics