

# 低电压高效率非晶硅发射极 异质结 UHF 功率晶体管

王因生 盛文伟 张晓明 王晓斐

(南京电子器件研究所, 南京, 2 10018)

1990年5月15日收到

本文报道了利用重掺杂氢化非晶硅作宽禁带发射极材料的低电压硅异质结 UHF 功率晶体管的实验结果。制备的器件在 9 伏电压、工作频率 470MHz 下, 输出连续波功率 4W, 功率增益 8.2dB, 集电极效率 72%。在迄今有关非晶硅发射极 HBT 的报道中, 这是首次详细报道可工作于 UHF 频率的低电压非晶硅发射极异质结功率晶体管。文中还讨论了这种异质结构的低压功率器件的设计和制备应考虑的一些问题, 并提出一些解决办法。

主题词 氢化非晶硅, 异质结, 微波功率晶体管

## 一、引言

近几年来, 异质结双极晶体管 (HBT'S) 在高频高速领域里的应用前景已经引起器件研究者极大的兴趣。据报道[1—3], GaAlAs/GaAs HBT 器件的最高振荡频率已超过 200GHz, 显示了该器件在毫米波尤其是在 60—94GHz 波段上应用的巨大潜力。在硅材料的 HBT 研究中, 多晶硅 (polysilicon)<sup>[4—5]</sup>, 半绝缘多晶硅 (SIPOS)<sup>[6]</sup>, 非晶碳化硅 ( $a\text{-SiC:H}$ )<sup>[7]</sup>, 单晶  $\beta$  碳化硅 (Single-Crystalline  $\beta\text{-SiC}$ )<sup>[8]</sup>, 非晶硅 ( $a\text{-Si:H}$ )<sup>[9—10]</sup> 和微晶硅 ( $\mu c\text{-Si:H}$ )<sup>[11]</sup> 等材料已被用作宽禁带发射极, 取得良好的效果, 其中非晶硅是最有发展前途的发射极材料之一。

在非晶硅 HBT 中, 采用重掺杂的氢化非晶硅作宽禁带发射极材料, 它是由等离子体辉光放电法在低温(270°C)下淀积而成的。近年来研究工作多数集中在  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$  异质结界面及其 HBT 器件的直流特性上, 研究如何利用异质界面的高注入来获得尽可能高的电流增益和低的基区电阻, 同时期望获得较好的高频高速性能。在早先的研究中, 我们首先报道了非晶硅发射极异质结晶体管微波性能的实验结果<sup>[12—15]</sup>, 获得了截止频率  $f_T$  大于 5GHz 的器件。这些结果初步地显示  $n^+ a\text{-Si:H}/p c\text{-Si}$  异质界面的电学性能可以满足微波器件的要求。本文将进而研究把这种异质结发射极结构应用到微波功率器件所面临的问题并报道获得的初步结果: 实验样管在 9V 低电压下, 工作频率 470MHz, 连续波输出功率大于 4W, 功率增益 8.2dB, 集电极效率 72%。这是迄今报道的非晶硅 HBT 器件在 9 伏低工作电压下获得的最好结果。

## 二、理论考虑

### 1. 重掺杂的非晶硅发射极结构

通常 HBT 器件宽禁带发射区往往设计为低掺杂浓度，基区高掺杂，从而可以减小发射结电容和基区电阻，这对降低晶体管噪声系数和提高  $f_{\max}$  十分有利。这种结构在 GaAlAs/GaAs HBT 器件收到良好的效果，但对非晶硅 HBT 器件，这种结构会引起一些麻烦。首先，发射结的耗尽区主要向低掺杂浓度的非晶硅延伸，电子渡越发射区耗尽层的时间会由于电子在非晶硅中的迁移率很低而变得不容忽视，将会严重地影响器件的高频性能，这是以往这种结构的非晶硅 HBT 器件截止频率做不高的一个重要原因<sup>[13-14]</sup>。其次，低浓度的非晶硅层不仅引起高的发射极串联电阻从而影响器件的高频性能和功率输出，同时还很大地限制了发射极所能通过的最大电流密度<sup>[15]</sup>。由电流密度公式  $J = nq\mu_s \varepsilon$  可知，若取非晶硅中载流子浓度  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ，电子迁移率  $\mu_s$  取  $0.8 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ，电场强度  $\varepsilon$  为  $1 \times 10^4 \text{ V cm}^{-1}$ ，则由公式可估算出电流密度只有  $1.3 \times 10^3 \text{ A cm}^{-2}$ ，这个值远低于微波功率器件可能达到的最大电流密度。为避免这些问题，要求做为发射极的非晶硅必须是重掺杂的，同时应包含有部份的微晶成分以利于提高非晶硅中电子的迁移率，改善器件的频率和功率特性。

### 2. 高的电流增益

由于宽禁带发射极引起的附加势垒阻碍了空穴从基区向发射区的反向注入，因此 HBT 器件可以获得比同质结发射极更高的电流增益。在非晶硅 HBT 中，受发射极注入限制的共发射极电流增益  $\beta_r$  可以表示为[14]

$$\beta_r = \frac{L_p R_{\square B} \mu_p \mu_n N_{C_B} N_{V_B}}{W_E R_{\square E} \mu_p \mu_n N_{C_E} N_{V_E}} \exp(\Delta E_s / kT) \quad (1)$$

$$(L_n \gg W_B, W_E \gg L_p)$$

这里均采用惯常符号，上式中由于  $\Delta E_s = \Delta E_t - \Delta E_c$ ， $\Delta E_t = E_{t2} - E_{t1}$  和  $\Delta E_c = \chi_1 - \chi_2$ （脚标 1, 2 分别代表单晶硅和非晶硅），由硅和非晶硅的性质可知，若取  $\Delta E_t = (1.65 - 1.10) \text{ eV} = 0.55 \text{ eV}$ ， $\Delta E_c = (4.05 - 3.93) \text{ eV} = 0.12 \text{ eV}$ ，则  $\Delta E_s = 0.43 \text{ eV}$ ，在室温下  $\Delta E_s / kT \approx 17$ ，这时上式  $\beta_r$  的数值很大，因而晶体管的发射极注入效率  $\gamma \approx 1$ 。实际器件的电流增益则由基区输运因子所决定，若忽略界面复合器件的电流增益可近似由下式决定

$$h_{FE} \simeq \frac{2L_n^2}{W_B^2} \quad (2)$$

对重掺杂的基区，基区中的少数载流子扩散长度  $L_n$  实际上是很短的，即使如此，对于只有极薄基区宽度  $W_B$  的微波器件而言仍然能够得到足够大的电流增益。这意味着器件可以允许有较高的基区掺杂浓度而又能维持所需的电流增益。低的基区电阻不仅仅可以提高器件最大振荡频率  $f_{\max}$ ，同时器件的大电流性能也能得到改善。

### 3. 发射极电流集边效应的减弱或消除

双极晶体管中由于基区电流横向流动造成发射结各处正向压降不均匀，从而产生了

发射极电流集边效应。微波功率器件由于高频电流增益下降, 必须增大基极电流才能维持一定的集电极电流。而且微波器件要求薄基区, 这导致基区方块电阻增大, 这两个因素加剧了集边效应。通常解决的办法只有缩小发射极条宽, 也即加大发射极周长与基区面积比值  $L_E/A_B$ 。例如  $x$  波段功率器件<sup>[16]</sup>, 发射极条宽已减小到  $0.75 \mu\text{m}$ ,  $L_E/A_B$  比值为  $11\text{mil}^{-1}$ , 再进一步提高比值, 工艺上十分困难, 因而限制了硅微波功率器件进一步发展。

减小集边效应的另外途径是采用所谓分布式垂直镇流技术<sup>[17]-[18]</sup>, 这在多晶硅发射极已经常常采用。在非晶硅 HBT 中, 通过对辉光放电非晶硅掺杂的调节可以控制非晶硅薄层的垂直电阻在适当的范围里, 起到垂直镇流电阻的作用。这时, 发射极下面注入电流分布可由下式表示<sup>[17]</sup>

$$J_e(x) = \frac{I_e}{2a} \left( \frac{r_b}{h_{f_e} r_{es}} \right)^{1/2} \operatorname{csch} \left( \frac{r_b}{h_{f_e} r_{es}} \right)^{1/2} \cos h \left[ \left( \frac{r_b}{h_{f_e} r_{es}} \right)^{1/2} \frac{x}{a} \right] \quad (3)$$

式中  $J_e(x)$  表示距离发射极中央为  $x$  处的发射极电流密度,  $I_e$  发射极电流,  $a$  发射极半宽度,  $r_b$  内基区电阻,  $r_{es}$  发射极薄层串联电阻,  $h_{f_e}$  电流增益。

图 1 是根据上式画出的镇流电阻  $r_{es} = \frac{r_b}{h_{f_e}}$  和  $r_{es} = \frac{r_b}{5h_{f_e}}$  时, 发射极电流分布情况。从图可见, 当  $r_{es} = \frac{r_b}{5h_{f_e}}$  时, 发射极边缘的电流密度是中心处的 4.5 倍。发射极有效宽度减小, 在较小的发射极电流下, 边缘部份就首先达到大注入所需的电流密度, 出现大注入

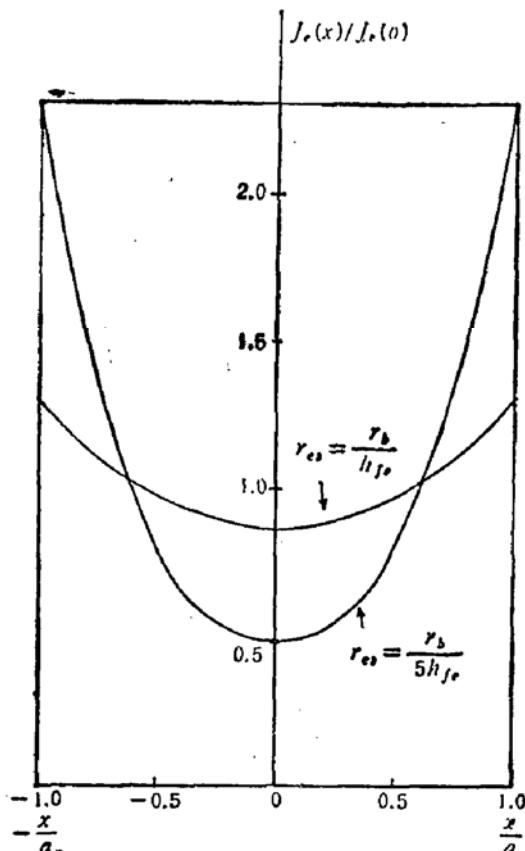


图 1 归一化发射极电流密度  $J_e(x)/J_e(0)$  与归一化发射极距离  $x/a$  的函数关系  
 $a$  是发射极半宽度  $x$  是距发射极中央的距离

效应。当  $r_{es} = \frac{r_b}{h_{je}}$  时,  $J_e(x)$  的分布近似是均匀分布。通过适当控制非晶硅薄层电阻, 使它满足  $r_{es} \geq \frac{r_b}{h_{je}}$ , 就可以减弱或消除集边效应。这时发射极有效面积增大,  $A_e/A_c$  比值增大, 由  $A_e/A_c \propto I_{CM}/C_C$  可知, 这时器件单位电容输出的最大集电极电流增大了, 这无疑改善了器件的微波功率性能。但必须注意, 较大的  $r_{es}$  值将会影响器件的功率增益, 尤其对低压大电流器件这种影响更为明显, 必须严格控制好  $r_{es}$  的数值。由于非晶硅 HBT 内基区电阻  $r_b$  可以做得较小, 与同质结相比, 较小的  $r_{es}$  就可以满足  $r_{es} \geq \frac{r_b}{h_{je}}$ , 从而可实现在减弱或消除发射极电流集边效应的同时又不至于影响器件的功率增益。

### 三、器件制备和实验结果

由器件原理分析可知, 低电压 UHF 功率器件工作电压低, 要达到一定的输出功率要求器件输出电流要大, 而且要有良好的大电流特性。此外, 器件应有较小的集电极电容, 低的基区电阻及较高的  $f_L$ , 以确保在低电压下器件有足够的功率增益。本实验采用较低电阻率和较薄外延厚度的  $n/n^+$  外延硅片, 器件包括 4 个单胞, 每个单胞有 46 条 E, 47 条 B, 每个单元间距为  $11\mu m$ 。发射极周长与基区面积比  $L_E/A_B$  为  $4.0\text{ mil}^{-1}$ , 器件单元结构如图 2 所示。

器件的制备除发射极外均采用常规的硅双极晶体管工艺。在发射极窗口打开之后, 由

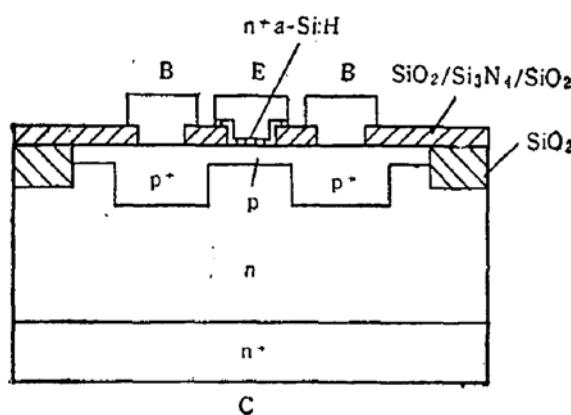


图 2 单发射极条的异质结 UHF 晶体管结构示意图

等离子体辉光放电法淀积厚度约  $0.3\mu m$  的重掺杂的氢化非晶硅 ( $n^+ a\text{-Si:H}$ )。射频频率  $13.56\text{ MHz}$ , 功率  $20\text{ W}$ ,  $\text{SiH}_4/\text{H}_2 \approx 0.005$ ,  $\text{PH}_3/\text{H}_2 \approx 0.03$ , 衬底温度  $270^\circ\text{C}$ 。生长过程中必须很好地控制  $\text{SiH}_4-\text{H}_2-\text{PH}_3$  三者的流量, 才能长出合适电阻率的非晶硅薄层。该层的平均电阻率约在  $0.5\Omega\text{cm}$  左右, 实验测得的非晶硅光学带隙为  $1.8\text{ eV}$ 。样品的 X 射线衍射测量表明在  $10-40^\circ$  范围里没有结晶态衍射峰, 样品的 Raman 谱显示

在  $480\text{ cm}^{-1}$  附近存在一个很宽的波谱——非晶硅特征包络, 而在  $520\text{ cm}^{-1}$  附近不存在对应于单晶或多晶硅的尖峰。分析非晶样品的电子衍射图样照片, 从衍射环的弥漫程度可以判定非晶硅中包含有部分微晶成分, 这正是所要求的。因此严格地讲, 这里的非晶硅是一种以氢化非晶硅为主, 包含有部分微晶成分的非晶硅混合物。由薄层的平均电阻率  $0.5\Omega\text{cm}$ , 采用电子迁移率  $0.8\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ , 可以估计非晶硅薄层的载流子浓度约为  $1.5 \times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ 。

器件基区浅硼扩散结深  $0.2\mu m$ , 方块电阻  $2.5\Omega/\square$ , 内基区表面浓度已达  $5.0 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ , 相应的 UHF 器件的电流增益在 8—25 之间, 这个值略小于早先获得的结果。图

3 给出典型的共发射极输出特性, 显示出较好的大电流特性。

图 4 绘出器件电流增益  $h_{FE}$  对集电极电流  $I_C$  的关系曲线。由图可见, 该器件的电流增益在  $V_{CE} = 4V$ ,  $I_C = 0.6A$  处达到最大值 12, 对应的电流密度为  $4.0 \times 10^3 A/cm^2$ (发射极面积  $A_E = 1.47 \times 10^{-4} cm^2$ )。当电流增益下降到 8 时, 电流密度为  $1.0 \times 10^4 A/cm^2$ , 这个数值接近于器件电流增益下降时集电极临界电流密度的理论计算值  $1.3 \times 10^4 A/cm^2$ 。截止频率  $f_T$  与集电极电流密度  $J_C$  的关系曲线如图 5 所示, 在  $V_{CE} = 9V$ ,  $J_C = 3.0 \times 10^3 A/cm^2$  处,  $f_T$  达到最大值 3.3GHz。从图 4 和图 5 可以看到,  $h_{FE}$  和  $f_T$  有良好的大电流特性。

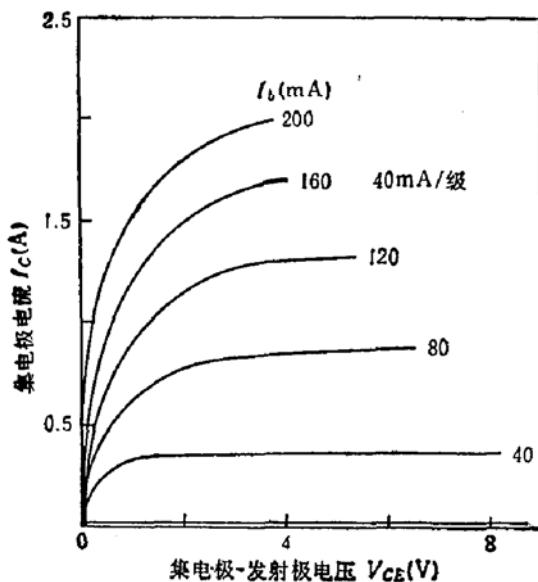


图 3 典型的非晶硅发射极 UHF 晶体管共发射极输出特性曲线

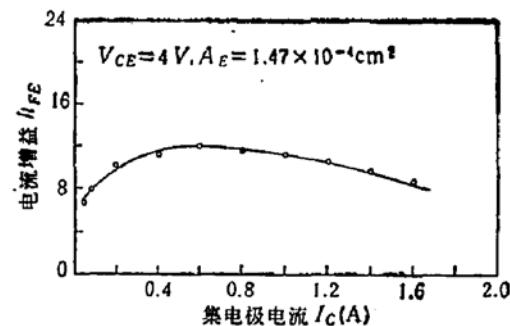


图 4 电流增益  $h_{FE}$  与集电极电流  $I_C$  关系

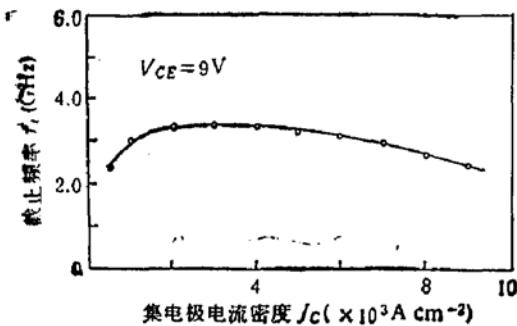


图 5 截止频率  $f_T$  与集电极电流密度  $J_C$  关系

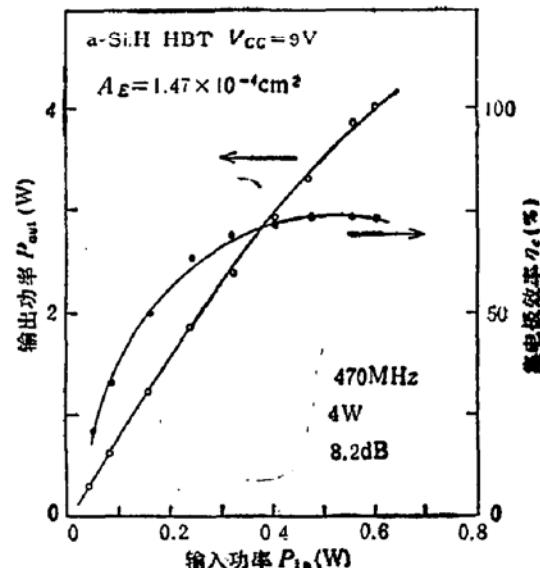


图 6 共发射极连接输出功率集电极效率与输入功率的关系曲线

性,这正是所预料的,也是器件具有优良微波功率性能所必需的。

对微带封装的器件测量表明器件有良好的低电压输出功率性能。图6给出器件输出功率和集电极效率曲线,该器件在9伏电压下,工作频率470MHz,输出4W连续波功率,功率增益8.2dB,集电极效率72%。这是首次报道的非晶硅发射极HBT在低电压工作获得的实验结果,比采用双扩散同质结结构的类似器件功率增益要大3dB左右。

## 四、讨 论

### 1. a-Si:H/c-Si 界面的复合和退火作用

异质结界面态的大小是HBT器件能否做好的关键。毫无疑问,a-Si:H/c-Si异质界面存在着大量的复合中心,深入研究界面复合对器件性能的影响是十分必要的。在目前阶段,为减少复合,器件必须经过低温退火(250—300℃,N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>混合气体),a-Si:H膜中的氢原子能直接填补异质界面的缺陷能级和断键,从而降低界面态密度,减少界面复合电流。经过退火后器件的电流增益可增大1—2倍,小电流增益改善更大。退火温度不宜过高,超过350℃则会引起a-Si:H中氢的大量逸出。温度过低,对电流增益的稳定性不利。

### 2. 非晶硅薄膜质量的控制

影响非晶硅薄膜质量的因素许多<sup>[19]</sup>,诸如衬底温度,射频功率、淀积速率等等。实验表明衬底温度为270℃左右为宜,温度过低膜结构疏松,氢含量过大且加热易于逸去,会影响器件稳定性。温度过高,氢含量过少,隙态密度会高,膜的性能不好。射频功率对a-Si:H薄膜性能也有很大的影响,射频功率大,淀积速率高,但功率过大薄膜的性质变坏。本实验使用20W射频功率,所得的薄膜均匀致密。淀积速率与射频功率、硅烷流量、气体压强等因素有关,为了尽可能获得优良的非晶硅薄膜,采用慢的淀积速率(0.3—0.4Å/s)是有益的。薄膜的平均电阻率控制在0.5Ωcm左右,这时发射极镇流电阻r<sub>e</sub>约为0.1Ω,而器件基区电阻约为0.14Ω,两者已能满足对分布式垂直镇流电阻的要求。

### 3. 非晶硅薄层镇流电阻的负温度效应

温度升高,非晶硅薄层电阻下降,这种负温度效应给功率器件的热稳定性带来了不利的影响。因为功率器件在额定功率条件下工作,最高结温往往高达150℃,有的甚至超过200℃,镇流电阻的负温度效应造成镇流电阻在过热点无法引入有效的负反馈来抑制该点集电极电流的增加。因此以后有必要引入复合镇流电阻结构,使整个复合镇流电阻呈现正温度系数,以改善器件的热稳定性。

### 4. 外基区电阻

异质结双极晶体管容易引起较大的外基区电阻<sup>[20]</sup>,这是这种结构不足之处。已提出一些可能的改进途径。在目前的器件中,采取加深P<sup>+</sup>基极条来减小外基区电阻。据计算,这时外基区电阻仍占总基区电阻的一半以上。在更高的频率中工作时,有必要改进结构,采用自对准工艺来减少EB间距,这样才能充分地发挥宽禁带发射极高基区掺杂浓度的优势。

### 5. 直流电流增益和微波功率增益的稳定性

电流和功率增益的稳定性一直是非晶硅 HBT 器件研究中最受关注的问题。在研究中出现少数器件电流增益不够稳定的现象，从而引起器件参数及功率增益的变化。这种不稳定可能来自两个方面，其一是非晶硅在大电流长时间工作条件下由于发热和氢逸出本身结构引起变化所造成的。另一方面，非晶硅/单晶硅异质界面是一种面接触，在工作电流下这种面接触状况的任何变化将会引起界面复合状态的变化，也就造成电流增益的不稳定。这两方面原因就本质而言可以归因于非晶固体本身结构的不稳定。从热力学角度看，非晶态物质处于亚稳态，它具有比晶态更大的自由能。基于这种认识，可以通过改变非晶硅淀积条件和进行合理的退火，使非晶硅处于较为稳定的亚稳态。经过大量的工艺试验，目前建立的非晶硅淀积工艺条件已能较好地解决器件稳定性问题。封装的器件在 200°C 环境温度下贮存 1000 小时后，经测试电流增益有良好的稳定性，器件微波输出功率和功率增益几乎没有变化。有关该器件稳定性数据和分析将另文发表。

## 五、结 论

总之，利用重掺杂的氢化非晶硅作宽禁带发射极材料，首次制作了高效率低电压异质结功率晶体管。该器件在低电压下具有很好的微波功率性能，这些结果进而确认重掺杂氢化非晶硅是硅异质结功率器件最有发展前途的发射极材料之一。这种器件在需要低电压工作的手持移动通讯中有很好的应用前景。本文的工作为实现非晶硅 HBT 作为微波功率器件前进了一大步，更进一步的研究是需要的。预计采用自对准小尺寸工艺，可以获得更高频率的功率器件。

参加器件工艺的还有茅保华、陈统华、熊承堃、张荣钦和何菊芬等同志，赵仲镛提供外延硅片，单启根提供微波功率测量结果，此外，这项研究得到所长沈克彬、总工程师林金庭教授的支持和指导，在此深表谢意。作者还要感谢北京大学微电子所朱恩均教授有益的讨论和建议。

## 参 考 文 献

- [1] M. B. Das, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-35, 604 (1988).
- [2] S. Prasad, W. Lee, and C. G. Fonstad, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-35, 2288 (1988).
- [3] P. M. Asbeck *et al.*, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-36, 2032 (1989).
- [4] 朱恩均, 电子学报, 7, 77 (1979).
- [5] T. H. Ning and R. D. Isaac, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-27, 2051 (1980).
- [6] T. Matsushita, N. Ohuchi, H. Hayashi, and H. Yamoto, *Appl. Phys. Lett.*, 35, 549 (1979).
- [7] K. Sasaki, M. M. Rahman, and S. Furukawa, *IEEE Electron Device Lett.*, EDL-6, 311 (1985).
- [8] M. Ghannam, J. Nijs, R. Dekeersmacker, and R. Mertens, *IEDM Tech. Dig.*, 746 (1984).
- [9] T. Sugihara *et al.*, *IEEE Electron Device Lett.*, EDL-9, 87 (1988).
- [10] 苏里曼、张书绅, 固体电子学研究与进展, 7, 331 (1987).
- [11] J. Symons *et al.*, *Appl. Phys.*, A41, 291 (1986).
- [12] 王因生等, 固体电子学研究与进展, 9, 109 (1989).
- [13] 朱恩均等, *IEEE Electron Device Lett.*, EDL-10, 4 (1989).
- [14] 王因生等, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-37, 153 (1990).
- [15] 王因生、张晓明、盛文伟、王晓斐, *IEEE Electron Device Lett.*, EDL-11, no. 5, 187 (1990).
- [16] H. T. Yuan and Y. S. Wu, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-25, 731 (1978).
- [17] 朱恩均, in *Proceedings of the 35th ECC*, 392 (1985).

- [18] R. Rosenzweig and D. Carley, IEDM Tech Dig., (1965).  
[19] 何宇亮、陈光华、张仿清,《非晶态半导体物理学》,高等教育出版社,(1989).  
[20] H. Kroemer, Proc. IEEE, 70, 13(1982).

## Low Voltage High Efficient Amorphous-Si Emitter Heterojunction UHF Power Transistors

Wang Yinsheng, Sheng Wenwei, Zhang Xiaoming, and Wang Xiaowen  
(Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing)

### Abstract

An UHF silicon heterojunction bipolar power transistor with a heavily doped hydrogenated amorphous-silicon is reported. The present devices prepared can deliver 4.0 W output power with 72% collector efficiency and 8.2 dB gain at 470 MHz for 9.0 V low supply voltage. The low voltage amorphous-silicon heterojunction bipolar power transistors available in UHF band is reported for the first time.

In addition, the design and fabrication of low voltage power device using this kind of heterojunction emitter structure are discussed, and several viable proposals are given.

**Key words** a-Si: H, Heterojunction, Microwave Bipolar Power Transistor