

SiGe HBTs 高频特性模拟分析

赵立新 沈光地

(北京工业大学电子工程系 北京市光电子技术实验室 北京 100022)

摘要 本文详细分析了下述问题: (1) 在基区厚度减薄到几十纳米后, 发射区时间常数、集电区时间常数对 SiGe HBTs 的高频特性的影响; (2) 低掺杂浓度发射区层对发射区渡越时间的影响; (3) 在发射结耗尽层中, 除了固定电荷因素引起的电容外, 发射结正常工作加正向偏压时, 由于自由载流子注入引起的 EB 结电容。由以上物理分析可以得出器件的有关参数, 并由器件的等效电路, 对器件的高频特性进行分析和模拟, 对影响器件高频特性的参数进行优化

EEACC: 2520C, 2530C, 2560J

1 引言

SiGe 应变层及应变超晶格材料、器件的研究, 显示出 SiGe 器件在高速、高频及光电子领域具有巨大的潜力和应用前景。其中 SiGe HBTs 是发展较快的器件之一^[1-3]。对于 SiGe 合金材料的研究可以追溯到本世纪五十年代, Glickman^[4]对 SiGe 合金层的材料特性进行了测量分析。当 N 型 SiGe 材料中硅含量为 14% 时其能带结构发生变化, Si 组分从 8% 增加到 14% 时, 电阻率的增加霍尔迁移率的下降变得明显。七十年代 Kasper^[5]用超高真空外延技术在 750 °C 衬底温度下, 在 Si 衬底上成功地生长出了 Si_{1-x}Ge_x 超晶格层。其中 Ge 含量 x 为 0.2, 晶格失配达到 $\eta = 8 \times 10^{-3}$ 。通过周期性改变 Si_{1-x}Ge_x 多层结构中的 Ge 组分 x , 从 $x = 0$ 到 $x = 0.15$, 在 Si 衬底上生长出 10~80nm 周期范围的 Si_{1-x}Ge_x 超晶格层, 并成功地采用了单晶生长, 无互扩散, 二维生长和膜晶生长技术。宽禁带发射极双极晶体管思想的提出也可以追溯到本世纪五十年代 Schokley^[6]首先提出了宽禁带发射极双极晶体管的思想, Kroemen 阐述了宽禁带发射区双极晶体管理论。如果发射区比基区有较宽的禁带宽度则发射极注入损失可以降低几个数量级。采用具有适合的发射极效率, 同时发射区比基区有低得多的杂质浓度的晶体管是可以实现的。三十年后, Iyer^[7]等人采用分子束外延 MBE 的方法, 制作出了 SiGe HBTs 器件。

本文详细分析了下述问题: (1) 在基区厚度减薄到几十纳米后, 发射区时间常数、集电区时间常数对 SiGe HBTs 的高频特性的影响; (2) 低掺杂浓度发射区层对发射区渡越时间

赵立新 男, 讲师, 现从事半导体高速器件和集成电路研究
沈光地 男, 教授, 现从事半导体光电器件与物理研究
1998-03-15 收到, 1998-07-21 定稿

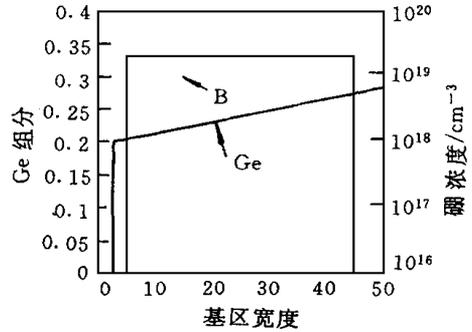
的影响; (3) 在发射结耗尽层中, 除了固定电荷因素引起的电容外, 发射结正常工作加正向偏压时, 由于自由载流子注入引起的 EB 结电容。由以上物理分析可以得出器件的有关参数, 并由器件的等效电路, 对器件的高频特性进行分析和模拟, 对影响器件高频特性的参数进行优化。研制出了特征频率 f_T 为 10GHz, 最大振荡频率 f_{max} 为 5GHz 的 SiGe HBTs 样品。给出了器件的等效电路模型, 对影响器件高频特性的参数及器件的高频特性进行分析和模拟, 比较了器件实测结果与模拟结果。

2 器件结构及特性

采用分子束外延(MBE)技术可以进行二维生长, 抑制三维岛状物的生长和应变弛豫, 形成应变覆晶晶体材料。还可以进行无互扩散影响的原位掺杂, 实现陡峭的杂质分布。在本实验中, 采用分子束外延技术进行低温、低速率外延生长。首先在掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 的低位错密度的 N^+ (100)Si 衬底片上, 进行 N 型 Si 外延层的生长, 生长温度为 800°C , 利用低能 Sb 离子源进行 N 型掺杂, 形成掺杂浓度为 $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, 厚度为 400nm 的高质量外延层。其次在 520°C 条件下, 利用 Si 和 Ge 电子束蒸发源, 束流可以用质谱仪监控, 同时利用高温 B 源进行高浓度 P 型掺杂, 进行外延生长, 形成 P 型 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 应变晶体结构层, Ge 含量 x 从 0.2 到 0.28 递变。然后继续进行 Si 外延生长, 利用低能 Sb 离子源, 用 200V 的加速场加速离子束, 进行 N^- 型掺杂, 形成浓度为 $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 厚度为 100nm 的 N^- 外延层。接着利用 Sb 热蒸发源, 在 300°C 条件下, 生长高掺杂的 N^+ Si 层, 浓度为 $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, 厚度 100nm, 其结构图如图 1 所示。

n^+	Si	$2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$	100nm	Contact
n^-	Si	$5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$	100nm	Emitter
i^-	Si		5nm	Spacer
p^+	SiGe	(see b)	50nm	Base
i^-	Si		5nm	
n^-	Si	$5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$	400nm	Collector
n^+	Si	$5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	500nm	Substrate

(a)



(b)

图 1 SiGe HBTs MBE 生长材料结构图

器件样品研制采用双台面式结构。其发射极面积 $3 \times 18 \mu\text{m}^2$, 基极面积 $23 \times 24 \mu\text{m}^2$ 。发射区台面距基极窗口 $4 \mu\text{m}$, 基极窗口 $2 \times 4 \times 18 \mu\text{m}^2$ 。(1) 将分子束外延 MBE 片进行清洗处理后, 在低压化学气相淀积(LPCVD)炉中, 生长 200nm 厚的 SiO_2 屏蔽层。淀积温度为 300°C , 生长速率为 $30 \text{nm}/\text{min}$ 。然后采用正性光刻胶掩蔽, 刻出基区台面图形。(2) 光刻发射区部分的 SiO_2 掩蔽层, 腐蚀出发射区台面。(3) 在腐蚀出发射区台面的同时, 采用自对准技术, 腐蚀出集电极。(4) 采用等离子体低温淀积方法, 低温淀积 SiO_2 , 淀积速率为 $30 \text{nm}/\text{min}$, 厚度为 300nm, 光刻引线孔, 采用湿法腐蚀技术, 同时腐蚀出发射极、基极、集电极接触窗口;

(5) 采用磁控溅射或真空蒸发淀积的方法蒸铝, 湿法腐蚀出金属图形

器件的直流输出 $I-V$ 特性如图 2 所示 常温下峰值电流放大倍数 β_{max} 为 300, 在低温 77K 下峰值电流放大倍数 β_{max} 为 8100 器件的低温电流放大倍数比在室温下高出许多, 显示出器件的异质结特性 SiGe HBTs 共发射极电流放大倍数为

$$\beta = \frac{n_E v_e N_{CB} N_{VB}}{p_B v_h N_{CE} N_{VE}} \exp\left(\frac{\Delta E_g}{kT}\right) \quad (1)$$

式中 n_E, p_B 为发射区、基区的多子浓度; v_e, v_h 为电子和空穴的速度; $N_{CE}, N_{VE}, N_{CB}, N_{VB}$ 为发射区和基区的导带和价带的有效态密度, ΔE_g 为发射区基区禁带宽度差; k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度 随着温度的降低, 电流放大倍数呈指数关系上升 当然对于本器件, 在低温下会受到在光刻中形成的暴露的外基区 SiGe 层表面的表面复合漏电流影响和 EB 异质结界面态缺陷存在产生的复合电流影响, 使电流的放大倍数的增加比预计的要低一些

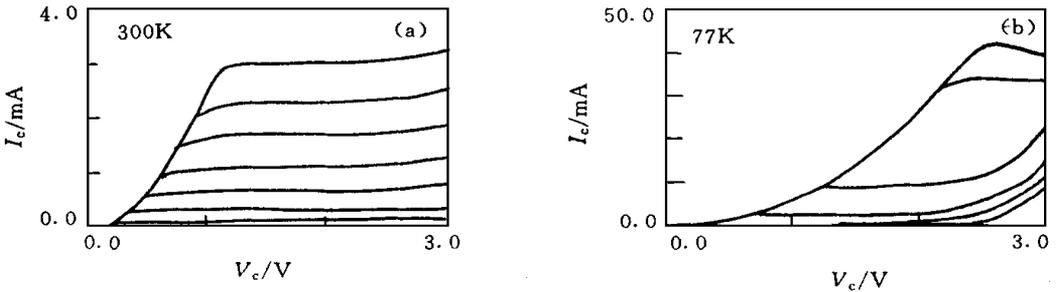


图 2 SiGe HBTs 器件的高低温直流输出特性

- (a) 在室温下, 器件的 $I-V$ 特性, 电流增益为 300, I_b (起始) = $0\mu A$, I_b (步进) = $3\mu A$, I_b (终止) = $21\mu A$;
- (b) 在 77K 下, 器件的 $I-V$ 特性, 电流增益为 8100, I_b (起始) = $0\mu A$, I_b (步进) = $3\mu A$, I_b (终止) = $21\mu A$.

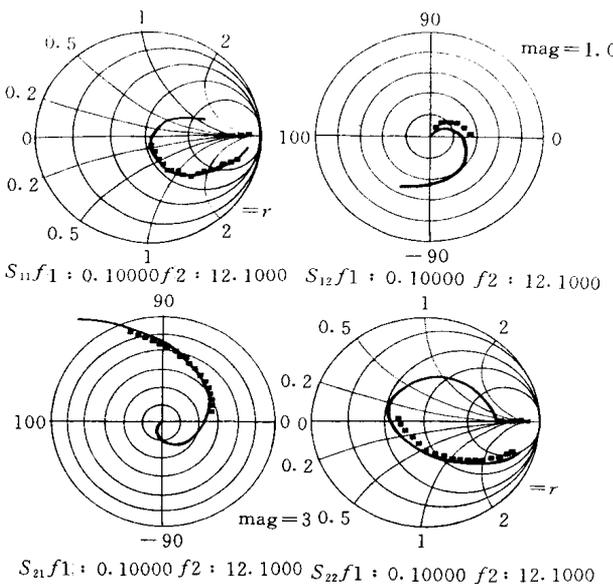


图 3 SiGe HBTs 的 S 参数测量值及模拟值

器件的高频特性如图 3 所示 图中黑方块是测量数据(频率范围 0.10 ~ 6.10GHz), 实线代表模拟结果(频率范围 0.10~ 12.1GHz). 由测量 S 参数和最大功率增益 G_{max} 可以换算出器件的 $|H_{21}|^2, G_{max}$ 按每倍频 6dB 的速率下降到 1 时的频率即特征频率 $f_T = 10GHz$, 最大振荡频率 $f_{max} = 5GHz$ 其高频特性的分析见本文第 3 和第 4 部分.

3 高频特性分析

对于双极器件, 从发射极到集电极的载流子渡越时间 τ_{ec} 包括^[8]: (1) 从发射极到基极的结电容充电时间

τ_c ; (2) 发射结正向偏置时, 少量空穴扩散进入发射区, 在发射区的存贮时间 τ_{ef} ; (3) 基区渡越时间 τ_b ; (4) 集电极耗尽层渡越时间 τ_d ; (5) 集电结电容充电时间 τ_c

$$\tau_{cc} = \tau_c + \tau_{ef} + \tau_b + \tau_d + \tau_c \quad (2)$$

$$\tau_{ef} = \left[\frac{W_E W_B N_B}{2D_{nB} N_E} \right] \exp\left[-\frac{\Delta E_v}{kT} \right] \frac{kT}{\Delta E_{gB}} \quad (3)$$

$$\tau_c = (r_e + R_E)(C_{je} + C_{jc} + C_p) \quad (4)$$

$$\tau_b = \frac{W_B^2}{\eta D_{nB}} + \frac{W_B}{V_{sat}} \quad (5)$$

$$\tau_d = \frac{X_m}{2V_{sat}} = \frac{W_{scr}}{2V_{sat}} \quad (6)$$

$$\tau_c = R_c C_{jc} \quad (7)$$

上式中 W_E, W_B, N_E, N_B 为发射区、基区宽度和掺杂浓度; ΔE_v 为价带带隙; ΔE_{gB} 为基区发射区禁带宽度差; R_E 为发射区串联电阻; r_e 为发射结动态电阻; C_{je} 为发射结电容; C_{jc} 为集电结电容; C_p 为基区杂散电容; V_{sat} 为载流子散射饱和速度; D_{nB} 为基区电子扩散系数; η 为常数; X_m 为集电结耗尽层宽度; W_{scr} 为集电区宽度; R_c 为集电区串联电阻; k 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度; R_c 为集电区串联电阻

下面对于发射区时间常数即公式(4)及发射区串联电阻进行讨论, 发射区由轻掺杂层和重掺杂层组成, 轻掺杂层减小发射结电容, 重掺杂层减小发射极接触电阻。发射区的串联电阻 R_E 由三部分组成: (1) 金属接触电阻 R_{Econ} , (2) 重掺杂区电阻 R_{EH} , (3) 轻掺杂区电阻 R_{EL} 。

$$R_E = R_{Econ} + R_{EH} + R_{EL} \quad (8)$$

在(8)式中,

$$R_{Econ} = \frac{(R_{square} \rho_{con})^{1/2}}{2nl \tanh\left[\frac{s}{2} \left(\frac{R_{square}}{\rho_{con}} \right)^{1/2} \right]} \quad (9)$$

上式中 R_{square} 为与金属接触的高掺杂层方块电阻; ρ_{con} 为金属接触比电阻率; n, l, s 分别为发射极条数、长度和宽度。在(8)式中,

$$R_{EL} = \frac{X_{E1} - X_{E2}}{q\mu_{nL} N_{EL} A_E} \quad (10)$$

$$R_{EH} = \frac{X_{EH}}{q\mu_{nH} N_{EH} A_E} \quad (11)$$

上式中 $X_{EH}, X_{EL}, N_{EH}, N_{EL}, \mu_{nH}, \mu_{nL}$ 分别为重掺杂发射区和轻掺杂发射区的厚度、浓度、电子迁移率; X_{E1} 为发射结耗尽层在发射区一侧的宽度; A_E 为发射极面积。由于轻掺杂发射区的浓度比重掺杂基区的浓度低, 所以对于此器件在轻掺杂区侧的耗尽层宽度不能忽略, 由公式(10)和(4)可以看出, R_{EL} 受发射结空间电荷层厚度而调制, 而空间电荷层受外加电压 V_{bc} 影响, 随外加电压 V_{bc} 的变化使 R_E 变化, 对发射区时间常数产生影响。

对于发射结电容, 更多的是讨论其在正向偏压下的电容, 发射结电容 C_{je} 由三部分组成: (1) EB 结空间电荷区产生的势垒电容 C_{TE} , (2) 在空间电荷势垒区以外的几个扩散长度内的非平衡载流子随外加电压变化而产生的扩散电容 C_{DE} , (3) 在发射结正偏时, 在空间势垒区中, 由于自由载流子的注入, 电荷贮存随外加偏压变化而引起的电容 C_F 。

$$C_{je} = C_{TE} + C_{DE} + C_F \quad (12)$$

$$C_{TE} = \frac{A_E \epsilon_E \epsilon_B}{X_1 \epsilon_B + X_2 \epsilon_E} \quad (13)$$

$$C_{DE} = \frac{q(n_B L_{nB} + p_E L_{pE})}{kT} \exp\left(\frac{qV_{be}}{kT}\right) \quad (14)$$

上式中 ϵ_E 、 ϵ_B 为发射区、基区的介电常数; X_1 、 X_2 为发射结在发射区、基区侧的耗尽层宽度; n_B 、 L_{nB} 、 p_E 、 L_{pE} 分别为基区、发射区的电子和空穴浓度、扩散常数; V_{be} 为外加偏压 下面讨论 C_F ^[9]:

当 $V_{be} < V_{bi} - \frac{5kT}{q}$ 时,

$$\begin{aligned} C_F = & \frac{0.5qA_E X_1 N_{EL}}{kT} \frac{dV_{B1}}{dV_{be}} F^2 \left[- \frac{qV_{B1}}{kT} \right] \exp\left(\frac{qV_{B1}}{kT}\right) \\ & - \frac{0.5qA_E N_{EL}}{kT} \frac{dX_1}{dV_{be}} \left[1 - F\left(\frac{-qV_{B1}}{kT}\right) \right] \\ & - \frac{0.5qA_E N_{EL} X_2}{kT} \frac{n_{iEB}}{n_{iEE}} \frac{dV_{B1}}{dV_{be}} + qA_E F^2 \left[\frac{-q(V_{B1} + \Delta V_i)}{kT} \right] \exp\left[\frac{q(V_{B1} + \Delta V_i)}{kT}\right] \\ & + \frac{0.5qA_E N_{EL} X_2}{kT} \frac{n_{iEB}}{n_{iEE}} F^2 \left[\frac{-q(V_{BT} + \Delta V_i)}{kT} \right] \exp\left[\frac{-q(V_{BT} + \Delta V_i)}{kT}\right] \\ & - \left. 0.5qA_E N_E \frac{dX_2}{dV_{be}} \frac{n_{iEB}}{n_{iEE}} \left\{ F\left[\frac{-q(V_{BT} + \Delta V_i)}{kT}\right] - F\left[\frac{-q(V_{B1} + \Delta V_i)}{kT}\right] \right\} \right\} \quad (15) \end{aligned}$$

当 $V_{be} > V_{bi} - \frac{5kT}{q}$ 时,

$$C_F = C_{F(v=V_{bi}-5kT/q)} \exp\left(-\frac{V_{be} - V_{bi} + \frac{5kT}{q}}{\frac{4kT}{q}}\right) \quad (16)$$

在(15)中:

$$F(y) = \frac{1}{0.27 + \exp(-y)} \quad (17)$$

在(15)、(16)式中, X_1 为正偏时 EB 结耗尽层落在发射区部分; X_2 为正偏时 EB 结耗尽层落在基区部分; dX_1/dV_{be} 、 dX_2/dV_{be} 为在 EB 结空间电荷区分别在发射区侧和基区侧的耗尽层厚度随外加偏压的变化; V_{B1} 、 V_{B2} 为在 X_1 、 X_2 上的偏压; dV_{B1}/dV_{be} 、 dV_{B2}/dV_{be} 为在 X_1 、 X_2 上的偏压 V_{B1} 、 V_{B2} 随外加偏压 V_{be} 的变化; N_{EL} 为轻掺杂发射区浓度; N_B 为基区掺杂浓度; A_E 为发射区面积; ϵ_E 、 ϵ_B 为发射区基区介电常数; V_{BT} 为 EB 结内建电势与外加偏压之差; V_{bi} 为 EB 结内建电势; V_{be} 为 BE 结外偏压; n_{iEE} 、 n_{iEB} 发射区、基区本征载流子浓度; $F(y)$ 为一中间代换函数; ΔE_i 为禁带中线能级, $\Delta V_i = \Delta E_i/q$

对于集电结电容, 由于其为反偏加压, 可以近似认为主要为势垒电容构成:

$$C_{jc} = A_C \sqrt{\frac{qN_B N_C \epsilon_B \epsilon_C}{2(\epsilon_B N_B + \epsilon_C N_C)(V_{bic} + V_{cb})}} \quad (18)$$

上式中 A_C 为集电极面积; N_B 、 N_C 、 ϵ_B 、 ϵ_C 分别为基区和集电区掺杂浓度和介电常数; V_{bic} 为 BC 结内建电势; V_{cb} 为 BC 结外偏压

在采用了高掺杂的 SiGe 应变层作基区, 基区厚度减少到几十 nm 后, 基区的渡越时间大幅度降低, 随之而来, 发射区、集电区渡越时间更加凸现出来, 减小发射区渡越时间的有效方法之一, 就是降低发射区掺杂浓度, 使发射结电容降低, 但是发射区浓度 N_E 的下降, 使这一部分的串联电阻加大, 对发射区渡越时间不利, 所以需要折中考虑 另外在材料的实际生长过程中比如 MBE 过程中, 重掺杂发射区与轻掺杂发射区的界面态缺陷的存在, 相对于只有高掺杂发射区的器件, 将引起附加的电容和电阻, 增加发射区渡越时间 而只含有单层高掺杂区发射极的器件则不存在这个问题

4 高频特性模拟

由上述对发射结和集电结的物理分析, 理论上可以近似计算出器件的有关电阻和电容值见表 1.

表 1 SiGe HBT 等效模型参数

符号	数值 $\Omega/\rho F/nH$	符号	数值 $\Omega/\rho F/nH$	符号	数值 $\Omega/\rho F/nH$	符号	数值 $\Omega/\rho F/nH$
R_{b1}	53.313	R_{c1}	6.313	C_{b3}	43.700	C_e	0.032
R_{b2}	34.722	R_{c2}	6.313	C_{padb}	51.796	L_c	0.324
R_{b3}	15.215	R_E	12.5	C_{pade}	51.796	L_e	0.102
R_{b32}	4.762	R_{be}	2.6	C_{sbe}	0.565	L_b	0.665
R_{padb}	13.33	C_{rb3}	110	C_{sbc}	0.017		
R_{bc}	12000	C_{b1}	24.971	C_{sce}	0.711		
R_{pade}	1.399	C_{b2}	31.214	C_{je}	0.126		

影响器件的高频性能的主要参数包括发射结电容 C_{je} 、集电结电容 C_{jc} 、发射区电阻 R_E 、基区电阻 (R_{b1} 、 R_{b2} 、 R_{b3}) 等参数 包括有管壳寄生参数的 SiGe HBTs 器件的等效电路模型^[10] 如图 4 所示 等效电路图中元件值在表 1 中 图中, R_{b1} 、 R_{b2} 、 R_{b3} 、 R_{b32} 、 C_{b1} 、 C_{b2} 、 C_{b3} 、 C_{rb3} 分别为

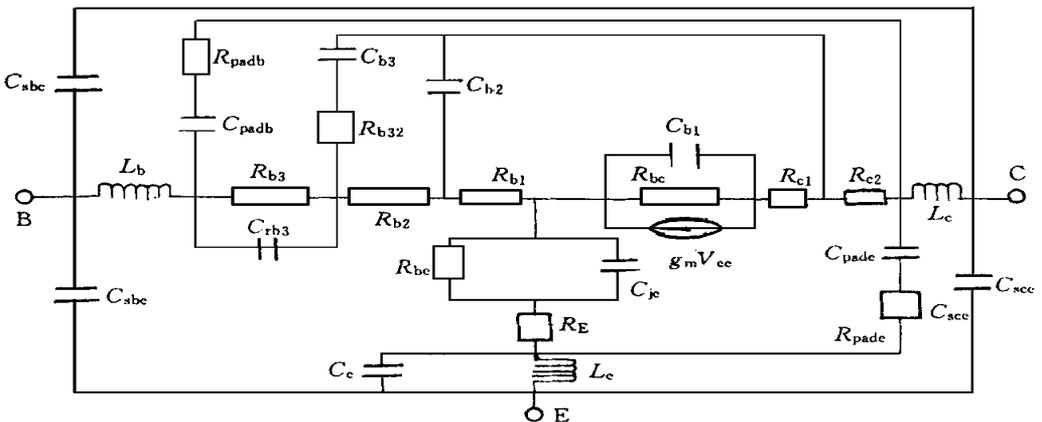


图 4 SiGe HBTs 小信号等效电路图

基区电阻和电容, R_{padb} 、 R_{pade} 、 C_{padb} 、 C_{pade} 分别为基极, 发射极压柄及压柄下介质与集电极间的电容和电阻, R_{bc} 、 R_E 、 C_{je} 为发射极电阻和电容, R_{c1} 、 R_{c2} 为集电极电阻, L_b 、 L_c 、 L_e 为基极、发射

极、集电极引线电感, C_{sb0} , C_{sbc} , C_{scc} 为管壳的基极、发射极、集电极之间电容, R_{bc} 为集电极输出电阻, C_e 为发射极引线电容, $g_m V_{ce}$ 为受发射结电压控制的集电极电流源

由其等效模型, 对器件高频特性, 在 50Ω 阻抗输入输出系统上进行模拟分析, 模拟结果如图 3 所示. 同时在 HP8541 网络分析仪上对器件进行了测量, 测量分析结果如图 3 所示, 与分析模拟结果相吻合.

5 结束语

异质结器件的优点之一, 就是在不影响器件的发射效率的前提下 (由于发射极禁带宽度比基极禁带宽度宽, 使发射注入效率呈指数关系提高), 采用低掺杂浓度的发射区, 可以使发射结电容有较大的降低, 从而使发射区渡越时间迅速下降, 但是随之而来的问题是低掺杂发射区电阻的增加, 及低掺杂发射区与高掺杂发射区在生长过程中的界面缺陷的引入. 优点之二是在不影响器件的发射效率的前提下, 采用了高掺杂薄基区, 可使其厚度减薄到几十 nm, 其渡越时间已迅速减小, 这时问题是发射结、集电结的电容影响将更加突出, 本文详细讨论了异质结器件的这些问题, 并讨论了由其带来的对器件高频特性的影响, 给出了器件的高频小信号等效电路, 对器件高频特性进行了模拟分析.

参 考 文 献

- [1] A. Schuppen, U. Erben, A. Gruhle *et al* , "Enhanced SiGe Heterojunction Bipolar Transistors with 160 GHz f_{max} ", Tech Dig IEDM, 1995, p734
- [2] A. Schuppen, A. Gruhle, U. Erben *et al* , "Multi emitter finger SiGe-HBTs with f_{max} up to 120 GHz", Tech Dig IEDM, 1994, p377.
- [3] G. L. Patton *et al* , IEEE Electron Device Lett, 1990, EDL-11: 171.
- [4] M. Glicksman, Phys Rev, 1955, 100: 1146
- [5] E. Kasper, H. J. Herzog and H. Kibbel, Appl Phys, 1975, 8: 199.
- [6] W. Schokley, U. S. patent, 1951, 2, 569, p347.
- [7] S. S. Iyer, G. L. Patton, S. L. Delaye *et al* , "Silicon-Germanium Base Heterojunction Bipolar Transistors by Molecular Beam Epitaxy", Tech Dig IEDM, 1988, p874
- [8] S. M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", second edition, New York, John Wiley & Sons, 1981, p127.
- [9] J. J. Liou, F. A. Lindholm and D. C. Malocha, J. Appl Phys, 1988, 63: 5015
- [10] H. F. Chan and Y. C. Kao, "High f_{max} InAlAs/InGaAs Heterojunction Bipolar Transistors", Tech Dig IEDM, 1993, p783

Analyze and Simulation of High Frequency Performance of SiGe HBTs

Zhao Lixin, Shen Guangdi

*(Department of Electronic Engineering, Beijing Polytechnic University,
and Beijing Optoelectronic Technology Laboratory, Beijing 100022)*

Received 15 March 1998, revised manuscript received 21 July 1998

Abstract In this paper, we analyze the following problems in detail. They are: (1) the emitter delay time and the collector delay time they have become more important factors influencing on the cutoff frequency f_T of SiGe HBTs, when the base width reduces to few hundreds angstrom; (2) the influence of the low doping emitter layer to the emitter delay time; (3) the free carrier injection in the emitter base space charge region that will result an additional capacitance, besides the capacitance resulting from the change of the fixed charges in the heterojunction, for an heterojunction operating at forward bias. Hence, we give an equivalent circuits of SiGe HBTs, analyze and optimize the high frequency parameter of SiGe HBTs, simulate the high frequency performance of SiGe HBTs. We have fabricated the SiGe HBTs with the cutoff frequency f_T of 10GHz, and the maximum oscillator frequency f_{max} of 5GHz. The results of test are in fit with the ones of simulation.

EEACC: 2520C, 2530C, 2560J