

# 低温硅双极晶体管的研制与特性分析

郑云光 郭维廉 李树荣

(天津大学电子系 天津 300072)

**摘要** 采用多晶硅电极接触三区(发射区、基区、集电区)低掺杂同质结结构,已研制出电流增益在  $77\text{K} h_{FE} = 220-297$ ; 在  $6.2\text{K} h_{FE} = 12.3$ ; 在  $10\text{K} h_{FE} = 21.7$ ,  $\beta = 42$  的低温双极晶体管. 本文还用隧穿机理推导出  $h_{FE}(T)$  的新的表示式,很好地解释了这种器件的  $h_{FE}$  温度特性、Gummel 特性和  $h_{FE}-I_C$  特性.

EEACC: 2560J

## 1 引言

我们研制的低温硅双极晶体管主要用于碲镉汞 (HgCdTe) 红外探测器. HgCdTe 红外探测器是航天技术和国防建设上需要的一种探测器件,而低温 (77K) 硅双极晶体管是 HgCdTe 红外探测器必不可少的信号放大器件. 低温双极晶体管既有常规双极晶体管所没有的低温下电流放大能力;而且与低温 MOS 晶体管和结型场效应晶体管相比,又具有低的  $1/f$  噪声、低输入阻抗等优点<sup>[1]</sup>.

HgCdTe 红外探测器对其所用的低温双极晶体的要求是“三低二高”,即低温、低噪声、低输入阻抗、高  $\beta$  和高可靠性,其器件参数指标为(均指在 77K):

1.  $h_{FE} \geq 150 (I_C = 2-5\text{mA})$ ;
2.  $BV_{CEO} \geq 15\text{V} (I_{CE} = 10\mu\text{A})$ ;
3. 其它直流参数与常规晶体管室温值相近;
4.  $f_T \geq 10\text{MHz}$ ;
5. 低频噪声电压  $V_N = 10^{-9}-10^{-8}\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ ;
6. 输入阻抗  $R_i = 200-1\text{k}\Omega$ .

根据以上参数要求,我们选用了多晶硅电极接触三区低掺杂同质结低温晶体管结构,经过精心设计和严格的工艺参数控制,仅用了半年时间研制出满足上述参数指标要求的可用于 HgCdTe 红外探测器的低温双极晶体管.

## 2 器件结构选择和关键工艺

根据目前已发表的资料,低温晶体管有三种不同的结构:

**2.1 多晶硅电极接触三区低掺杂同质结结构<sup>[2]</sup>** 此种结构的特点是: (1) 器件的发射区、基区、集电区掺杂浓度依次都比常规晶体管低 1.5—2 个数量级, 发射区具有  $n^+$  多晶硅接触; (2) 在室温下具有非常高的  $h_{FE}$  值,  $h_{FE}$  随温度降低而缓慢下降, 在 77K 仍具有足够大的  $h_{FE}$  值, 文献[2]的  $h_{FE}$  达到 2000; (3) 由于同质结结构, 故低频  $1/f$  噪声较低且可靠性较高; (4) 由于低掺杂浓度, 故输入阻抗较高; (5) 用常规工艺制造。

**2.2 多晶硅或非晶硅发射极异质结晶体管结构<sup>[3]</sup>** 此种结构的特点是: (1) 由  $n^+$  多晶硅或  $n^+$  非晶硅作为发射极的主要部分, 可包括超薄  $SiO_2$  或不包括超薄  $SiO_2$  层, 可包含较薄  $n^+$  单晶发射区或不包括  $n^+$  单晶发射区; (2) 在室温下具有稍高的  $h_{FE}$  值, 但随温度下降很慢, 故在 77K 仍能保持一定的  $h_{FE}$  值, 其低温  $h_{FE}$  值不易作到很高; (3) 由于异质结, 界面问题影响较大, 故  $1/f$  噪声和器件稳定性稍差, 往往存在经多次测量后参数退化现象; (4) 由于异质结, 增大了发射效率, 故在基区浓度较高的情况下, 可得到较高的  $h_{FE}$ , 因此其基区浓度较前一种结构高, 输入阻抗可能略低; (5) 用常规工艺制造。

**2.3 赝异质结结构<sup>[4]</sup>** 此种结构的特点是: (1) 与常规双极管相反, 基区掺杂浓度高于发射区, 故基区禁带变窄量大于发射区, 致使基区的有效禁带宽度小于发射区, 故称为赝异质结; (2) 由于基区禁带变窄量大于发射区禁带变窄量, 故具有  $h_{FE}$  负温度系数, 室温  $h_{FE}$  值较小, 而低温  $h_{FE}$  却较大(可达到 100 以上); (3) 实际为同质结, 故  $1/f$  噪声较低, 可靠性较高; (4) 输入阻抗较低; (5) 由于结构上的不同, 用常规工艺难于制造。

根据以上三种低温晶体管的不同结构及其特点, 我们认为研制供 HgCdTe 红外探测器用的“三低二高”低温晶体管选用第一种多晶硅接触三区低掺杂同质结结构比较合适, 它易于制造低温下高  $h_{FE}$ 、低  $1/f$  噪声和高可靠性的器件, 至于输入阻抗我们在设计中尽可能使它降低。

选用此种结构时, 在制造工艺方面应严格控制三个关键问题: (1) 由于基区掺杂浓度在  $10^{16}cm^{-3}$  的数量级(比常规晶体管的  $10^{18}cm^{-3}$  低两个数量级), 故基区表面极容易因  $SiO_2$  层带正电荷而呈耗尽甚至反型状态, 这将引起基极漏电流增大, 而使  $h_{FE}$  降低(尤其是小电流的  $h_{FE}$ ), 在本制造工艺中采用了 HCl 氧化、基区表面薄层附加掺杂, 离子注入后以干氧 HCl 氧化代替低温淀积  $SiO_2$ , 氧化后氮气退火, 用 PI 胶(含负电荷)进行二次钝化等措施来保证较低的氧化物可动电荷和固定电荷(经检测可动电荷密度在  $10^{10}cm^{-2}$  数量级, 固定电荷一般也小于  $1 \times 10^{11}cm^{-2}$ )以防止基区表面耗尽或反型。(2) 严格控制多晶硅中的掺杂深度。如深度不够则存在本征多晶硅层造成发射极串联电阻过大; 如深度过大, 则会使  $n^+$  单晶发射区表面浓度过大,  $h_{FE}$  温度特性变坏, 其深度以达到多晶硅/单晶硅界面最合适。(3) 每次离子注入后需充分地退火, 以消除注入产生的缺陷, 如前一次注入后退火不彻底, 则易引起下一次注入后退火时的增强扩散使结深难以控制或缺陷消除不彻底会引入额外的复合中心, 加大载流子的复合, 使  $h_{FE}$  变小。

### 3 电流增益的温度特性

假设  $n^+$  多晶硅和  $n^+$  单晶发射区之间存在超薄氧化层, 一般厚度为 1—3nm, 单

晶发射区的空穴以隧穿方式穿过超薄氧化层。这样我们可以得到隧穿  $n^+$  多晶硅和  $n^+$  单晶硅之间界面氧化层的隧穿空穴电流密度为<sup>[3]</sup>

$$J_{pT} \approx q \sqrt{\frac{kT}{2\pi m_h^*}} \cdot \frac{P_h}{N_{D2}} n_{i2}^2 \exp\left[\frac{q}{kT} (V_{BE} - \phi_s)\right] \quad (1)$$

其中  $m_h^*$  为有效空穴质量,  $P_h$  为空穴隧穿几率,  $N_{D2}$  为  $n^+$  单晶发射区掺杂浓度,  $n_{i2}$  为  $n^+$  单晶发射区的有效本征载流子浓度,  $\phi_s$  为超薄  $\text{SiO}_2$  与  $n^+$  单晶区界面的表面电势,  $V_{BE}$  为发射结上的正偏电压,  $q$  为电子电荷,  $k$  为波尔兹曼常数,  $T$  为绝对温度。

由基区注入发射区的空穴电流密度为

$$J_p = \frac{qn_{i0}^2}{G_e} \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) \quad (2)$$

其中  $n_{i0}$  为轻掺杂区的本征载流子浓度,  $G_e$  为发射区的 Gummel 数。假设在单晶发射区中空穴扩散长度远大于  $n^+$  单晶区厚度, 其体复合可忽略; 而且漂移电流和扩散电流相比可以忽略。因此  $J_p = J_{pT}$ , 由(1)式和(2)式得

$$G_e = \frac{N_{D2}}{P_h} \sqrt{\frac{2\pi m_h^*}{kT}} \exp\left[-\frac{q}{kT} (\Delta V_{se} - \phi_s)\right] \quad (3)$$

其中  $q\Delta V_{se}$  为重掺杂  $n^+$  单晶发射区禁带变窄量,  $\Delta V_{se} = \left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(\frac{n_{i2}}{n_{i0}}\right)^2$ 。由发射区

注入基区的电子电流密度为

$$J_n = \frac{qn_{i0}^2}{G_b} \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) \quad (4)$$

其中基区的 Gummel 数为

$$\begin{aligned} G_b &= \int_0^{w_b} \left(\frac{n_{i0}}{n_{ib}}\right)^2 \frac{N_A}{D_{np}} dx = \int_0^{w_b} \frac{q\mu_{pb}N_A dx}{q\mu_{pb}D_{nb}} \exp\left(-\frac{q\Delta V_{sb}}{kT}\right) \\ &= \frac{1}{q\mu_{pb}D_{nb}R_{\square b}} \exp\left(-\frac{q\Delta V_{sb}}{kT}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

于是

$$\begin{aligned} h_{FE} &\approx \frac{J_n}{J_p} = \frac{G_e}{G_b} = \frac{qN_{D2}}{P_h} \sqrt{\frac{2\pi m_h^*}{kT}} \mu_{pb}D_{nb}R_{\square b} \\ &\quad \times \exp\left[-\frac{q}{kT} (\Delta V_{se} - \Delta V_{sb} - \phi_s)\right] \end{aligned} \quad (6)$$

由于在设计中  $N_{D2}$  大于 Mott 跃迁的临界掺杂浓度  $(3-4) \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , 因此  $N_{D2}$  与温度关系不密切。而  $\mu_{pb}$ 、 $D_{nb}$  和  $R_{\square b}$  是温度的函数, 所以, (6)式可表示为

$$h_{FE} \approx \eta(T)R_{\square b} \exp\left[-\frac{q}{kT} (\Delta V_{se} - \Delta V_{sb} - \phi_s)\right] \quad (7)$$

或

$$h_{FE} \approx A \frac{R_{\square b}}{T^{2.5}} \exp\left[-\frac{q}{kT} (\Delta V_{se} - \Delta V_{sb} - \phi_s)\right] \quad (8)$$

其中  $A$  为与温度无关的常数, 并假设  $\mu \propto T^{-\frac{3}{2}}$ 。(7)式和文献[5]假设  $n^+$  多晶硅和  $n^+$  单

晶硅界面没有氧化层而存在掺杂浓度分布尖峰, 并根据热电子发射理论推导出来的多晶硅发射极接触结构的  $\beta_{poly}(T)$  表示式类似. 文献[5]、[6]已证实, 在  $T < 200K$  时, 基区方块电阻  $R_{\square b}$  随温度下降而指数增加, 即在低温下载流子冻结效应使  $R_{\square b}$  增加, 有利于低温电流增益的提高, 这和文献 [2] 的看法是一致的. 在此温度范围内, (8) 式中的  $(R_{\square b}/T^{2.5})$  随  $T$  下降而增加, 这结果和文献[5]、[7]中金属接触发射极结构的  $\beta_{metal}(T)$  表示式中指数项前面部分的温度依赖关系大体上一致. 可见, (7) 式可用来解释  $n^+$  多晶硅和  $n^+$  单晶发射区之间有超薄  $SiO_2$  或无超薄  $SiO_2$  层的多晶硅发射极晶体管  $h_{FE}$  的温度依赖关系.

### 4 器件设计

#### 4.1 版图设计考虑

根据 HgCdTe 红外探测器对其所用的低温双极晶体管的参数指标要求, 我们确定所研制的低温晶体管的  $I_{CM} = 5mA$ . 由于我们选用三区低掺杂多晶硅发射极接触结构, 所以要改善小电流  $\beta$ , 达到 77K  $I_C = 2-5mA$  下  $\beta > 150$  的要求, 除了采用掺氯氧化、适当增加基区表面掺杂浓度、氮气氛退火和 PI 胶钝化外, 在版图设计上则希望尽量减小发射区周长  $L_E$ , 以减小基区表面复合和发射结势垒复合. 但是三区低掺杂又不允许  $L_E$  过小. 原因是在三区低掺杂情况下, 集电区掺杂浓度  $N_C$  和基区平均杂质浓度  $\bar{N}_b$  都比常规双极晶体管的相应参数值小得多, 因此将导致其受有效基区扩展效应限制的集电极临界电流密度  $J_{cr}$  和受基区电导调制效应限制的发射极最大电流密度  $J_{EM}$  显著减小. 也就是说三区低掺杂将导致  $J_{CM}$  减小. 而  $I_{CM} = A_{eff} \cdot J_{CM}$ , 所以要保证一定的  $I_{CM}$  值, 在  $J_{CM}$  减小的情况下, 就要求适当增大发射区有效面积  $A_{eff}$ , 这样  $L_E$  就不能太小了. 此外, 低温下载流子冻结效应, 可能导致上述两个效应提前发生, 使  $J_{cr}$  和  $J_{EM}$  进一步减小. 基于上述原因, 我们采用梳状结构, 适当增加  $L_E$ . 为了不使三区低掺杂导

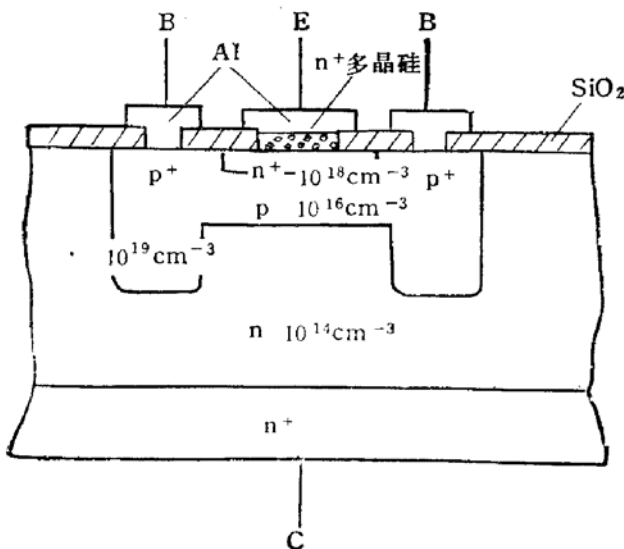


图 1 低温晶体管的纵向结构原理图

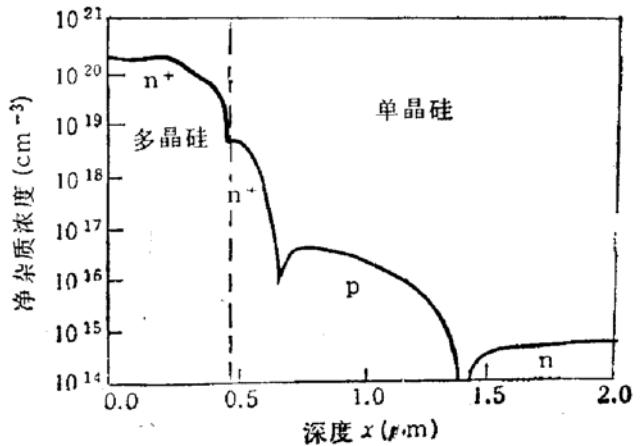


图 2 用 SUPREM-3 模拟的低温双极晶体管各区净杂质分布图

致基区电阻  $r_b$  和输入阻抗  $R_i$  过大,我们增加了浓硼基区扩散。

#### 4.2 工艺参数设计考虑

我们设计的低温晶体管纵向结构原理图如图 1 所示。由于低温双极晶体管各区掺杂浓度和结深的控制精度要求不同,我们采用了不同的掺杂方法。如浓基区掺杂  $10^{19}\text{cm}^{-3}$ , 采用热扩散方法;单晶发射区  $10^{18}\text{cm}^{-3}$ 、基区  $10^{16}\text{cm}^{-3}$  和多晶硅发射区  $10^{20}\text{cm}^{-3}$ , 均采用离子注入掺杂方法。因为离子注入更容易实现低浓度掺杂和准确控制结深。用于发射极接触的多晶硅膜 (300—400nm) 的淀积采用 LPCVD 法。

单晶发射区掺杂浓度的设计,考虑了两个方面的,一个是使发射区重掺杂禁带变窄效应减到最低限度,另一个是保证其掺杂浓度高于 Mott 跃迁所要求的临界掺杂浓度。所以选取了约  $5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 。基区掺杂浓度取  $3 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$  是为了保证有足够大的晶体管的发射效率,同时又不使基区载流子冻结效应过于严重。集电区掺杂浓度取  $7 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$ , 是为了减小 P 型基区的杂质补偿度,同时又使 Kirk 效应不致过早发生。用工艺模拟程序 SUPREM-3 模拟的低温双极晶体管纵向净杂质浓度分布示于图 2。

### 5 结果和讨论

表 1 表示低温双极晶体管  $h_{FE}$  的低温下降倍率。如表 1 所示,典型的低温双极晶体管从 300K 至 77K  $h_{FE}$  一般下降 3.8—5 倍,而常规双极晶体管一般下降 20—100 倍。(7)式是低温硅双极晶体管的  $h_{FE}(T)$  表示式。(7)式指数项中的  $(\Delta V_{E_c} - \Delta V_{E_b} - \phi_s)$  是影响  $h_{FE}$  温度特性的主要因素。从(7)式可知,低温硅双极晶体管  $h_{FE}$  的低温下降率较小的原因有三个:(1)由于其单晶发射区掺杂浓度为  $5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ , 所以其重掺杂效应引起的禁带变窄量  $q\Delta V_{E_c}$  比常规双极晶体管小得多,使(7)式指数项中的  $(\Delta V_{E_c} - \Delta V_{E_b} - \phi_s)$  减小。(2)由于采用了多晶硅发射极接触,在  $n^+$  多晶硅和  $n^+$  单晶发射区之间

表 1 典型的低温硅双极晶体管  $h_{FE}$  的低温下降倍率

样管号	LTT1	LTT2	LTT3	LTT5	LTT11
温度					
300K	1059	968	1111	1429	1280
77K	252	210	294	294	255
从 300K 至 77K $h_{FE}$ 下降倍率	4.2	4.6	3.8	4.9	5.0

的界面(有超薄  $\text{SiO}_2$  层或存在掺杂浓度尖峰)一般存在空穴反注入的势垒高度  $\phi_s$  (对常规双极晶体管,  $\phi_s = 0$ ), 使指数项中  $(\Delta V_{E_c} - \Delta V_{E_b} - \phi_s)$  进一步减小。(3)其基区掺杂浓度比常规双极晶体管低得多,故在低温下基区载流子冻结效应较严重,使  $R_{D_b}$  增加幅度较大,这有利于提高低温下的  $h_{FE}$ 。这就是多晶硅电极接触三区低掺杂同质结晶

晶体管容易实现低温高  $h_{FE}$  的原因。

图 3 表示低温双极晶体管  $I_C, I_B$  随  $V_{BE}$  变化 (Gummel 特性)。

由图可知,在 300K 和 77K 下,在小注入时  $\ln I_C$  随  $V_{BE}$  的变化近似为理想特性,即接近于和  $qV_{BE}/kT$  (非理想因子  $n \approx 1$ ) 成正比。这说明  $I_C$  主要是由理想成分扩散电流构成。在 300K 小注入条件下,  $\ln I_B \propto qV_{BE}/1.44kT$ , 这说明由于基区掺杂浓度很低,在正偏情况下,其发射结势垒区较宽,在工艺不够完善的条件下,发射结空间电荷区的复合电流较大,导致  $n > 1$ ; 在  $I_B \approx 10^{-5}A$  时,  $\ln I_B \propto qV_{BE}/2.89kT$ , 这时  $I_B$  和理想特性的偏离主要是由于基区电阻较大引起的,根据在大注入下  $I_B-V_{BE}$  曲线和理想特性的偏离我们可以测量样品管的基区电阻  $r_b$ <sup>[8]</sup>。在 77K 小注入条件下,  $\ln I_B \propto qV_{BE}/2.65kT$ , 说明在低温下,由于本征载流子浓度  $n_i$  变小,要达到  $10^{-5}A$  同样大的  $I_B$ ,要求  $V_{BE}$  增大(与实验结果相符)。因  $E_{Fn} - E_{Fp} = qV_{BE}$ , 故  $V_{BE}$  增大,准费米能级  $E_{Fn}$  和  $E_{Fp}$  之间能量间隔增大,有效的界面陷阱能级数增多,从而引起发射结空间电荷区的复合电流增大。此外,  $V_{BE}$  增大,发射结势垒区电场强度  $E$  减小,可能导致  $n > 2$ <sup>[9]</sup>。故在 77K 温度下基极电流的非理想因子  $n$  较大。我们在低温小注入下测得的基极电流的非理想因子  $n = 2.65$  和文献[9]的测试结果 ( $n \approx 2.5$ ) 接近。正如文献[9]所证实的,  $n$  的大小和器件结构及工艺情况有关。在 77K 大注入条件下 ( $I_B \approx 10^{-5}A$ ),  $\ln I_B \propto qV_{BE}/5.65kT$ 。比较 300K 和 77K 的  $I_B-V_{BE}$  曲线可知,在大注入时在 77K 下  $n$  值的增加幅度大于在 300K 下,这也说明在低温下由于载流子冻结效应,基区方块电阻  $R_{\square b}$  (或基区电阻  $r_b$ ) 确实增大了<sup>[5,6]</sup>。

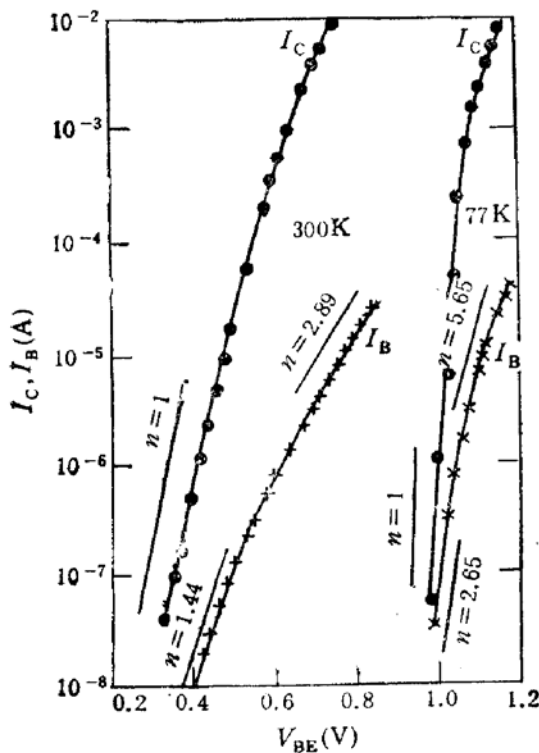


图 3 典型低温硅双极晶体管 LTT11 的  $I_C-V_{BE}$  和  $I_B-V_{BE}$  特性曲线 左边两条曲线为 300K 下的,右边两条曲线为 77K 下的

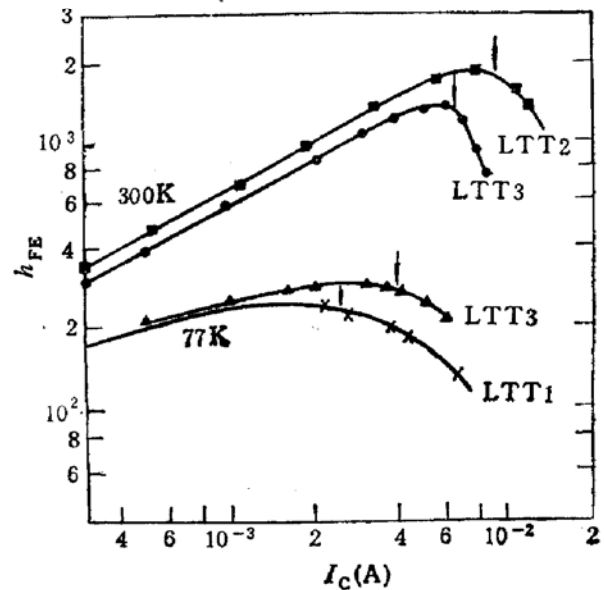


图 4 典型低温硅双极晶体管 LTT1、LTT2 和 LTT3 在 300K 和 77K 下的  $h_{FE}-I_C$  曲线

图 4 表示低温双极晶体管  $h_{FE}-I_C$  曲线。由图可知,在 300K 大注入下,  $h_{FE}$  快速下降点对应的  $I_C = 6.3-9\text{mA}$ , 和我们根据器件结构参数计算的  $I_{CM}=I_{EM}=9.8\text{mA}$  比较接近 (此器件  $J_{EM} < J_{Cr}$ ); 在 77K 大注入下,  $h_{FE}$  快速下降点对应的  $I_C = 2.5-4\text{mA}$  (如图 4 中箭头所示), 它比 300K 时的相应数值小得多, 原因是低温下基区载流子冻结效应使基区平衡多子浓度显著降低, 从而导致晶体管的大注入效应提前发生。

表 2 低温晶体管电参数特性 (77K)

参 数	单 位	测量值	测 量 条 件	测量仪器
$P_{CM}$	mW	50		
$I_{CM}$	mA	5	$h_{FE}$ 下降到 $1/2h_{FE\max}$ 时的 $I_C$	
$h_{FE}$		220—297	$V_{CB} = 10\text{V}, I_C = 3\text{mA}$	
$BV_{CBO}$	v	>30	$I_C = 10\mu\text{A}$	JT-1
$BV_{CEO}$	v	>30	$I_C = 10\mu\text{A}$	JT-1
$BV_{EBO}$	v	>10V	$I_E = 10\mu\text{A}$	JT-1
$I_{CBO}$	$\mu\text{A}$	<0.0001	$V_{CB} = 10\text{V}$	JS2B
$I_{CEO}$	$\mu\text{A}$	<0.0001	$V_{CE} = 10\text{V}$	JS2B
$I_{EBO}$	$\mu\text{A}$	<0.0001	$V_{EB} = 6\text{V}$	JS2B
$V_{CES}$	v	<0.2	$I_C = 10\text{mA}, I_B = 0.5\text{mA}$	JS-4
$V_{BES}$	v	<1.3	$I_C = 10\text{mA}, I_B = 0.5\text{mA}$	JS-4
$R_i$	$\Omega$	1K	$V_{CE} = 10\text{V}, I_B = 0.1\text{mA}$	JT-1
$f_T$	MHz	>100	$V_{CE} = 10\text{V}, I_C = 5\text{mA}, f = 100\text{MHz}$	JF-2
$V_N$	$\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$	$<7 \times 10^{-9}$	300K, $V_{CB} = 5\text{V}, I_C = 1\text{mA}, R_E = 600\Omega$	Model 5173
	$\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$	$<7 \times 10^{-8}$	$f_0 = 100\text{Hz}-100\text{kHz}$	半导体噪声分析仪
			77K, 同上	同上

表 2 列出了在 77K 下低温硅双极晶体管电参数特性。从表 2 可知,在 77K 下,  $h_{FE}$  达到 220—297, 是由于采用了多晶硅电极接触三区低掺杂同质结结构, 这种结构易于制造低温下高  $h_{FE}$  的器件。在注入电流  $I_B = 0.1\text{mA}$  时典型器件的输入阻抗  $R_i \approx 1\text{k}\Omega$ , 在 300K 时等效输入噪声电压  $V_N \leq 7 \times 10^{-9}\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ , 在 77K 时  $V_N \leq 7 \times 10^{-8}\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$  (在低温下  $V_N$  增大的原因将另文讨论), 特征频率  $f_t \geq 100\text{MHz}$ . 由于本征载流子浓度  $n_i$  随温度降低而指数减小, 因此, 低温硅双极晶体管在 77K 时的 p-n 结反向漏电流很小, 均达到  $10^{-1}\text{nA}$  数量级。

## 结论

本文采用隧穿机理推导的  $h_{FE}(T)$  表示式和所研制的样品管都证明, 采用三区低掺杂多晶硅发射极接触的低温硅双极晶体管, 容易获得 77K 下较高的  $h_{FE}$  值。尽管这种晶体管的  $\beta$  值很大, 但在注意改善小电流  $\beta$  的情况下, 仍可做到反向漏电流  $I_{CEO}$  很小, 反向耐压较高。

本课题研制的低温硅双极晶体管, 经鉴定证明其各项参数指标已能初步满足 HgCdTe 红外探测器低温前放的要求。和已发表文献[10—12]的数据对比, 在 77K 下  $h_{FE} = 220-297$  属国内领先水平; 在接近液氮温度下, 在 6.2K 时  $h_{FE} = 12.3$ , 在 10K 时

$h_{FE} = 21.7, \beta = 42$ , 这项参数指标优于 1988 年报道过的最高水平<sup>[12]</sup>, 而此低温双极晶体管在 77K 时的噪声特性和输入阻抗这两个参数的测量值对 HgCdTe 红外探测器前放来说只达到其指标的下限值。虽然有资料介绍在使用时可适当并联晶体管使  $R_i$  减小, 但这样做会使 HgCdTe 红外探测器系统变得庞大和复杂。所以, 上面的研制结果对满足 HgCdTe 红外探测器的实际应用要求来说, 仍然是初步的, 低温双极晶体管的部分参数(如  $V_N, R_i$ )有待进一步提高。

**致谢** 本课题在研制过程中曾得到北京电子管厂六分厂的帮助, 在电参数测试等各项试验中曾得到机电部 11 所, 机电部 46 所, 机电部 4 所和天津 712 厂的帮助, 以及对于在器件设计和参数测试中参加过部分工作的张咏梅和李轩同志, 在此表示衷心感谢。

### 参 考 文 献

- [1] T. S. Jayadev, SPIE Infrared Detectors, Focal Plane Arrays and Imaging, 1989, 1107:78.
- [2] Jason C. S. Woo and James D. Plummer, IEEE Trans. Electron Devices, 1988, 35:1311.
- [3] H. C. De Graaff and J. Gerard De Groot, IEEE Trans. Electron Devices, 1979, ED-26:1771.
- [4] Kazuo Yano *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 1991, 38:555.
- [5] John D. Cressler *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 1989, 36:1489.
- [6] Johannes M. C. Stork *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 1989, 36:1503.
- [7] H. M. Rein, H. V. Rohrand P. Wennekers, Solid State Electronics, 1978, 21:439.
- [8] Ian E. 格特鲁, 《双极型晶体管模型》, 科学出版社(1981).
- [9] Jason C. S. Woo, *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 1987, ED-34, 130.
- [10] 魏同立, 郑苾, 冯耀兰, 电子学报, 1989, 17: 107.
- [11] 郑苾等, 电子器件, 1991, 14: 44
- [12] Ashok K. Kapoor *et al.*, IEEE Electron Device Letters, 1988, 9:177.

## Fabrication and Characteristics Analysis of Low Temperature Silicon Bipolar Transistors

Zheng Yunguang, Guo Weilian and Li Shurong

(Department of Electronic Engineering Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract** By adopting homojunction structure of polysilicon emitter contact and low doping of emitter, base and collector regions, low temperature silicon bipolar transistors with the current gain  $h_{FE} = 220-297$  at 77K,  $h_{FE} = 12.3$  at 6.2K, and  $h_{FE} = 21.7, \beta = 42$  at 10K have been designed and fabricated. A new  $h_{FE}(T)$  expression of the devices has been derived by using the tunneling mechanism. The temperature dependence of the current gain, the Gummel characteristics and the  $h_{FE}-I_C$  characteristics for these devices have been well explained.

**EEACC:** 2560J