

文章编号: 1005—8893 (2000) 01—0053—05

按温度比例因子的低温双极晶体管优化设计^{*}

高梅芳

(江苏石油化工学院 计算机科学与工程系, 江苏 常州 213016)

摘要: 提出了一种按温度比例因子设计低温双极晶体管的设计规则。在考虑双极晶体管低温效应的前提下, 着重分析了双极晶体管发射区和基区的浓度及宽度在低温下的变化情况。结合按温度比例因子变化后任何特定温度下的双极晶体管电流增益和截止频率的优化结果, 给出了这些参数在按温度比例因子规则设计时温度比例因子的变化参数。

关键词: 温度比例因子; 电流增益; 截止频率

中图分类号: TN 31

文献标识码: A

集成电路发展至今, 常温微电子技术已获得巨大的发展, 并作为技术倍增, 渗透于各高技术领域之中。电子束、离子束和 X 射线图形转移技术可使器件特征尺寸进一步微细化, 集成度提高。但是, 由于工艺和器件物理的限制, 当器件进入亚微米阶段后, 寄生和二维效应会将器件尺寸限制在一定的水平, 诸如速度饱和效应、自锁效应、热载流子效应、亚阈效应、引线延迟效应、引线和接触电阻增大与热耗散效应等, 极大地影响器件性能的进一步提高。因此, 尽管微电子器件、电路和系统处于常温下工作十分方便, 常温却不能提供优化的工作条件, 低温工作状态才是微电子器件, 电路和系统的最优化工作状态, 低温微电子系统从而成为获得高性能微电子系统的有效途径之一。

1962 年英国约瑟夫森发现超导隧道效应, 基于此效应而制作的各类超导元器件在基础理论研究和应用中显露出锋芒, 并诞生了超导电子学这门边缘科学。近几年, 高 TC 超导薄膜不断涌现, 由此超导/半导兼容结构和技术显示出其潜在的巨大的科学价值和经济效益。由于超导体一般处于低温状态下工作, 所以, 这进一步促进了低温微电子学的研究与发展。专家们预计, 不久的将来, 将研制出低温下工作的高集成、高性能、高可靠和低成本微电子器件、电路和系统, 并将成为计算科

学、宇航工程和现代军用电子技术的重要组成部分。低温电路和系统的研究不仅具有极高的学术意义, 也有广阔的应用前景和场所。

1 按温度比例因子优化设计双极晶体管的意义

国内在硅双极晶体管方面的研究虽已取得了一定的进展, 但总体来说仍比较薄弱。就目前半导体技术的发展状况来看, 对于特定温度下的半导体器件设计方法是, 根据用户提出的在特定温度下工作的器件性能的要求, 分别从器件结构和工艺参数, 以及这些参数同温度之间的关系, 来设计半导体器件和电路。如果用户提出不同的工作环境温度, 那么设计人员又得从器件物理模型分析开始设计器件。可见, 要确定特定温度下的半导体器件的几何结构尺寸和工艺参数, 系统性差, 周期长, 代价高, 所以迫切需要一个比较合理的科学的设计方法, 找出一套特定温度下的半导体器件的设计规则, 使按照该规则设计所得的特定温度下的半导体器件能保持室温所具的特性, 甚至有所改善。因此, 本文提出了按温度比例因子来优化设计半导体器件的设想, 即根据温度比例因子 α (α 为器件工

^{*} 收稿日期: 1999—06—24

作者简介: 高梅芳 (1971—), 女, 江苏常熟人, 硕士, 讲师, 从事晶体管方面的研究。

作环境温度 T 与常温 T_0 之比, $\alpha = T/T_0$) 同器件的几何尺寸和工艺参数之间的关系, 直接给出用户提出的适合于特定温度环境的半导体器件结构尺寸和工艺参数, 这种方法显然大大地缩短了应用于特定温度条件下的半导体器件设计周期, 降低了其设计成本, 因此, 按温度比例因子设计半导体器件的方法, 在学术上和应用上均有重要的意义。

低温下, 半导体器件的某些性能得到改善, 但是, 由于低温效应的存在, 使得常温器件在低温下不能正常工作, 因此, 利用按温度比例因子的设计规则, 确定一套从常温到低温下的半导体器件的设计方案是势在必行的。同理, 从常温到低温器件的设计思路完全可应用于常温到高温器件的设计。

1988 年, 日本的易幼文曾经利用温度比例因子成功地设计了低温深沟道 MOS 器件^[1], 这为利用温度比例因子, 实现从常温到低温半导体器件的设计开创了先例。

2 低温半导体器件的设计考虑

低温下由于发射区存在禁带宽度效应, 电流增益随发射区浓度 N_E 的上升反而剧烈下降, 所以, 要获得高电流增益的硅低温双极晶体管, 发射区掺杂不可过量, 以避免发射区禁带变窄效应的影响。 $\Delta E_{ge} = 1.87 \times 10^{-2} \ln(N_E/N_{E0})$ ^[2], 要使 $\Delta E_{ge} < 0.05 \text{ eV}$, 则 $N_E < 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。

发射区电阻也是影响器件低温特性的一个重要因素, 为获得与常温下相近的电阻值, 发射区掺杂浓度要求高于 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。事实上, 为避免载流子冻析效应, N_E 也必须高于 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 即高于 MOTT 转换点。由上可确定发射区掺杂浓度 N_E 的选择范围为:

$$3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3} < N_E < 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

对于低温下基区浓度的考虑, 应从两方面讨论。

当 $N_B > N_{B0} = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时, H_{FE} 将随 N_B 的上升而上升, 为获得高的电流增益, 基区掺杂浓度 N_B 可选得高些。以获得较大的基区禁带变窄量, 从而减少发射区和基区的相对禁带变窄量。

对于 $N_B > N_{B0} = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的情况, 由于基区掺杂较低, 不引起禁带变窄效应, 电流增益 H_{FE} 将随 N_B 的下降而上升。对于常规扩散结构的晶体管, 其注入效率主要由 N_E/N_B 决定, 为保证一定的 H_{FE} 值, 一般要求 $N_E/N_B \geq 100$ 。另一方面, 基

区过于轻掺杂又会引起基区电阻增大, 相应地噪声增加, 输出特性曲线变坏; 表面浓度过低还会影响器件电参数的稳定性, 因而基区浓度一般要求有:

$$5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \leq N_B \leq 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

基区宽度的减少有利于提高电流增益和截止频率, 低温下, 在保持一定的基区 Gummel 系数 $G_B = W_B N_B$, 以确保晶体管具备足够高的穿通电压的前提下, 可通过减少 W_B (同时提高 N_B) 来提高电流增益和截止频率。

基区方块电阻 R_{dB} 是低温工作的硅双极晶体管的一个重要参数, R_{dB} 与空穴迁移率 $\mu_{PB}(X)$ 和基区宽度 W_B 相关, 表达式如下所示:

$$R_{dB}(T) = \left\{ \int_0^{W_B} q \mu_{PB}(X) P(X) dx \right\}^{-1} \quad (1)$$

上式可写为:

$$R_{dB}(T) = \{ q \mu_{PB}(T) G_B(T) \}^{-1} \quad (2)$$

式中: $\mu_{PB}(T)$ 是基区中空穴迁移率的平均值。

当温度较高时, 由于声子散射的作用, R_{dB} 随温度升高而增加; 而在低温下, 由于载流子的冻析效应, R_{dB} 随温度的下降呈指数地上升, 同时与常温情况一样, R_{dB} 随 N_B 的上升而下降。

陷阶效应对硅双极晶体管的低温频率特性有很大的影响, 所以, 为获得高的截止频率 f_T , 必须减少基区中的补偿施主杂质浓度。而基区中补偿施主杂质浓度主要由收集区掺杂和发射区掺杂带尾二者决定, 故收集区的掺杂浓度 N_C 必须低于 f_T , 以使低温时 n_C/n_T 值基本接近于 1。

为了使基极—集电极之间的电容 C_{BC} 较小, 应对收集区进行低掺杂, 因为耗尽区中的全部杂质都将电离, 故在考虑收集区掺杂浓度的设计时, 温度对其影响不大。 C_{BC} 可表示为:

$$C_{BC} = A_C \left[\frac{q \epsilon_0 \epsilon_r N_C}{2 (\phi_{bi} - V_{BC})} \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中: A_C 为基区总面积, ϕ_{bi} 为自建电场, V_{BC} 为外加基极与集电极上的偏压, 在低温下, 由于 ϕ_{bi} 增大而使得 V_{BC} 略有减小。当集基电极电流密度 J_C 不为零时, 结电容与集电结耗尽区中的导电电子有关, 但由于耗尽区中的强场作用, 这些电子没有被束缚在耗尽区中的施主杂质能级上, 即 Poole—Frenkel 强场效应将阻碍这些电子去占据施主杂质能级, 这样, 集电结空间电荷区中的电子密度 n_s 可表示为:

$$n_s = \frac{J_C}{q V_{sc}} \quad (4)$$

其中电子漂移速度 V_{sc} 与温度的关系为:

$$V_{sc} = \frac{2.4 \times 10^7}{1 + 0.8 \exp(T/600K)} \quad (5)$$

为避免发生 Kirk 效应, 收集区掺杂浓度必须高于空间电荷的电子密度, 即:

$$N_c > n_s = \frac{J_c}{qV_{sc}}$$

从上分析可知, N_c 的选择范围为:

$$\frac{J_c}{qV_{sc}} < N_c < 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

3 温度比例因子参数 S_i 的计算和选取

对于一个能在常温或稍低于常温状态下正常运行的双极晶体管来数, 并不意味着它能在低温下正常运行, 也就是说, 对于一个常温双极晶体管, 它的各项特性参数并不适合于低温和高温的工作环境, 为了保证晶体管在某一特定温度环境下能正常工作, 必须调节晶体管的几何结构尺寸和工艺参数。本文的主要目的就是要找出合适的温度比例因子的变化参数, 根据基区掺杂浓度、宽度和发射区掺杂浓度、宽度与温度比例因子 α^{S_i} 之间的关系, 调节发射区和基区的宽度及浓度, 并确保变化后晶体管在特定温度下的工作性能保持常温所具备的水准。

根据费米—狄拉克分布函数:

$$f = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{q(\phi_f - \phi)}{KT}\right]} \quad (6)$$

式中: ϕ_f 是准费米能级, f 是分布几率。从式 (6) 可知, 若电势的改变与温度成正比, 则分布几率保持不变。相对双极晶体管来说, MOSFET 的结构要简单得多, 其载流子的边界条件与温度几乎无关。随着温度的改变, 载流子分布保持恒定, 因而, YOU—WEN YI 等人引进温度比例因子 $\theta = T/T'$, 得到了 MOSFET 的特性参数按温度比例因子变化后在低温下的变化情况^[1]。按照温度比例因子变化后, MOSFET 的电场大大减弱, 且雪崩击穿及热载流子退变效应也有所减弱。

由 MOSFET 的情况可得到启发, 若对双极晶体管也根据一定的关系调节其参数, 亦可改善器低温及其他特定温度时的工作情况。调节关系如下:

$$N'_B = \alpha^{S_1} N_B \quad (7)$$

$$W'_B = \alpha^{S_2} W_B \quad (8)$$

$$N'_E = \alpha^{S_3} N_E \quad (9)$$

$$W'_E = \alpha^{S_4} W_E \quad (10)$$

(7) 式至 (10) 式中, N_B 、 W_B 、 N_E 、 W_E 是常温 (T) 时晶体管的几何尺寸和工艺参数, N'_B 、 W'_B 、 N'_E 、 W'_E 是调节后特定温度 (T') 下的几何尺寸和工艺参数, $\alpha = T/T'$, S_i ($i=1, 2, 3, 4$) 就是要得到的温度比例因子变化参数。由式 (7) 至式 (10), 可以得到如下一组表达式:

$$S_1 = \frac{\ln(N_{B1}/N_B)}{\ln \alpha} \quad (11)$$

$$S_2 = \frac{\ln(W_{B1}/W_B)}{\ln \alpha} \quad (12)$$

$$S_3 = \frac{\ln(N_{E1}/N_E)}{\ln \alpha} \quad (13)$$

$$S_4 = \frac{\ln(W_{E1}/W_E)}{\ln \alpha} \quad (14)$$

现在问题的关键是确定 S_i 的值。如何选取一组合适的 S_i 值, 以达到所预期的要求, 是有一定的难度的。电流增益和截止频率都是硅双极晶体管的主要性能参数, 而电流增益对于器件性能的影响尤其重要, 因此, 初期设想通过优化参数后, 使晶体管的低温电流增益基本保持常温时电流增益的大小, 然后再将该组参数代入截止频率的低温模型中, 看是否能使截止频率在低温和常温下保持相当的水平, 最后综合选取最优参数。

以浅结晶体管 ($W_E < 1 \mu\text{m}$) 为例, 中电流时低温双极晶体管电流增益 H_{FE} 和截止频率 f_T 的低温物理模型为:

$$H_{FE} = \frac{\mu_{nB}}{\mu_{pE}} \cdot \frac{C_E}{C_B} \cdot \frac{W_E}{W_B} \exp\left[-\frac{\Delta E_g}{KT}\right] \quad (15)$$

$$f_T = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{W_E}{HFE \cdot D_{PE}} \left(\frac{W_E}{2} + \frac{D_{PE}}{S} \right) + \frac{KT}{qI_E} (C_{TE} + C_{TC}) + \frac{n_T}{n_C} \left(\frac{W_B^2}{\eta D_{nB}} + \frac{W_B}{V_S} \right) + \frac{x_C}{2V_S} + r_{CS} C_{TC} \right]^{-1} \quad (16)$$

在实际计算的过程中, 得到了多组 S_i 值, 但并非每组 S_i 值均适用。首先得考虑 S_i 的正负性, 若 $S_i > 0$, 则表明与该 S_i 相对应的参数按温度比例因子变化后有所增加; 反之, 若 $S_i < 0$, 则表明与该 S_i 值相对应的参数按温度比例因子变化后有所下降。各项参数的上升与否及变化程度的大小, 不仅要与实际的变化情况相符合, 还要考虑到现有的工艺水平是否能满足条件。在综合考虑上面几种因素以后, 参照上述电流增益 H_{FE} 和截止频率 f_T 的低温物理模型, 从中挑选出相对来说精确度较高

的一组。

对于基区, 当杂质浓度 N_B 低于 N_{B0} 时, 基区中无禁带变窄效应发生, 故不论在何种温度状态下, H_{FE} 均随 N_B 上升而下降。当基区杂质浓度高于 N_{B0} 时, 基区重掺杂将产生禁带变窄效应。将电流增益 H_{FE} 低温物理模型中与 N_B 无关的量归为常数项 C_1 , 可有:

$$H_{FE}=C_1\frac{\mu_{nB}}{C_B}\left(\frac{N_B}{N_{B0}}\right)^{\frac{1.8\times10^{-2}}{KT}}\quad (17)$$

由 (17) 式可知: 常温时, $\frac{1.8\times10^{-2}}{KT}=0.692$, H_{FE} 随 N_B 的上升而下降; 低温下, $\frac{1.8\times10^{-2}}{KT}=2.7$, 因而 H_{FE} 随 N_B 上升而上升, 这一结果完全不同于常规理论, 为本设计中对电流增益的优化提供了理论基础。

因此, 当 $N_B<N_{B0}$ 时, 电流增益及截止频率随温度的变化情况相对 $N_B>N_{B0}$ 时要简单的多。这儿选取 $N_B>N_{B0}$ 时的两组 S_i 值作比较。

第一组:

$$S_1=-0.001\quad S_2=0.222\quad S_3=0.2358$$

$$S_4=-0.36$$

第二组:

$$S_1=0.108\quad S_2=0.1989\quad S_3=-0.011$$

$$S_4=-0.7065$$

由于 $N_B>N_{B0}$ 时, 电流增益在常温和低温时的变化趋势不同, 这就造成了选取 S_i 的困难性。选取的 S_i 值, 不仅要使电流增益及截止频率在变化后基本不变, 还要尽可能使误差保持在最小。表 1 分别是按第一组及第二组 S_i 值变化后电流增益基截止频率的变化及变化后相对常温时的变化误差。

表 1 对按两组 S_i 变化后优化结果的比较

温度/K	第一组				第二组			
	H_{FE}	$f_T/(\text{MHz})$	H_{FE} 误差, %	$f_T/(\text{MHz})$ 误差, %	H_{FE}	$f_T/(\text{MHz})$	H_{FE} 误差, %	$f_T/(\text{MHz})$ 误差, %
300	18.159 7	700.336 4	/	/	18.159 7	700.336 4	/	/
250	17.712 9	687.344 1	2.46	1.86	18.731 2	681.621 8	3.14	2.67
200	17.284 9	667.604 2	4.82	4.67	18.908 8	648.361 3	4.13	7.42
150	17.105 5	636.775 7	5.81	9.08	18.169 1	581.661 8	5.15	16.94
100	18.051 4	588.752 8	0.6	15.93	15.038 8	425.138 5	17.19	39.30
77	19.882 3	560.851 1	9.48	19.92	12.312 4	309.799 3	35.06	55.76

从表 1 可以明显看出, 运用第二组 S_i 值, 在 300 K—150 K 的温度范围内是可行的, 但当温度进一步下降, 误差太大; 而对于第一组 S_i 值, 在 77 K—300 K 的温度范围内, 电流增益的误差均保持在 10% 以内, 截止频率的误差也保持在 20% 以内, 很明显第一组 S_i 值要比第二组 S_i 值好得多。

通过类似的比较, 对于 $N_B<N_{B0}$ 时的双极晶体管, 本文对 S_i 值的取值如下:

$$S_1=1.678,\quad S_2=0.415,\quad S_3=0.29,$$

$$S_4=-0.0754238$$

4 总 结

本文确立了按温度比例因子设计双极晶体管和电路的设计方法。在考虑双极晶体管低温效应的前提下, 着重分析了双极晶体管发射区和基区的浓度及宽度在低温下变化情况, 给出了这些参数在按温

度比例因子规则设计时的变化参数。研究分析了按温度比例因子变化后任何特定温度下的双极晶体管电流增益和截止频率的优化结果。

在用户提出某一温度下双极晶体管需具备一些特定功能的前提下, 利用了按温度比例因子的设计规则来设计双极晶体管, 可大大缩短设计周期, 降低设计成本, 减少设计工作量, 显示了按温度比例因子设计规则的优越性。

参 考 文 献

- [1] You-Wen Yi, Kazuya Masu, Kazuo Tsubouchi, et al. Temperature-scaling Theory for Low-temperature-operated MOS-FET with Deep-submicron Channel [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1993, 27 (10): 788—792.
- [2] Wanger J, Tze-Chiang Chen. Scaling the Silicon Bipolar Transistor for Sub-100-ps ECL Circuit Operation at Liquid Nitrogen Temperature [J]. J Appl Phys, 1988, 425—428.

The Optimized Design of Bipolar Transistor According to Temperature Scaling—factors

GAO Mei—fang

(Department of Computer Science and Engineering, Jiangsu Institute of Petrochemical Technology, Changzhou 213016, China)

Abstract: The purpose of this thesis is to establish a design rule with which the bipolar transistors at any specific temperature can be attained. Firstly, the working characteristics of silicon bipolar transistors at low temperature are analyzed and discussed. The physical models of current gain and cutoff frequency fit in with any specific temperature are established. These offer the necessary physical basis to suggest the temperature—scaling law. On the basis of low temperature effects of bipolar transistor, the changing condition of the doping concentration in the emitter and base and the width of the emitter and base are emphatically analyzed. The integrated program to get temperature—scaling factors is presented. The optimized results of current gain and cutoff frequency at any specific temperature according to the temperature scaling law are studied.

Key words: temperature scaling factor; current gain; cutoff frequency

简 讯

100 万吨/年重油催化裂化仿真培训系统软件通过省级技术鉴定

由我院和九江石油化工总厂联合开发的《100 万吨/年重油催化裂化仿真培训系统软件》，最近在九江石化总厂通过江西省科委主持的技术鉴定。

主要技术性能指标如下：

1. 将化工过程设计模拟软件 ASPEN PLUS 用于仿真模型的稳态计算，以低阶动态拟合暂态响应，在此基础上建立的数学模型逼真地反映了实际装置参数的变化，动态响应与实际装置一致。
2. 首次实现了 ESD（紧急停车联锁自保系统）的仿真，EDS 站逻辑控制正确，与现场保持一致。
3. 教师指令台功能齐全，具有参数调整，PID 参数整定及其它基本组态功能；操作站的岗位分工可任意设定，培训时操作站的数量可根据需要灵活增减，不必修改任何设置或重新启动系统。
4. 软件设计紧跟国际软件新潮流，采用中文 Windows NT/95 平台，利用 VC++5.0 面向对象的编程技术和 TCP/IP 通讯协议，开发了多机联网运行的开放型仿真平台，系统操作方便，人机界面友好。

鉴定委员会专家一致通过了该项技术鉴定，认为该系统的仿 ESD 操作属国内首创，整体水平达到国内领先水平。并建议在石化行业加大推广力度，同时进一步完善自帮助功能。

科技处供稿