

集电极电流密度和基区渡越时间的解析模型

马平西 张利春 王阳元

(北京大学微电子学研究所 北京 100871)

摘要 以小注入条件下的注入少数分布为初始值,本文依据迭代法首次得到了适用于任意注入条件,基区从指数掺杂分布到均匀掺杂分布的集电极电流密度和基区渡越时间的解析表达式.三次迭代的解析结果与数值迭代结果比较表明:在注入发射结电压 $V_{BE} \leq 1.0V$ 的情况下,三次迭代形成的集电极电流密度和基区渡越时间的解析表达式有效.

EEACC: 2560B, 2560J, 2530N

1 引言

集电极电流密度和基区渡越时间作为双极晶体管的重要参数已得到了广泛的研究^[1,2].然而,这些解析模型或者限于小注入条件或者限于特殊基区掺杂的大注入条件两个极端结果.近年来,随着工艺技术的发展,人们已可以实现基区从高斯掺杂到均匀掺杂之间的任意分布^[3-5];现代高速双极晶体管又是以增加集电极电流密度来减小基区渡越时间的.所以有必要进一步研究任意注入条件下基区从高斯分布到均匀分布的集电极电流密度和基区渡越时间的解析模型.在这方面,虽然文献[6]应用迭代法给出了任意注入条件下基区渡越时间的解析模型,文献[7]解析分析了任意注入条件下基区掺杂分布对基区渡越时间的影响,但前者限于均匀分布,后者也只限于均匀和指数分布.本文首次依靠迭代法得到了适用于任意注入条件下基区掺杂从指数分布到均匀分布的集电极电流密度和基区渡越时间的解析表达式.

2 理论

对于NPN晶体管,电子电流密度 J_n 和空穴电流密度 J_p 可以写为:

$$-J_n = q D_n(x) \frac{dn(x)}{dx} + q \mu_n(x) n(x) E(x) \quad (1)$$

马平西 男,1965年生,博士后,目前主要从事多晶硅发射极双极器件和集成电路的模型、模拟和参数提取工作
张利春 男,1939年生,教授,博士生导师,主要从事多晶硅发射极晶体管超高速双极电路和砷化镓电路工艺研究
王阳元 男,1935年生,教授,博士生导师,主要从事多晶硅发射极晶体管超高速双极电路、SOI超高速电路和小尺寸器件物理等方面的研究

1994年12月8日收到初稿,1995年3月3日收到修改稿

$$J_p = -qD_p(x) \frac{dp(x)}{dx} = q\mu_p(x)p(x)E(x) \quad (2)$$

式中, q 为电子电荷; D_n 和 D_p 分别为电子和空穴的扩散系数; μ_n 和 μ_p 分别为电子和空穴的迁移率; n 和 p 分别为电子和空穴浓度; E 为电场强度. 对于具有适当大小电流增益的双极晶体管, J_p 和 J_n 相比可以忽略即 $J_p \approx 0$, 则基区中的电场强度可以表示为^[8]:

$$E(x) = V_T \left\{ \left[\frac{1}{p(x)} \frac{dp(x)}{dx} \right] - \left[\frac{1}{n_{ieB}^2(x)} \frac{dn_{ieB}^2(x)}{dx} \right] \right\} \quad (3)$$

式中, $V_T = kT/q$, k 为玻尔兹曼常数, T 为温度; n_{ieB} 为基区中的有效本征载流子浓度. 把(3)式代入(1)式, 假设基区中的少子复合可以忽略, 并由电中性条件:

$$p(x) = n(x) + N_B(x) \quad (4)$$

可得 J_n 作为 $n(x)$ 函数:

$$J_n = FJ_n[n(x)] = \frac{qn_i^2 [\exp(V_{BE}/V_T) - \exp(V_{BC}/V_T)]}{\int_0^{W_b} \frac{n_i^2}{n_{ieB}^2(x)D_n(x)} [N_B(x) + n(x)] dx} \quad (5)$$

上两式中, N_B 为基区掺杂分布; W_b 为基区宽度; n_i 为本征载流子浓度; V_{BE} 为发射结上的电压; V_{BC} 为集电结上的电压. 本文采用如下边界条件:

$$n(W_b) = 0 \quad (6)$$

则电子分布 $n(x)$ 作为自身的函数可以写为:

$$n(x) = Fn[n(x)] \left[J_n n_{ieB}^2(x) \int_x^{W_b} \frac{N_B(x) + n(x)}{qD_n(x)n_{ieB}^2(x)} dx + N_B^2(x)/4 \right]^{1/2} - N_B(x)/2 \quad (7)$$

如果设小注入条件下的电子分布为 $n_L(x)$, 则上式可表示为:

$$n_L(x) = [J_{nL} n_{ieB}^2(x) \int_x^{W_b} \frac{N_B(x)}{qD_n(x)n_{ieB}^2(x)} dx + N_B^2(x)/4]^{1/2} - N_B(x)/2 \quad (8)$$

式中, J_{nL} 为小注入条件下的集电极电流密度, 由(5)式可得:

$$J_{nL} = \frac{qn_i^2 \exp(V_{BE}/V_T)}{\int_0^{W_b} \frac{n_i^2}{n_{ieB}^2(x)D_n(x)} N_B(x) dx} \quad (9)$$

由此, 我们以小注入条件下的 J_{nL} 和 $n_L(x)$ 为初始值, 根据(5)式和(7)式得到了如下的迭代关系:

$$J_1 = FJ_n[n_L(x)] \quad (10-1a)$$

$$n_1(x) = Fn[n_L(x)] \quad (10-1b)$$

$$J_2 = FJ_n[n_1(x)] \quad (10-2a)$$

$$n_2(x) = Fn[n_1(x)] \quad (10-2b)$$

$$J_3 = FJ_n[n_2(x)] \quad (10-3a)$$

$$n_3(x) = Fn[n_2(x)] \quad (10-3b)$$

$$\dots \dots \dots$$

$$J_N = FJ_n[n_{N-1}(x)] \quad (10-Na)$$

$$n_N(x) = Fn[n_{N-1}(x)] \quad (10-Nb)$$

其中,在本文计算中假设 J_N 和 J_{N-1} 之间的差小于两者中较小的百分之一,并在下面的讨论中把 N 次迭代称为数值迭代.

这里,本文以下式为例提出了适用于不同注入水平(例如 $V_{BE} \leq 1.0V$)有关集电极电极电流密度 J_n 和基区渡越时间 τ_b 的解析表达式:

$$J_n = J_1 \quad (11-1a)$$

$$\tau_b = \tau_1 = \frac{q}{J_1} \int_0^{W_b} n_1(x) dx \quad (11-1b)$$

$$J_n = J_2 \quad (11-2a)$$

$$\tau_b = \tau_2 = \frac{q}{J_2} \int_0^{W_b} n_2(x) dx \quad (11-2b)$$

$$J_n = J_3 \quad (11-3a)$$

$$\tau_b = \tau_3 = \frac{q}{J_3} \int_0^{W_b} n_3(x) dx \quad (11-3b)$$

.....

$$J_n = J_N \quad (11-Na)$$

$$\tau_b = \tau_N = \frac{q}{J_N} \int_0^{W_b} n_N(x) dx \quad (11-Nb)$$

3 结果和讨论

本节的目的是以式(11-3a)和式(11-3b)为例,验证解析模型在一定的注入水平条件下($V_{BE} \leq 1.0V$),对于基区掺杂从指数分布到均匀分布情况下的有效性.

3.1 物理参数的选取

电子迁移率 μ_{n0} 可以表示为^[9]:

$$\mu_{n0} = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{1 + (N_B/N_{\text{ref}})^{\gamma}} \quad (12)$$

式中, $\mu_{\min} = 92 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$, $\mu_{\max} = 1360 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$, $N_{\text{ref}} = 1.3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, $\gamma = 0.91$. 考虑电场强度对电子迁移率的影响^[10], 电子迁移率可以表示为:

$$\mu_n = \frac{\mu_{n0}}{[1 + (E_L/E_c)^2]^{1/2}} \quad (13)$$

式中, $E_c = 10^4 \text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$, E_L 由(3)式可写为:

$$E_L = V_T \left\{ \left[\frac{1}{N_B(x)} \frac{dN_B(x)}{dx} \right] - \left[\frac{1}{n_{ieB}^2(x)} \frac{dn_{ieB}^2(x)}{dx} \right] \right\} \quad (14)$$

本文采用下式给出的基区掺杂从指数分布到均匀分布的表达式^[11]:

$$N_B(x) = N_0 \exp \left[- \left(\frac{x}{W_b} \right)^\alpha \ln \left(\frac{N_0}{N_c} \right) \right] \quad (15)$$

式中, $N_0 = N_B(0)$, $N_c = N_B(W_b)$, $\alpha = 1$ 为指数分布, $\alpha = 2$ 为高斯分布, $\alpha = \infty$ 为均匀分布. 图1给出了与其对应的基区掺杂分布. 基区中的有效本征载流子浓度可以表示为^[9]:

$$n_{icb}^2(x) = n_i^2 \exp\left[\frac{\Delta E_g(x)}{V_T}\right] \quad (16)$$

式中, $\Delta E_g(x)$ 为基区中的禁带变窄, 写为:

$$\begin{aligned} \Delta E_g(x) = & 0.009 \left[\ln\left(\frac{N_B}{10^{17}}\right) \right. \\ & \left. + \sqrt{\ln^2(N_B/10^{17}) + 0.5} \right] \quad (17) \end{aligned}$$

3.2 少数注入水平对集电极电流密度和基区渡越时间的影响

图 2(a) 和图 2(b) 分别示出了集电极电流密度和基区渡越时间与发射结电压之间的关系. 集电极电流密度主要取决于基区掺杂和注入少数分别在基区中形成

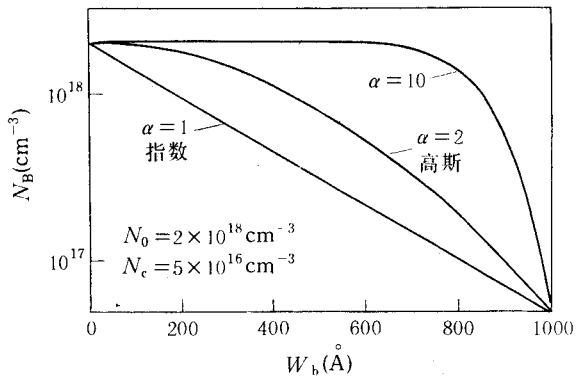


图 1 对应于公式(15)的基区掺杂分布

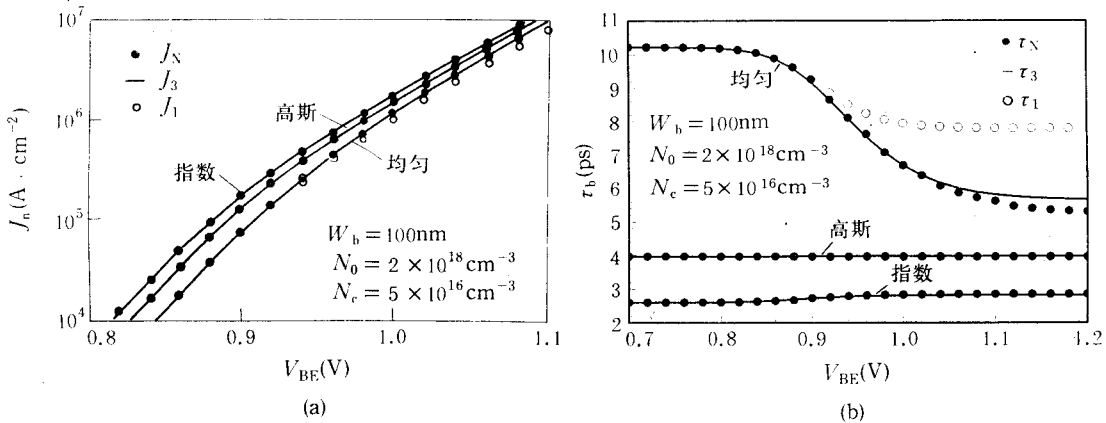


图 2 集电极电流密度和基区渡越时间与发射结电压之间的关系

的有效 Gummel 数, 即式(5)中分母积分项. 在小注入条件下, 集电极电流密度主要由掺杂形成的有效 Gummel 数决定, 集电极电流密度与发射结电压之间呈指数关系; 均匀掺杂分布由于比指数和高斯分布可形成更大的基区有效 Gummel 数, 故集电极电流密度最小. 然而, 随着注入水平的提高, 注入少数形成的基区有效 Gummel 数在总 Gummel 数中所占的比例增大, 集电极电流与发射结电压之间偏离指数关系; 均匀掺杂由于所形成的基区有效 Gummel 数较大, 故所受影响最小; 各掺杂分布的集电极电流密度之差也随之减小. 基区渡越时间主要取决于集电极电流密度和基区注入少数形成的 Gummel 数即式(11-3b)中的积分项. 在小注入条件下, 集电极电流密度和注入少数形成的 Gummel 数与发射结电压的关系都呈指数关系, 故基区渡越时间与注入水平无关. 然而, 随着注入水平的提高, 注入少数通过调节基区中的电场强度而使集电极电流密度和注入少数形成的 Gummel 数与发射结电压的关系偏离指数关系, 进而使基区渡越时间与注入水平有关. 均匀掺杂分布随着注入水平的提高, 基区中的电场强度增强, 基区渡越时间减小, 大注入的基区渡越时间为小注入的一半, 这与传统理论结果相一致. 指数掺杂分布随着注入水平的提高, 基区中的电场强度减弱, 基区渡越时间增大. 在小注入条件下, 由于均匀掺杂基区的电场强度分布为零, 故均匀掺杂

分布将具有最大的基区渡越时间,但是随着注入水平的提高,基区中的电场强度得到调节,各分布的渡越时间之差减小,图中示出了解析结果与数值迭代结果的比较.三次迭代的解析结果在 $V_{BE} \leq 1.0V$ 时是有效的;不同的迭代次数还可以得到不同注入条件下的有效解析表达式,例如一次迭代的解析结果在 $V_{BE} \leq 0.9V$ 时有效.

3.3 集电极电流密度和基区渡越时间与基区掺杂分布之间的关系

图 3(a)和图 3(b)分别给出了小注入条件下集电极电流密度和基区渡越时间与基区掺杂分布之间的关系.随着基区掺杂由指数分布向均匀分布转化,基区掺杂所形成的有效基区

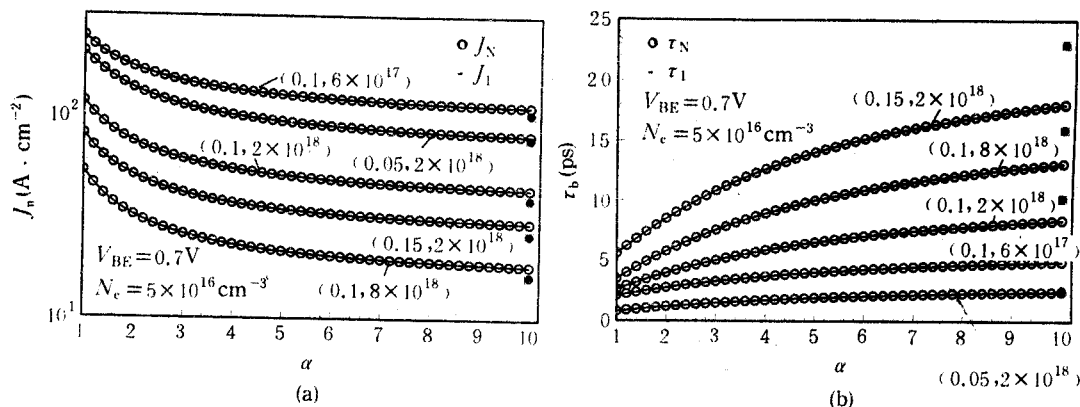


图 3 小注入条件下集电极电流密度和基区渡越时间与基区掺杂分布之间的关系

括号中数字代表 (W_b, N_a) , 单位分别为 $(\mu\text{m}, \text{cm}^{-3})$; \square 和 \bullet 分别代表

均匀掺杂情况下一次迭代的解析结果和数值迭代结果

Gummel数增大,集电极电流密度单调地减小;掺杂在基区中形成的电场强度减小,基区渡越时间单调地增大.同理,对于相同的峰值浓度,基区宽度越大,集电极电流密度越小,基区浓度时间越大.对于相同的基区宽度,峰值掺杂浓度增大,掺杂在基区中形成的有效基区Gummel数增加,集电极电流密度减小;掺杂在基区中形成的电场强度增大,但基区渡越时间也增大,与现有已知结论不符,这是由于本文考虑了迁移率变小的因素所致.由图还可以看出,一次迭代形成的解析结果与数值迭代结果相符合.

图 4(a)和图 4(b)分别给出了大注入条件下集电极电流密度和基区渡越时间与基区掺杂分布之间的关系.虽然对于相同的基区宽度和峰值掺杂浓度,集电极电流密度和基区渡越时间分别随峰值掺杂浓度和基区宽度的变化与小注入条件下的相似,但是,由于大注入条件下注入少子的调节作用,集电极电流密度和基区渡越时间随掺杂分布的变化再也不满足小注入条件下的单调减小和增大,而是在一定的条件下出现极小和极大值.根据式(1)可得:

$$J_n = -q \mu_n(x) n(x) E_T \quad (18)$$

$$\tau_b = - \int_0^{W_b} \frac{dx}{q \mu_n(x) E_T} \quad (19)$$

其中, $E_T = E_A + E$, $E_A = \frac{1}{n(x)} \frac{dn(x)}{dx}$ 为电子浓度梯度所形成,并且产生基区扩散电流.随着 α 的增加,由图 1 可知式(14)中的电场强度 E_T 在集电结附近明显增大,但基区为均匀掺杂时 $E_T = 0$,所以电子迁移率 μ_n 将在集电结附近呈现极小值.在小注入情况下,注入电子对 E

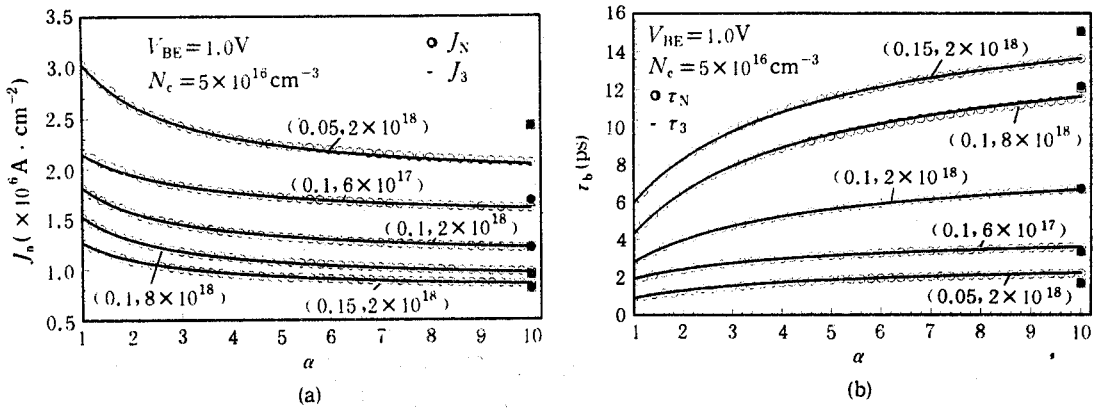


图 4 大注入条件下集电极电流密度和基区渡越时间与基区掺杂分布之间的关系
 括号中数字代表 (W_b, N_0) ，单位分别为 $(\mu\text{m}, \text{cm}^{-3})$ ； \square 和 \bullet 分别代表
 均匀掺杂情况下三次迭代的解析结果和数值迭代结果

和 E_T 的调节作用较小，随着 α 的增加 E 和 E_T 都单调减小， μ_n 和 E_T 的相互作用仍可使 J_n 和 τ_b 保持单调减小和增大。然而，在大注入条件下，由于注入电子对 E_T 的调节作用较大，随着 α 的增加 E_T 在一定的条件下出现极小值。因此，当注入电子的调节作用足够大时， μ_n 和 E_T 的相互作用将使 J_n 和 τ_b 分别呈现极小和极大值。在图 4(a) 和 4(b) 中，采用与曲线 $(0.05, 2 \times 10^{18})$ 相同的计算参数，本文分别在 $\alpha=1, \alpha=10$ 和均匀基区掺杂情况下对 μ_n, E 和 E_T 进行了计算，结果证明上面的论述是正确的。图中三次迭代形成的解析结果与数值迭代结果相一致。由此可见，三次迭代的解析表达式在注入水平 $V_{BE} \leq 1.0\text{V}$ 时完全有效。

4 结论

1 对于从指数掺杂到均匀掺杂的基区分布，在适用的基区宽度（例如 $0.05\mu\text{m} \leq W_b \leq 0.15\mu\text{m}$ ）和基区峰值掺杂浓度（例如 $6 \times 10^{17}\text{cm}^{-3} \leq N_0 \leq 8 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ ）的范围里，由迭代法可获得不同注入水平条件下有效集电极电流密度和基区渡越时间的解析表达式。例如，三次迭代的解析结果在 $V_{BE} \leq 1.0\text{V}$ 时有效。

2 在基区掺杂从指数分布向均匀分布的转化过程中，大注入条件下的集电极电流密度和基区渡越时间的变化与小注入条件下的结果完全不同。小注入条件下的集电极电流密度和基区渡越时间分别呈现单调减小和增加的趋势；大注入条件下的集电极电流密度和基区渡越时间却分别在一定的条件下呈现出极小和极大值。

参 考 文 献

[1] H. Kroemer, Solid-State Electron., 1985, 28:1101.
 [2] R. S. Muller and T. I. Kamins, Device Electronics for Integrated Circuits, New York: Wiley, 1986.
 [3] K. H. Weiner and T. W. Sigmon, Proc. IEEE Bipolar Circuits & Technology Meeting, 1988: 37.

- [4] B. Van Schravendijk, J. L. de Jong, J. G. de Groot, *et al.*, Proc. IEEE Bipolar Circuits & Technology Meeting, 1988: 132.
- [5] P. J. Wijnen and R. D. Gardner, IEEE Electron Device Letts., 1990, **4**: 149.
- [6] K. Suzuki, Solid-State Electron., 1993, **1**: 109.
- [7] J. S. Yuan, IEEE Trans. Electron Devices, 1994, **ED-41**: 212.
- [8] R. J. V. Overstraeten, H. J. Deman and R. P. Mertens, IEEE Trans. Electron Devices, 1973, **ED-20**: 290.
- [9] J. W. Slotboom and H. C. de Graaff, Solid-State Electron., 1976, **19**: 857.
- [10] D. M. Caughey and R. E. Thomas, Proc. IEEE, 1967, **55**: 2192.
- [11] K. Suzuki and N. Nakayama, IEEE Trans. Electron Devices, 1992, **ED-39**: 623.

Analytical Model of Collector Current Density and Base Transit Time

Ma Pingxi, Zhang Lichun and Wang Yangyuan

(Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871)

Received 8 December 1994, revised manuscript received 3 March 1995

Abstract Based on iteration method with initial small injected minority carrier profiles, analytical expressions of collector current density and base transit time are first presented for arbitrary doping base and injection levels. Comparing the analytical results with the numeric, following conclusion is obtained; under the condition of injected emitter-base junction voltage $V_{BE} \leq 1.0V$, the analytical expressions of the collector current density and the base transit time obtained from the three time iteration processions are valid.

EEACC: 2560B, 2560J, 2530N