# 低温 ECL 电路的瞬态特性分析 $^{1}$

李 垚 郑 茳 沈克强 魏同立

(东南大学微电子中心 南京 210096)

**摘 要** 本文对 ECL 电路的瞬态特性进行了较详尽的分析,给出了适于全温区的较精确的 电路延迟时间表达式,并对影响 t<sub>pd</sub> 的主要参数的温度特性进行了分析。该模型可用于各种 温度下高速器件和电路的优化设计。

关键词 ECL 电路,低温,瞬态,延迟时间

中图号 TN710.2

## 1 引言

低温微电子器件和电路已日益成为微电子领域的一大重要内容,而其中低温 ECL 电路的出现<sup>[1,2]</sup>,更标志着双极器件和电路的高速特性在低温下得到了充分展现。对低温 ECL 电路瞬态特性的分析目前还很不完善。文献 [1] 采用最高振荡频率  $f_{max}$  的倒数作为衡量电路速度的尺度,对 ECL 电路主要瞬态特性参数——电路传输延迟时间  $t_{pd}$  的温度特性进行了分析,但该方法存在缺点:一是  $1/f_{max}$  只是相对反映  $t_{pd}$ ,并不为  $t_{pd}$  的精确表达式,二是  $t_{pd}$  不仅与  $\sqrt{T_B \cdot T_C} (\propto 1/f_{max})$  有关,还与  $T_C/T_B$  有关。本文采用严密求解  $I_C(t)$ 、  $V_C(t)$  方程的方法,并结合影响  $t_{pd}$  的主要 参数  $\tau_F$ ,  $R_B$  和  $C_C$  的低温特性,对低温 ECL 电路瞬态特性作了较详尽的探讨,推导出  $t_{pd}$  的 较为精确的全温区表达式,并与实验结果和计算机模拟结果进行了比较。推导过程中考虑了低 温下的少子陷阱、禁带变窄、载流子冻析等效应。在此基础上,文中最后探讨了不同温度下平均 基区掺杂浓度对  $t_{pd}$  的影响以及开关电流、负载电阻优化值的选取。

# 2 全温区延迟时间表达式

为使问题简化,我们采用密勒规则将集电结势全电容 C<sub>C</sub> 分为 C<sub>BM</sub> 和 C<sub>CM</sub> 两部分,从而 将电路分为基极电路和集电极电路两部分。

## 2.1 基极电路分析

对图1所示电路运用基尔霍夫电流、电压定律,并忽略发射区电阻的影响,则有

$$V_{Bl} - V_r = I_{Bl}(R_g + Z_{Bl}) + V_{bel} - V_{ber} - I_{Br}Z_{Br},$$
(1)

$$I_{Br} + I_{Bl} + I_{Cr} + I_{Cl} = I_S, (2)$$

国家自然科学基金资助项目

<sup>1 1994-11-07</sup> 收到, 1995-04-26 定稿



图 1 ECL 门电路图

式中  $V_{Bl} - V_r = V_S/2$ ,  $V_S$  为电路的逻辑 摆幅,  $R_g$  为前一级的输出电阻,  $Z_B \approx 0.7 R_B$ ,  $R_B$  为基区电阻,  $V_{bel} - V_{ber}$  为  $T_l$ ,  $T_r$  管的 结电压差<sup>[3]</sup>:

$$V_{bel} - V_{ber} = -V_T \ln(I_S/I_{Cl} - 1).$$
 (3)

若忽略稳态基极电流,则有

$$I_B = \tau_F \mathrm{d}I_C / \mathrm{d}t, \qquad (4)$$

式中 TF 为正向渡越时间。由 (1) ~ (4) 式可得

$$V_S/2 = -V_T \ln(\frac{I_S}{I_{Cl} - 1}) + \tau_F \frac{dI_{Cl}}{dt} (R_g + 2Z_B) - \frac{I_S}{\beta + 1} Z_B.$$
 (5)

式中电流增益  $\beta$  和  $\tau_F$ ,  $Z_B$  均为  $I_{Cl}$  和温度 T 的函数。若忽略高电流效应,则可认为在同一温度下  $\tau_F$ ,  $Z_B$ ,  $\beta$  均为常数。令  $i = I_{Cl}/I_S$ ,则 (5) 式化为

$$\tau_F \mathrm{d}i/\mathrm{d}t = A + B \ln(1/i - 1),\tag{6}$$

其中  $A = [V_S/2 + I_S Z_B/\beta + 1]/[I_S(R_g + 2Z_B)], B = V_T/[I_S(R_g + 2Z_B)].$  (6) 式可化为

$$\int_0^t \frac{\mathrm{d}i}{A + B \ln(1/i - 1)} = \int_0^t \frac{1}{\tau_F} \mathrm{d}t, \qquad (0 < i < 1).$$
(7)

令 $\theta = 2i - 1$ ,  $(-1 < \theta < 1)$ , 则(7) 式 左边 为

$$\int_{-1}^{\frac{\theta+1}{2}} \frac{\mathrm{d}\theta}{2A+2B\ln(\frac{1-\theta}{1+\theta})} = \int_{-1}^{\frac{\theta+1}{2}} \frac{\mathrm{d}\theta}{2A-5B\theta},\tag{8}$$

其中包含一近似代换  $\ln(\frac{1-\theta}{1+\theta}) \approx -2.5\theta$ . 这样、可解得

$$i = D(1 - e^{-t/T_B}). \tag{9}$$

式中 D = 0.5 + A/(5B),  $T_B = \tau_F/(5B) = \tau_F I_S(R_g + 2Z_B)/(5V_T)$ . (9) 式不同于文献 [3] 之处在 于 D 的引入, 而且 (9) 式是方程 (6) 式的精确解。

## 2.2 集电极电路分析

2

若忽略负载电阻电容。则集电极电路时间常数 Te 为 <sup>3</sup>

$$T_C = R_L (3C_C + C_{CS}), (10)$$

式中 R<sub>L</sub> 为负载电阻, C<sub>CS</sub> 为集电区 - 衬底结电容。

集电极端电压 Vc 满足如下方程:

$$dV_C/dt + V_C/T_C = [V_{CC} - R_L I_C(t)]/T_C.$$
(11)

将 (9) 式代入可解得

$$V_C(t) = V_{CC} - DI_S R_L \{ 1 + [T_B/(T_C - T_B)] e^{-t/T_B} - [T_C/(T_C - T_B)] e^{-t/T_C} \}.$$
 (12)

在  $T_l$  管从截止到导通的变化过程中,  $V_C$  是从  $V_{CC}$  变为  $V_{CC} - I_S R_L$ ,则开关管对延迟时间  $T_{CS}$  即为  $V_C$  从  $V_{CC}$  变为  $V_{CC} - I_S R_L/2$  所需时间,满足如下方程:

$$1 + [T_B/(T_C - T_B)] \exp(-T_{CS}/T_B) - [T_C/(T_C - T_B)] \exp(-T_{CS}/T_C) = 1/(2D), \quad (13)$$

式中  $D \approx 0.5 + V_S/(10V_T)$  为一与逻辑摆幅和温度有关的量。令  $T_{CS} = f(\gamma) \cdot \sqrt{T_B T_C}$ , 其中  $\gamma = T_C/T_B$ ,则 (13) 式变为

$$\left[\gamma/(\gamma-1)\right]\exp(-f(\gamma)/\sqrt{\gamma}) - \left[1/(\gamma-1)\right]\exp(-f(\gamma)\cdot\sqrt{\gamma}) = 1 - 1/(2D). \tag{14}$$

求 (14) 式的精确解是困难的,我们采用了数值方法求其近似解。图 2 为计算机模拟的 D 取 1,2,3 时的  $f(\gamma)$ - $\gamma$  曲线。这样,

$$T_{CS} = f(\gamma) \cdot \sqrt{[(\tau_F I_S)/(5V_T)](R_g + 2Z_B) \cdot R_L(3C_C + C_{CS})},$$
(15)

式中  $f(\gamma)$  反映了  $T_C/T_B$  对延迟时间的影响,根号中部分与  $\sqrt{8\pi R_B C_C/f_T}(1/f_{max})$  相仿。在影 响  $T_{CS}$  的参数中,  $\tau_F$  、  $R_B$  、  $C_C$  均强烈地与温度 T 有关,而  $R_g$  、  $R_L$  、  $C_{CS}$  则随温度的 变化较小。



(测量数据取自文献 [1], Vs=600mV)

#### 2.3 总延迟表达式

采用类似的分析,可得射极跟随器所引起的延迟 Tef 为<sup>[3]</sup>

$$T_{ef} = \tau_F [2 + Z_B (I_S / V_S)]. \tag{16}$$

这样, 总的延迟时间 tpd 作为温度的函数可表示为

$$t_{pd}(T) = T_{CS}(T) + T_{ef}(T).$$
(17)



3  $\tau_F$ 、  $R_B$ 、  $C_C$  的低温特性

## 3.1 正向渡越时间 $\tau_F$

双极晶体管正向渡越时间  $\tau_F \approx 1/(2\pi f_T)$ ,  $f_T$  为晶体管的截止频率。实验结果表明,截止频率  $f_T$  随温度下降而衰变。早期的工作认为,浅能级杂质的少数载流子陷阱效应是导致低温下  $f_T$  蜕变的主要原因。但实际上随着掺杂浓度或注入水平的提高,禁带变窄效应对频率特性的影响 愈来愈显著。文献 [4] 通过大量的计算认为,两种效应对  $\tau_F$  的影响均不可忽略,最终建立了综合考虑两种效应的低温正向渡越时间模型。

考虑一多晶硅发射区结构的双极晶体管,其低温下的正向渡越时间 TF 可表示为

$$\tau_F(\xi_E/\beta)[W_{E1}^2/(2D_{p1}) + W_{E1}/S_p] + \tau_{E2} + \xi_B[W_B^2/(\eta'D_n)], \tag{18}$$

式中第一项和第三项分别为单晶硅发射区和基区渡越时间,  $\tau_{E2}$  为多晶硅发射区渡越时间, 一般较小。  $\xi_E$  和  $\xi_B$  为发射区、基区浅能级杂质的少子陷阱作用因子, 可表示为

$$\xi_E = 1 + g_A (N_A / N_V) \exp[\Delta E_A / (kT)],$$
(19)

$$\xi_B = 1 + g_D (N_D / N_C) \exp[\Delta E_D / (kT)].$$
(20)

随着温度的降低, *ξ<sub>B</sub>* 、 *ξ<sub>E</sub>* 大大增加。补偿杂质浓度越高,陷阱作用越强。

电流增益 β 受禁带变窄效应的影响很大。该效应被普遍认为是导致低温下 β 蜕变的主要原因。此外,考虑禁带变窄效应对基区渡越时间系数 η 的影响,则 η 成为

$$\eta' = (\alpha B_0)^2 / [\exp(-\alpha B_0) - 1 + \alpha B_0], \tag{21}$$

式中  $B_0$  为一与温度有关的量,  $\alpha$  为基区浓度梯度因子。 300K 下,  $\eta'$  随  $\alpha$  增大而增大, 而在 77K 下,  $\eta'$  却随  $\alpha$  增大而下降。也就是说, 在同一梯度因子  $\alpha$  下, 77K 比 300K 时的  $\eta'$  要 低,从而导致  $\tau_F$  增加。根据 (18) 式,我们绘出了正向渡越时间  $\tau_F$  随温度的变化曲线,理论曲 线与我们的实验结果符合较好 (图 5)。  $\tau_F$  是由在高频小功率晶体管  $f_T$  测试仪上测出  $f_T$ ,再 经  $\tau_F \approx 1/(2\pi f_T)$  换算而得。被测器件为适于低温工作的多晶硅发射区双极晶体管,其在 77K 下的电流增益一般在 40 以上,基区宽度 0.5 $\mu$ m,发射区平均掺杂浓度 10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup>,基区峰值浓度 3 × 10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>。图 6 为常温和液氮温度下测量的  $\tau_F$  随集电极电流  $I_C$  的变化。

### 3.2 基区电阻 $R_B$

基区方块电阻 R<sub>dB</sub> 可表示为<sup>[5]</sup>

$$R_{dB} = 1 / \int_0^{W_B} q \mu_p(x) p(x) \mathrm{d}x, \qquad (22)$$

式中 p(x) 为基区多数载流子浓度,  $\mu_p(x)$  为基区中多子迁移率。在低温下,由于载流子冻朽 (x) 应,基区中有效载流子浓度会大大降低,可表示为

$$p(x) = N_B(x) / \left\{ 1 + \left[ 4 + 2\exp(-\delta/(kT)) \right] \exp(\eta_V + \Delta E_A/kT) \right\},$$
(23)

式中  $\exp(\eta_V v)$  为 T 和  $N_B$  的函数, 电离能  $\Delta E_A = 0.0438 - 4.08 \times 10^{-8} N_B^{1/3}$ ,  $\delta = 0.044 \text{eV}$ .

基区中多子迁移率 μ<sub>p</sub>(x) 可表示为

$$\mu_{P}(x) = \mu_{\min} + \mu_{0} / [1 + (N_{B} / N_{\text{ref}})^{\alpha}], \qquad (24)$$

式中 μ<sub>min</sub> 、 μ<sub>0</sub> 、 N<sub>ref</sub> 、 α 均是温度的函数。图 7 为计算的不同掺杂条件下 R<sub>dB</sub> 随温度的变化,并与用 HP4145B 半导体参数分析仪测试的结果进行了比较。由图可看出,由于载流子冻析 效应,基区方块电阻随温度下降而接近指数上升。



图 6 不同温度下的  $\tau_F$ -Ic 曲线

图 7 不同掺杂条件下的 RaB-T 曲线

基区电阻 R<sub>B</sub> 则是一个与 I<sub>C</sub> 有关的量,在大注入条件下需考虑电导率调制效应和基区扩展 效应的影响,而且这种影响在各种温度下都是存在的<sup>[6]</sup>。因此有

$$R_B(T, I_C) = CR_{dB}(T)f_{CM}(T, I_C)f_{PO}(T, I_C) + R_{BX},$$
(25)

式中  $R_{BX}$  为外基区电阻,可认为与温度和电流无关,第一项为本征基区电阻, C 为常数,  $f_{CM}$ 、  $f_{PO}$  分别为电导率调制因子和基区扩展因子。图 8 为不同温度下的  $R_B$ - $I_c$  曲线。



图 8 不同温度下的 R<sub>B</sub> – I<sub>C</sub> 曲线

3.3 集电结电容 C<sub>c</sub>

集电结电容 C 。可表示为

$$C_{\rm C} = A_c (q \in N_c / [2(\phi_{Bi} - V_{BC})]^{1/2}.$$
 (26)

图 9 300K 、 77K 下的 tpd - NB 曲线

温度下降时, 内建电势  $\phi_{Bi}$  增加, 所以 Cc 在低温下略有下降。

## 4 应用举例

采用以上的关系式,我们可以很容易寻找不同温度下各种器件参数和电路参数对电路延迟 时间的影响,从而用于器件和电路的设计。

4.1 基区平均掺杂浓度  $N_B$  对  $t_{pd}$  的影响

在  $t_{pd}$  的表达式中,  $\tau_F$ 、  $R_B$  为基区平均掺杂浓度  $\overline{N}_B$  的函数。  $\overline{N}_B$  上升,基区电阻  $R_B$  会下降,但同时发射区陷阱作用因子  $\xi_E$  增大,基区少子扩散系数  $D_n$  减小,基区禁带变窄效应 增强。这些都会导致  $\tau_F$  的上升,因此  $t_{pd}$  对  $\overline{N}_B$  来说有个极值点。图 9 是根据本文推导的关系 式计算的 300K 和 77K 下的  $t_{pd}$ - $\overline{N}_B$  曲线。计算时取  $V_S$ =600mV,  $I_S$ =1mA,  $W_B$  = 0.2 $\mu$ m 。此 时,常温下当  $\overline{N}_B \approx 4 \times 10^{17}$  cm<sup>-3</sup> 时,  $t_{pd}$  达最小;而低温 (77K)下当  $\overline{N}_B \approx 2 \times 10^{18}$  cm<sup>-3</sup> 时  $t_{pd}$  才达最小。

4.2 优化工作电流的选取

对  $t_{pd}$  的表达式求偏导,并令  $t_{pd}/\partial I_S = 0$ ,我们可求得使  $t_{pd}$  最小的优化工作电流  $I_{S,opt}$  为简便起见,我们假定  $t_{pd}$  在  $T_B \approx T_C$  附近取最小值,因此在最小值点附近  $t_{pd}$  可近似为

$$t_{pd} = f(1)\sqrt{T_B \cdot T_C} + T_{ef}.$$
(27)

对 (27) 式求偏导即可求得  $I_{S,opt}$ , 若取常温下  $V_S$ =500mV,  $\tau_F$ =4ps, $R_B$ =175 $\Omega$ ,  $C_C$ =6.7fF,  $C_{CS}$ =8.9fF, 则 300K 下  $I_{S,opt}$ =2.6mA, 77K 下  $I_{S,opt}$ =1.5mA 。此时  $\gamma$ (=  $T_C/T_B$ ) 分别约等于 0.158(300K) 和 0.127(77K), 与  $\gamma$ =1 时相比,  $f(\gamma)/f(1)$  分别为 1.14(300K) 和 1.1(77K) 。所以假定  $t_{pd,min}$  在

# 5 结 论

(1)本文通过严密求解  $I_C(t)$ 、 $V_C(t)$ 方程,推导出 ECL 电路延迟时间表达式  $t_{pd} = f(\gamma)\sqrt{T_BT_C} + T_{ef}$ ,并将其拓展到全温区。(2) 少子陷阱效应和禁带变窄效应会导致正向渡越时间  $\tau_F$  在低温下 增加,而低温下的载流子冻析则是基区方块电阻增加的主要原因。(3) 通过适当选取基区掺杂 浓度、工作电流和负载电阻可使  $t_{pd}$ 下降,电路速度提高。

### 参考文献

- [1] Cressler J D, Tang D D, Jenkins K A, et al. IEEE Trans. on ED, 1989, 36(8): 1489-1502.
- [2] Cressler J D, Tang D D, Jenkins K A, et al. Low-Temperature Operation of Silicon Bipolar ECL Circuits. ISSCC Tech. Dig., New York: 1989, 228-229.
- Stork J M C. Bipolar Transistor Scaling for Minimum Switching Delay and Energy Dissipation. IEDM Tech Dig., San Francisco: 1988, 550–553.
- [4] 李 垚, 沈克强, 魏同立, 固体电子学研究与进展, 1995, 15(1):26-32.
- [5] 李 垚,魏同立,沈克强.东南大学学报, 1995, 20(3): 34-38.
- [6] Satake H, Hamasaki T. IEEE Trans. on ED, 1990, ED-37(7): 1688-1697.

# ANALYSIS OF TRANSIENT CHARACTERISTICS OF ECL CIRCUIT AT LOW TEMPERATURE

Li Yao Zheng Jiang Shen Keqiang Wei Tongli

(Microelectronics Center of Southeast University, Nanjing 210096)

**Abstract** Detailed analysis of transient characteristics of ECL circuits is performed in this paper, then a relatively exact propagation delay expression applied to all temperatures is presented. The cryogenic characteristics of some dominant parameters contributed to propagation delay are also discussed. The model achieved is suitable for optimum designs of high speed devices and circuits at all temperatures.

Key words ECL circuit, Low temperature, Transient characteristics, Propagation delay

李 垚: 男、1968年生,博士生,现从事低温半导体器件和电路方面的研究. 郑 茳: 男、1966年生,教授,博士、现从事硅微电子技术的极限研究与潜力开拓. 沈克强: 男、1960年生,讲师,博士,现从事低温半导体器件和电路方面的研究. 魏同立: 男、1943年生,教授、博士生导师、现从事半导体器件物理和微电子学方面的研究.