

# 基于缺陷统计分布的 IC 互连线可靠性模型\*

陈太峰 郝 跃 赵天绪 张进城

(西安电子科技大学微电子所, 西安 710071)

**摘要:** 讨论了电路在直流和脉冲直流工作情况下互连线的寿命, 并重点考虑了工艺缺陷软故障的影响, 提出了新的互连线寿命估计模型。利用该模型可以估算出在考虑缺陷的影响时互连线的寿命变化情况, 这对 IC 电路设计有一定的指导作用。模拟实验证明了该模型的有效性。

**关键词:** 可靠性; 缺陷; 互连线寿命; IC 设计

**EEACC:** 2220C; 2570; 0170N

中图分类号: TN43

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)10-1343-03

## 1 引言

随着集成电路规模的增大、器件和互连线特征尺寸的减小, 电路的可靠性问题变得更为复杂, 尤其是互连线的可靠性问题成为深亚微米和超深亚微米集成电路研究重点<sup>[1,2]</sup>。目前, 虽然采用铜互连, 但互连的可靠性问题随特征尺寸的减小依然是重要问题<sup>[3]</sup>。互连可靠性除了互连线噪声、信号畸变和衰减、电磁信号干扰等, 电迁移问题依然是主要的失效模式。直流、交流和脉冲直流情况下互连线的电迁移可靠性已有所研究<sup>[4,5]</sup>, 但目前软故障引起可靠性变化, 尤其是缺陷对互连可靠性影响的研究较少(尽管在实验中多次发现这种失效模式的存在)<sup>[6]</sup>。本文着重讨论缺陷对互连线寿命的影响, 建立缺陷引起的软故障导致互连线失效模型。由于缺陷的分布具有统计性, 该模型是建立在统计意义上的可靠性模型, 它将对 IC 设计有明确的指导作用。

## 2 新寿命模型的建立

研究表明在直流情况下<sup>[4,5]</sup>, 互连线在直流应力下的寿命为

$$TTF_{DC} = \frac{H}{g\tau\alpha J^2} = \frac{A_{DC}(T)}{J_{DC}^2} \quad (1)$$

其中  $g$ 、 $\tau$ 、 $\alpha$  为由互连线特性决定的常数;  $J$  为流过互连线的电流密度。由此可知, 互连线的寿命与所通过电流密度的平方成反比, 或与导线宽度  $w$  的平方成正比。当一直径为  $R$  的颗粒, 在器件的制造过程中随机落在长度为  $L$ , 宽度为  $w$  的互连线(或多晶硅栅连线)上。如果  $R > w$  且  $w_g = 0$ , 说明该微粒完全覆盖导线, 从而形成丢失物缺陷引起断路(开路), 电路失效。这类硬故障在集成电路成品率仿真和设计中已有很多研究<sup>[7-9]</sup>。但是, 当  $0 < w_g < w$  时, 缺陷并没有使互连线开路, 这类故障成为软故障, 本文的研究发现, 它对集成电路的可靠性是有影响的。当存在  $0 < w_g < w$  丢失物缺陷情况下(如图 1 所示), 互连线的有效宽度变为  $w_g$ , 电流密度将变为原来的  $w/w_g$  倍, 寿命  $T(R)$  可表示为:

$$T(R) = TTF_{DC}(w_g^2/w^2) \quad (2)$$



图 1 丢失物缺陷示意图

FIG. 1 Missing Material Defect

互连线的寿命将变短, 即电路的可靠性会降低。为了研究的方便, 首先考虑图 2 所示的线宽  $w$  等于线间距  $s$  的情况。

\* 国家“九五”科技攻关(96-738)和国防科技预研基金(99J8.3.3.DZ0134)资助项目。

2000-12-10 收到, 2001-04-13 定稿

©2001 中国电子学会

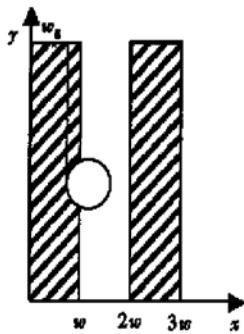


图 2 软故障的综合效果

FIG. 2 Total Effect of Soft Fault

当密度为  $D_0$  的缺陷在芯片上是均匀分布的, 只需讨论粒径中心在  $(0, 2w)$  间时互连线有效宽度的变化. 设缺陷直径(粒径)为  $R$ , 则当  $0 < R \leq w$  时,

$$w_g = \begin{cases} w - x - R/2 & x \in (0, R/2] \\ w - R & x \in (R/2, w - R/2] \\ x - R/2 & x \in (w - R/2, w + R/2] \\ 3w - x - R/2 & x \in (w + R/2, 2w - R/2] \\ w & x \in (2w - R/2, 2w) \end{cases} \quad (3)$$

当  $w < R \leq 2w$  时,

$$w_g = \begin{cases} w - x - R/2 & x \in (0, w - R/2] \\ 0 & x \in (w - R/2, R/2] \\ x - R/2 & x \in (R/2, 3w/2] \\ 3w - x - R/2 & x \in (3w/2, 2w) \end{cases} \quad (4)$$

当  $2w < R \leq 3w$  时,

$$w_g = \begin{cases} x - R/2 & x \in (R/2, 3w/2] \\ 3w - x - R/2 & x \in (3w/2, 3w - R/2] \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

当  $R > 3w$  时,  $w_g = 0$  (6)

而平均寿命为:

$$\bar{T}(R) = \int_0^{2w} T(R)/(2w) dx = \int_0^{2w} (w_g/w)^2 TTF_{DC}/(2w) dx \quad (7)$$

所以对于一定粒径分布的缺陷, 可以得到电路中互连线的寿命, 进而得到互连线的平均寿命. 设缺陷的粒径分布为<sup>[6]</sup>:

$$h(R) = \begin{cases} R/R_0^2 & 0 < R \leq R_0 \\ R_0^2/R^3 & R_0 \leq R \leq \infty \end{cases} \quad (8)$$

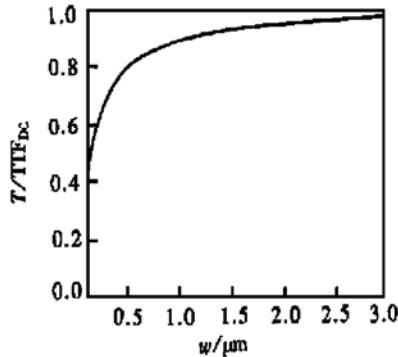
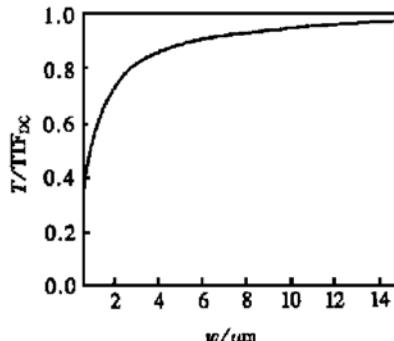
式中  $R_0$  为缺陷的峰值粒径. 由(3)–(8)式得出平均寿命为:

$$T = \int_0^{\infty} h(R) \bar{T}(R) dR = (1 + \frac{2R_0^3}{15w^3} + \frac{R_0^2}{8w^2} - \frac{4R_0}{3w} - \frac{R_0^2 \ln(R_0)}{2w^2} + \frac{R_0^2 \ln(w)}{8w^2} + \frac{3R_0^2 \ln(3w)}{8w^2}) TTF_{DC} \quad (9)$$

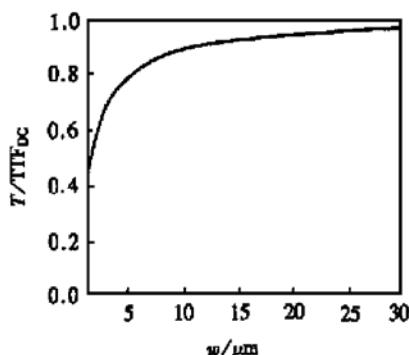
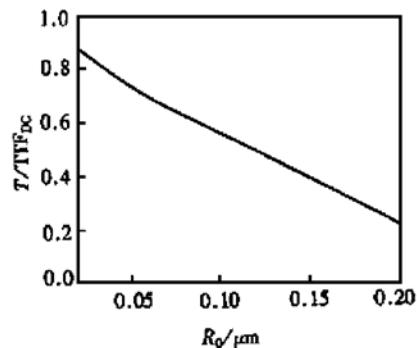
当  $w$  与  $s$  不相同时, 分析方法一样, 不过结果更复杂.

### 3 实验与分析

利用(9)式可以从没有缺陷时互连线的寿命, 直接计算出有缺陷存在情况下互连线寿命的变化, 而没有缺陷时互连线的寿命可以根据互连线的性质, 由(1)式得出. 在这里我们假设缺陷的峰值粒径  $R_0$  比互连线宽度  $w$  小(该假设的合理性易见), 图 3—5 分别给出了  $R_0 = 0.1\mu m$ 、 $R_0 = 0.5\mu m$  和  $R_0 = 1\mu m$  互连线的寿命变化  $T/TTF_{DC}$  的趋势图.

图 3  $R_0 = 0.1\mu m$  的  $T/TTF_{DC}$  图FIG. 3  $T/TTF_{DC}$  when  $R_0 = 0.1\mu m$ 图 4  $R_0 = 0.5\mu m$  的  $T/TTF_{DC}$  图FIG. 4  $T/TTF_{DC}$  when  $R_0 = 0.5\mu m$ 

由图 3—5 可以看出: 当  $w$  与  $R_0$  有相同的比值时互连线寿命基本相同; 当  $w$  与  $R_0$  相等时, 互连线寿命仅为无缺陷时的 0.337 倍; 只有当  $w$  比  $R_0$  大十倍以上时, 互连线寿命才接近无缺陷时的寿命. 同理, 当  $w$  固定而  $R_0$  变化时, 寿命  $T$  的变化也容易得到. 图 6 给出了  $w = 0.2\mu m$  时寿命与  $R_0$  的关系.

图 5  $R_0 = 1\mu\text{m}$  的  $T/TTF_{DC}$  图FIG. 5  $T/TTF_{DC}$  when  $R_0 = 1\mu\text{m}$ 图 6  $w = 0.2\mu\text{m}$  的  $T/TTF_{DC}$  图FIG. 6  $T/TTF_{DC}$  when  $w = 0.2\mu\text{m}$ 

## 4 结论

在集成电路中, 互连线的寿命对整个电路的可靠性有至关重要的意义. 而互连线的寿命不仅与它的电学特性有关, 还要受到工艺生产中缺陷的影响,

其影响如式(9)给出. 对于一个成熟的工艺线, 其峰值缺陷粒径一般是固定的, 因此, 当已知每条互连线的电流(利用 BERT 软件系统可以得到), 本文研究结果可以估计出互连线电迁移影响下的寿命与不考虑缺陷时互连线寿命的关系, 这对进行电路设计有指导意义.

## 参考文献

- [1] M. J. Dion, Electromigration Lifetime Enhancement of Lines with Multiple Branches, 2000 The 38<sup>th</sup> International Reliability Physics Symposium Proceedings, San Jose, CA., 2000, 324—332.
- [2] N. Cohen, Soft Error Considerations for Deep-Submicron CMOS Circuit Applications, 1999 TEDM, Washington DC., USA., Dec. 1999.
- [3] Tim Sullivan, Reliability Issues for Cu/Low-k Interconnect System, 1998 IEDM, San Francisco, CA, USA., Dec., 1998.
- [4] Jiang Tao, Nathan W. Cheung and Chenming Hu, IEEE Trans. Electron Devices, 1993, **41**(4): 539—545.
- [5] Jiang Tao, Nathan W. Cheung and Chenming Hu, IEEE Electron Deviece Lett., 1993, **14**: 554—556.
- [6] W. C. Riordan, Microprocessor Reliability Performance as a Function of Die Location for a  $0.25\mu\text{m}$ , Five Layer Metal CMOS Logic Process, 1999 The 37<sup>th</sup> International Reliability Physics Symposium Proceedings, San Diego, CA. 1999, 1—11.
- [7] HAO Yue, Theory and Method of IC Manufacturing Dynamics, Beijing: Beijing Educational Press, 1995.
- [8] HAO Yue and ZHU Chun-xiang, Chinese Journal of Semiconductors, 1996, **17**(9): 677—682.
- [9] Jiang Xiao-hong and Hao Yue, IEEE Trans. Semicond. Manuf., 1998, **11**(3): 432—441.

## Reliability Model of IC Interconnect Based on Defect Distribution Statistics\*

CHEN Tai-feng, HAO Yue, ZHAO Tian-xu and ZHANG Jin-cheng

(Microelectronics Institute of Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Taking process defects into account, the device lifetime under dc and pulse dc stresses are discussed. Based on the analysis, a new model of interconnect lifetime is presented to estimate the variation in the interconnect lifetime when considering the defects, which is helpful to the IC design. The simulation results prove the model valid.

**Key words:** reliability; defect; interconnect lifetime; IC design

**EEACC:** 2220C; 2570; 0170N

**Article ID:** 0253-4177(2001)10-1343-03

\* Project Supported by Ninth Five Year National Science and Technology Program (96-738) and National Defense Advance Research (99J8.3.3.DZ0134).