

改进的电迁移独立失效元模型

李志宏 顾页 武国英 王阳元

(北京大学微电子学研究所 北京 100871)

摘要 当前被广泛采用的描述电迁移失效的独立失效元模型存在很多缺陷。本文根据电迁移失效的物理机制和一些必要的假设，对其进行了一些改进。主要是以三叉点代替晶粒作为独立失效元，并不再假设单个失效元的中值失效时间与晶粒大小无关。对连线宽度、晶粒大小与电迁移寿命的模拟结果都比传统的独立失效元模型更符合实验事实。

PACC: 6610, 8130

1 引言

超大规模集成电路金属互连线的电迁移是引起集成电路失效的一种重要机制^[1]。随着器件尺寸缩小，互连线尺寸变窄，电迁移现象变得更加严重，电迁移寿命已经成了衡量集成电路产品的一个重要指标。影响金属连线电迁移失效的因素很多，连线的宽度和晶粒大小是其中的两个重要因素。虽然人们对此已进行了较深入的研究，但至今仍未找到一种令人满意的模型。现在较为广泛使用的独立失效元模型存在很多缺陷，本文对其进行了分析和论述，根据电迁移失效的物理机制和一些必要的假设，提出了一些改进方法，并给出了计算机模拟结果和实验结果的比较。

2 现象

大量的实验表明，在同等线宽下，晶粒尺寸越大，电迁移寿命越长^[2~4]。这是由于电迁移主要是由晶界处原子扩散引起的，随着晶粒变大，晶界密度变小，从而减小了晶界流，增大了电迁移寿命。电迁移寿命随导线宽度的变化关系比较复杂。当连线宽度较大时，寿命随连线宽度的减小而减小，经过一个极小值后，寿命随线宽的减小迅速上升。出现这种情况与线宽和晶粒大小之比 W/D 的值密切相关。实验表明，线宽与中值失效时间(MTF)随 W/D 的不同有如下的关系：^[5]

李志宏 男，1969年生，博士生，现从事VLSI多层互连及其可靠性研究工作

顾页 女，1969年生，硕士生，现从事VLSI多层互连及其可靠性研究工作

武国英 男，1936年生，教授，现从事微电子方面的教学和科研工作

1995年5月10日收到初稿，1995年8月14日收到修改稿

- (1) $W/D > 4$ (如图 1(a)), 导线为多晶结构. W 减小, 空洞更容易贯穿导线, MTF 减小;
- (2) $2 < W/D < 4$ (如图 1(b)), 此时导线的结构梯度最大. MTF 达到极小值;
- (3) $1 < W/D < 2$ (如图 1(c)), 导线为大晶粒结构. 随 W 减小, 结构梯度变小, 晶界比例下降, MTF 上升;
- (4) $W/D < 1$ (如图 1(d)), 导线为竹节结构. 此时结构梯度很小, 晶界比例很低, MTF 迅速上升.

在不同的实验中, W/D 的具体范围有所不同, 但趋势是一样的^[6~10]. 表 1 列出了不同文献中, MTF 达到极小值时 W/D 值.

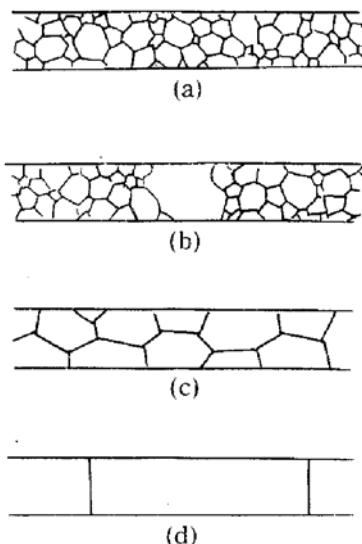


图 1 不同晶粒大小时连线
微结构示意图^[6]

效率 $G_s(t)$ 满足

$$G_s(t) = 1 - [1 - F(t)]^{N_s} \quad (1)$$

式中 $F(t)$ 为独立失效元的失效几率; N_s 为沿线长方向的独立失效元的个数, 大体等于 L/D (L 为线长).

对于横向含有多个晶粒的宽线, 一个等效失效元可视为几个独立失效元的并联, 其累计失效率可表示为

$$G_p(t) = (F(t))^{N_p} \quad (2)$$

其中 N_p 为线宽方向的晶粒个数, 其值约等于 W/D .

一条多晶结构的宽线可以看作若干个独立失效元的并串联, 于是总的失效几率 $G_{sp}(t)$ 可表示为

$$G_{sp}(t) = 1 - [1 - G_p(t)]^{N_s} = 1 - [1 - (F(t))^{N_p}]^{N_s} \quad (3)$$

当 $W < D$ 时, 线宽方向的失效元数目不再减少, $N_p = 1$.

文献[6]用独立失效元模型模拟了 MTF 与 W/D 的关系(如图 2), 并就此认为独立失效元模型与实验定性符合, 只不过最小值出现 $W/D=1$ 处, 而不是 $W/D=2\sim 4$ 之间(该文中实验结果).

表 1 不同文献中 MTF 达到极小值时 W/D 的实验值

| 文献号 | MTF 达到极小值时的 W/D 实验值 | 文献号 | MTF 达到极小值时的 W/D 实验值 |
|-----|-----------------------|------|-----------------------|
| [5] | $2\sim 4$ | [6] | 3 |
| [7] | < 1 | [8] | ~ 0.5 |
| [9] | < 1 | [10] | 1 |

3 独立失效元模型及其缺陷

为了说明晶粒大小和互连线尺寸对电迁移失效的影响, 有人提出了独立失效元模型^[6, 10, 11]. 该模型把每个晶粒看作一个独立失效元, 并假设失效元的失效几率与晶粒大小无关. 对于竹节结构, 整条导线可视为若干失效元的串联, 其累计失效率 $G_s(t)$ 满足

$$G_s(t) = 1 - [1 - F(t)]^{N_s} \quad (1)$$

式中 $F(t)$ 为独立失效元的失效几率; N_s 为沿线长方向的独立失效元的个数, 大体等于 L/D (L 为线长).

对于横向含有多个晶粒的宽线, 一个等效失效元可视为几个独立失效元的并联, 其累计失效率可表示为

$$G_p(t) = (F(t))^{N_p} \quad (2)$$

其中 N_p 为线宽方向的晶粒个数, 其值约等于 W/D .

一条多晶结构的宽线可以看作若干个独立失效元的并串联, 于是总的失效几率 $G_{sp}(t)$ 可表示为

$$G_{sp}(t) = 1 - [1 - G_p(t)]^{N_s} = 1 - [1 - (F(t))^{N_p}]^{N_s} \quad (3)$$

当 $W < D$ 时, 线宽方向的失效元数目不再减少, $N_p = 1$.

文献[6]用独立失效元模型模拟了 MTF 与 W/D 的关系(如图 2), 并就此认为独立失效元模型与实验定性符合, 只不过最小值出现 $W/D=1$ 处, 而不是 $W/D=2\sim 4$ 之间(该文中实验结果).

然而我们根据这一模型的实际模拟表明,仅当 W 不变,而 D 改变时 MTF 和 W/D 的关系才符合图 2 曲线。这意味着,当连线宽度不变时,电迁移寿命先随晶粒的变大而减小,在达到竹节结构后才随晶粒的增大而变大。而当 D 不变, W 改变时,用该模型模拟得到的曲线如图 3 所示。也就是说,当 W 下降到小于 D 时,互连线的电迁移寿命并没有随 W 的下降而升高,只是不再下降而已。这两条曲线均与前面讲述的实验现象明显不符。文献[6]实际上可能是用 W 不变 D 改变的情况去拟合 D 不变 W 改变的结果。

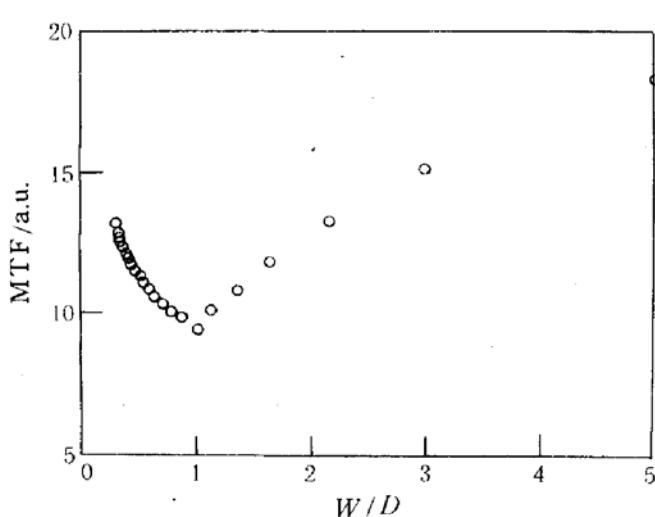


图 2 文献[6]给出的用独立失效元模拟的 MTF 与 W/D 的关系曲线

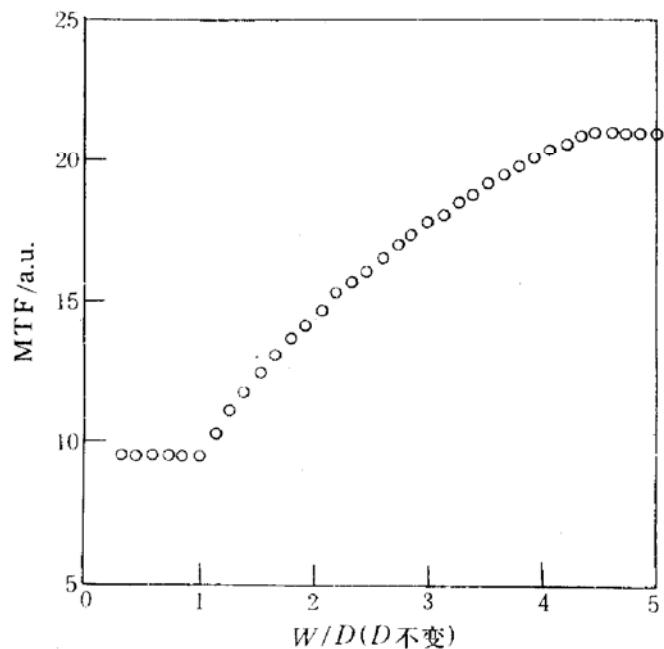


图 3 晶粒大小不变的情况下,用独立失效元模型计算出的 MTF 与 W/D 关系曲线

4 改进的独立失效元模型

基于电迁移失效的物理机制和一些必要的假设,我们对独立失效元模型作了如下改进:

(1) 以三叉点代替晶粒作为独立失效元。所谓三叉点是指三个晶粒的交汇处。由于晶界扩散是引起电迁移失效的主要原因,而三叉点处是晶界流变化最剧烈的地方,因而失效多发生在三叉点处。实验也证实了这一点。所以以三叉点作为独立失效元更符合电迁移失效的物理机制。我们简单地以六边型晶粒来构造导线(如图 4),并近似认为两个方向的几何尺寸相同,都近似等于平均晶粒尺寸 D (这不会带来太大的误差,至少不会改变结果的趋势)。由于互连线失效的主要原因是电迁移导致的空洞(原子耗尽),而不是小丘(原子积累),因而我们仅考虑沿电子流方向发散的三叉点(如图 4a 点),而不考虑汇聚型的三叉点(如图 4b 点)。可以看出,在长为 L ,宽为 W 的导线上,沿线长方向含 L/D 个失效元,在线宽方向含 W/D 个(如图 4A 处)或 $W/D-1$ 个(如图 4B 处)失效元,可以认为两种

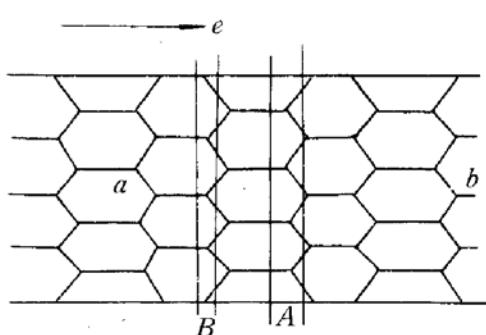


图 4 以六边形晶粒构造的连线示意图
箭头方向为电子流方向。

情况出现的几率均等,即沿线长方向由 W/D 个和 $W/D-1$ 个独立失效元并联而成的等效失效元数均为 $N_s/2$ 个.于是,导线的电迁移失效累积失效率可以表示为

$$G_{SP}(t) = 1 - [1 - (F(t))^{N_{P1}}]^{N_s/2} [1 - (F(t))^{N_{P2}}]^{N_s/2} \quad (4)$$

其中 $N_{P1}=N_p-1$; $N_{P2}=N_p$.

(2) 单个失效元的寿命是晶粒大小的函数.在传统的独立失效元模型中,假设独立失效元的寿命与晶粒大小无关,这是不正确的.显然,对单个失效元来说,在同样的外界条件下,晶粒越大,引起失效越困难,我们假设其寿命与晶粒成正比,即一个独立失效元的中值失效时间表示为

$$t_{50} = t_{50_0} \frac{D}{D_0} \quad (5)$$

其中 t_{50_0} 为晶粒大小为 D_0 时一个独立失效元的中值失效时间;

(3) 类似于独立失效元模型,当导线线宽方向上含一个三叉点时,失效元个数不再随导线变窄而减小.即当 $1 < N_p < 2$ 时, $N_{P1}=1$; 当 $N_p < 1$ 时, $N_{P2}=1$. 而当导线线宽方向上不含三叉点时(只有一个晶粒的竹节结构),如果忽略晶格扩散,该处将不再产生失效,即 $N_p < 1$ 时, $N_{P1}=0$;

(4) 当 $W < D$ 时,线宽越小,导线的竹节结构应该越显著,三叉点的数目会越来越少.就是说,导线沿线宽方向含 0 个失效元的几率增加,含一个失效元的几率减少,假设这种几率与 W/D 成正比变化.

综上所述,改进的独立失效元模型可以表示为

$$G_{SP}(t) = \begin{cases} 1 - [1 - (F(t))^{N_{P1}}]^{N_s/2} [1 - (F(t))^{N_{P2}}]^{N_s/2} & N_{P2} > 2 \\ 1 - [1 - F(t)]^{N_s/2} [1 - (F(t))^{N_{P2}}]^{N_s/2} & 1 < N_{P2} \leq 2 \\ 1 - [1 - F(t)]^{(N_s/2)(W/D)} & 0 < N_{P2} \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

若单个失效元的失效几率为对数正态分布,则

$$F(t) = \int_0^\infty \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t) - \ln(t_{50})}{\sigma}\right)^2\right] dt \quad (7)$$

5 结果和讨论

我们用改进的失效元模型模拟了线宽、晶粒尺寸和长度对电迁移寿命的影响.图 5 显示了在连线宽度不变的条件下,晶粒大小对电迁移中值失效时间的影响.可以看出,随着 D 变大(W/D 变小), MTF 变长,在竹节情况下($W/D < 1$),这种变化尤为显著.这与实验事实符合得很好.

晶粒尺寸保持恒定时, MTF 随线宽 W 的变化曲线如图 6 所示.在达到竹节结构以前, MTF 随 W 减小(W/D 减小)而减小;到达竹节结构后,随 W 变小, MTF 迅速增加.这个结果与传统的 IFU 模型相比,改进是明显的.不过,类似于独立失效元模型, MTF 的极小值仍然总出现在 $W/D=1$ 处.在不同实验中, MTF 的最小值出现在不同位置可能与到晶粒大小的具体分布有关,需要进一步探讨.

我们还对线长与 MTF 的关系进行了模拟.结果显示,在连线较短时,导线电迁移寿命随导线的增长明显下降.当导线较长时,这种趋势逐渐缓慢.这与实验结果也近似符合.

用本模型得到的整条导线的失效几率符合多重对数正态分布(MLN)^[11],可近似视为对数正态分布.

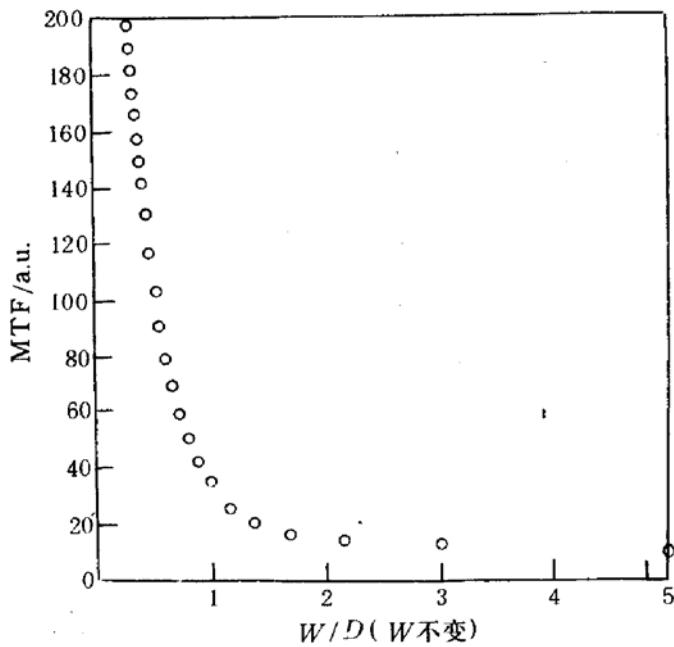


图 5 宽度不变的情况下,用改进的独立失效元模型计算出的 MTF 与 W/D 的关系曲线

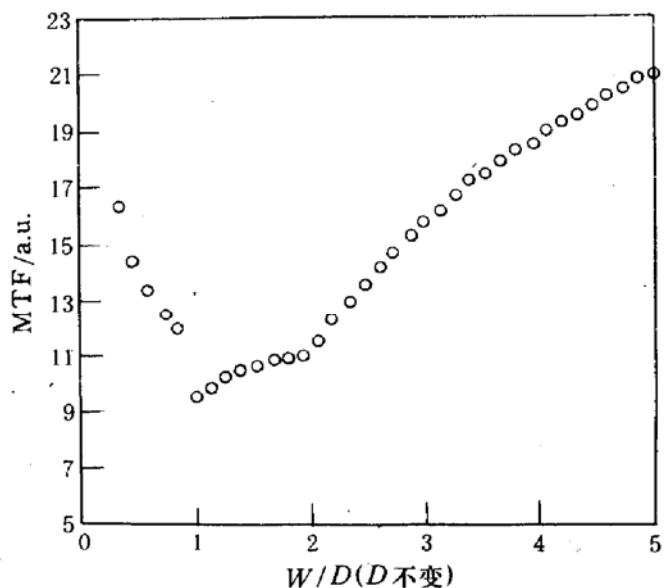


图 6 晶粒大小不变的情况下,用改进的独立失效元模型计算出 MTF 与 W/D 的关系曲线

6 结论

我们以三叉点代替晶粒作为失效元,并不再假设每个失效元的中值失效时间与晶粒大小无关,这都比传统的独立失效元模型更接近电迁移的物理机制.对连线的宽度、晶粒大小与电迁移失效寿命的关系的模拟结果也比传统的独立失效元模型更符合实验事实.因而不失为描述电迁移失效的一种较好的模型.若引入晶粒大小分布,晶格扩散的影响,该模型有望得到更好的结果.

参 考 文 献

- [1] 武国英,等,微电子技术,1994,22(1):1~10.
- [2] J. M. Schooen *et al.*, J. Appl. Phys., 1980, 51(1): 513~521.
- [3] L. E. Felton *et al.*, J. Appl. Phys., 1985, 58(2): 723~727.
- [4] T. J. Smy *et al.*, J. Appl. Phys., 1973, 73(6): 2821~2825.
- [5] 高光渤海,等,半导体可靠性物理,北京:科学出版社,1987.
- [6] J. Cho *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1989, 54(25): 2577~2579.
- [7] E. Kinsboon, Appl. Phys. Lett., 1980, 36(6): 968~972.
- [8] S. Vaidya *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1980, 36(12): 464~466.
- [9] K. Y. Fu *et al.*, 1990 Symp. VLSI Tech., 29~30.
- [10] B. K. Liew *et al.*, 1990 Proc. 30th Int. Reliab. Phys. Symp. IEEE, 111~118.
- [11] E. M. Atakov, VMIC Conf., 1992, 336~371.

Improved Independent Failure Unit Model for Electromigration

Li Zhihong, Gu Ye, Wu Guoying and Wang Yangyuan

(Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871)

Received 10 May 1995, revised manuscript received 14 August 1995

Abstract Independent Failure Unit Model (IFU) currently used to predict Electromigration failure is inadequate. According to physical mechanism and some necessary assumptions, the model has been modified. The triple points instead of grains are considered as the Independent Failure Units, and it's no longer assumed that t_{50} of each IFU is independent on the size of grain. Our simulation results, the relations of lifetime with both linewidth and grain size, are more consistent with the experimental results than the conventional IFU model.

PACC: 6610, 8130