

多层金属化系统中蓄水池效应对电迁移寿命的影响

郭春生 李秀宇[†] 李志国 吴月花

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100022)

摘要: 在 W 通孔的多层金属化系统中, 金属离子的蓄水池效应对其电迁移寿命的影响很大, 文中设计制作了 12 种不同的蓄水池结构, 并进行了电迁移实验. 着重考察蓄水池面积、通孔位置、通孔数目对互连线电迁移寿命的影响, 得出蓄水池的面积是影响电迁移寿命的主要因素.

关键词: 互连线; 蓄水池效应; 电迁移

EEACC: 2560J; 0170N

中图分类号: TN32 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2007)S0-0452-05

1 引言

随着半导体制造工艺的不断进步, 器件密度不断提高, 金属互连引线的宽度越来越小, 互连线中的电流密度和功率密度随之大大增加. 在较高的电流密度作用下, 互连线中的金属原子将会沿着电子运动方向进行迁移, 即电迁移. 电迁移能引起金属离子在互连线中重新分布, 在金属离子移走的区域就容易形成空洞, 增加互连线的电阻; 随着这种迁移运动的加剧空洞不断长大, 最终贯穿互连线, 形成开路; 在金属离子堆积的区域容易形成晶须, 造成互连线层间短路; 金属离子不断堆积晶须持续长大, 最终穿透钝化层, 产生腐蚀源. 金属互连线的电迁移失效是影响集成电路寿命的重要因素. 本文主要研究了 W 通孔的多层互连线系统中通孔设计对电迁移寿命的影响, 据此得出提高互连线电迁移寿命的措施.

2 基本原理

如图 1 所示, 具有阻挡层 W 通孔的多层金属化系统中, 在通孔处不可移动的 W 形成了“阻挡边界”, 因此电迁移失效更容易在 W 通孔附近区域发生. 这是由于通孔处金属离子在电子风的作用下向右移动不断流失, 而通孔中的金属离子却不能穿越阻挡边界来填充通孔处出现的空位, 随着电迁移的加剧, 空洞不断扩大, 直至引起开路失效. 多层互连线结构中电子流上方的帽盖、通孔区域及互连线末端(end lap)组成的部分即为蓄水池区, 如图 2 所示.

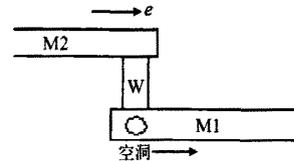


图 1 通孔处空洞的分布

Fig. 1 Distribution of void under vias

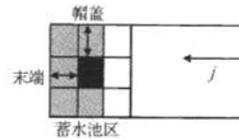


图 2 典型的蓄水池结构

Fig. 2 Structure of reservoir

不少报道已经证明, 在多层互连线结构中, 接触/通孔处“蓄水池区(reservoir area)”的存在会对电迁移的寿命产生影响^[1,2]. Nguyen 等人^[3]通过对具有不同蓄水池区面积的结构进行数值模拟, 并将空洞互连线成形前能够承受的临界应力作为失效标准来分析蓄水池区面积对电迁移寿命的影响. Dion 等人^[4]对不同线宽的互连线蓄水池效应进行了分析.

所谓的蓄水池效应(reservoir effect)是指在金属互连线中有一部分区域能够提供大量的金属离子(就像一个金属离子库), 在电迁移过程中能够填充接触孔/通孔附近互连引线中形成的空洞, 从而抑制空洞的扩大. 蓄水池区本身不导电或者几乎不导电, 能为阻挡边界附近区域不断在电子风作用下移走的金属离子提供补偿的那部分金属. 蓄水池区的存在

[†] 通信作者. Email: lixiuyu@gmail.com

2006-12-12 收到, 2006-12-28 定稿

可以减缓由电迁移引起的失效,从而延长互连线的寿命.

3 样品设计与实验

为了研究蓄水池效应对电迁移寿命的影响,考察蓄水池面积、通孔数目、通孔大小及结构、end lap 等各因素所起的作用,设计了以下 12 种互连线结构.如图 3 所示,其中 K,L 通孔面积为 $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$,其余通孔面积均为 $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$.

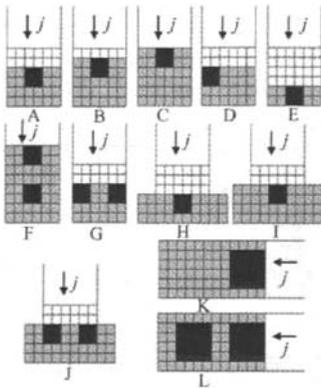


图 3 12 种互连线结构

Fig. 3 12 types of interconnect structures

本实验利用 HPVIE 控制进行线上测量,实验及测试框图如图 4 所示.在电迁移实验前,样品在 200°C 下退火 4h.由 PC 机控制电流源施加电流密度为 $1 \times 10^6 \text{ A}/\text{cm}^2$ 的恒定电流,控制万用表测试电阻,以电阻增大 50% 为失效判断依据.为了加快实验速度,通过温箱控制实验温度恒定为 200°C .图 4 中的多路开关用来控制对多个样品进行测试时的接口选择.

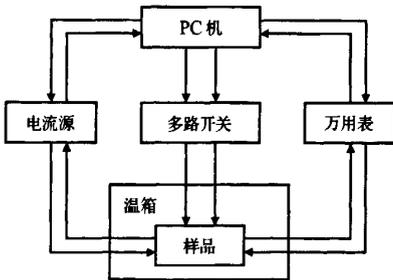


图 4 实验及测试框图

Fig.4 Frame of the experiment and measure apparatus

4 实验结果与数据分析

表 1 给出了 12 种结构对应的电迁移寿命.

表 1 蓄水池结构及其对应的失效时间

Table 1 Relationship of reservoir structure versus failure time

样品结构	A	B	C	D	E	F
寿命/min	498	726	858	330	108	888
样品结构	G	H	I	J	K	L
寿命/min	480	726	897	942	1188	1485

4.1 蓄水池区面积对 EM 的影响

图 5 所示为 A,B,C,E 4 种结构的电阻变化率随时间的变化及电迁移失效的时间.其互连线末端长度分别为 2,3,4 和 $1\mu\text{m}$,通孔大小均为 $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$.

从图 5 可以看出,随着 end lap 长度的增大,蓄水池面积也不断增大,从 E 结构对应的 $12\mu\text{m}^2$ 到 C 结构的 $36\mu\text{m}^2$.电迁移失效时间从 108min 提高到 858min.E 结构电阻变化非常快,这主要因为 E 结构通孔在互连线的边缘,end lap 为零,当通孔附近的金属随着电子风发生迁移而耗尽时没有金属能够提供补充,因此在金属离子耗尽区域会形成空洞.空洞不断长大,伴随着电阻迅速增大,最终引起失效.而相对 C 结构,由于 end lap 为 $4\mu\text{m}$,虽然在大电流密度作用下通孔附近的金属发生电迁移而耗尽,但是周围有很多不参加导电的金属,即“蓄水池区”,可以提供金属补偿,因此在整个电迁移过程中电阻变化非常缓慢.在 756min 的时候发生突变,最终在 858min 时电阻变化超过 50%,判断为失效.A,B 结构相对应的电迁移寿命分别为 498 和 726min.由此可见,end lap 较长的蓄水池结构,相对应的蓄水池面积也较大,电迁移寿命就越长.因此在允许的工艺、设计范围内增大 end lap 的长度可以很大程度上提高互连线的电迁移寿命.

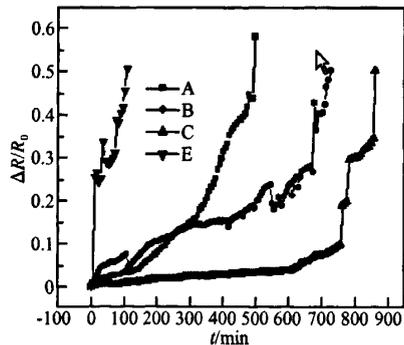


图 5 结构 A,B,C,E 电阻变化率随时间的变化关系

Fig.5 Curves of $\Delta R/R_0$ of structure A,B,C,E versus time

图 6 给出了结构 B, H 的电阻变化率随时间的变化关系, 从图中可以看出两种结构的电迁移寿命几乎相同. 因为两种结构都是单通孔, 且蓄水池区的面积也相同, 都为 $30\mu\text{m}^2$. 但是结构 H 在电迁移的过程中电阻变化率波动比较大, 分析原因可能与蓄水池区的结构有关. H 结构的 end lap 长度为 $1\mu\text{m}$, 较 B 结构的 $3\mu\text{m}$ 小很多. H 结构中金属离子补偿作用除了帽盖处的离子外, 主要来自于互连线线宽两侧的剩余金属. 由于结构的影响, 该部分离子对耗尽区的补偿作用相对较慢, 因此电阻率在电迁移过程中会发生波动. 但总体来说, 在蓄水池面积相同的情况下, 互连线的电迁移寿命变化不大.

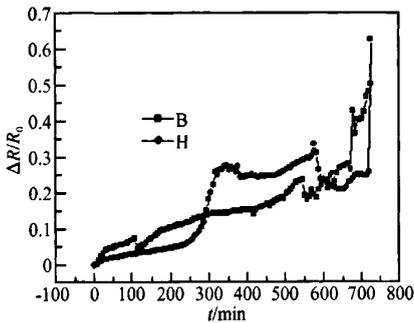


图 6 结构 B, H 电阻变化率随时间的变化关系

Fig. 6 Curves of $\Delta R/R_0$ of structure B, H versus time

上面得出的蓄水池面积对互连线电迁移寿命的影响与 Nguyen 等人通过对具有不同蓄水池区面积的结构进行的数值模拟结论一致. 模拟中通过将空洞形成前互连线能够承受的临界应力作为失效标准来分析蓄水池区面积对电迁移寿命的影响.

蓄水池区面积的增加使得应力集中降低. 面积大的对于电迁移引起的空洞补偿效应明显, 形成空洞的几率较小, 应力也较低. 只要有更大的蓄水池, 就能为接触/通孔附近区域提供更多金属离子. 可提供的离子越多, 应力的增长就会变慢, 空洞形成的可能性就越小, 电迁移的影响就越小, 从而增加互连线的寿命.

4.2 通孔位置对 EM 的影响

结构 A, D 考察了通孔位置对互连线的电迁移寿命的影响. 两种结构的蓄水池区面积相同, 但是 A 结构的通孔处于互连线宽的中间位置, 而 D 结构的通孔处于互连线的边缘.

图 7 给出了 A, D 结构电阻变化率随时间的变化关系. 从图 7 中可以看出, A 结构在电迁移实验中电阻率变化比较平滑, 而 D 结构的电阻率变化波动较大, 且伴随突变的发生. 其原因在于 A 结构的通孔在互连线线宽的中间位置, 发生电迁移时, 被耗尽

的金属离子可以从周围的区域迅速得到补充, 而 D 结构的通孔位于互连线的边缘, 虽然蓄水池区面积相同, 可以提供补充的金属离子与 A 结构相同, 但是其有效性却相差很多, 因此对金属耗尽区的补偿性较差, 电阻变化率才会发生突变, 电迁移寿命也相对降低.

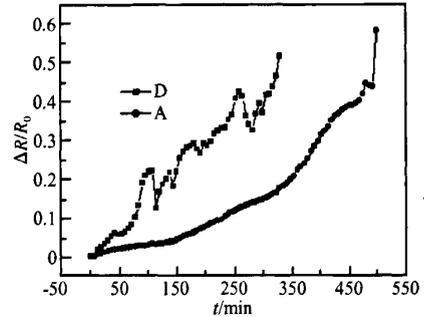


图 7 结构 A, D 电阻变化率随时间的变化关系

Fig. 7 Curves of $\Delta R/R_0$ of structure A, D versus time

4.3 通孔数目对 EM 的影响

结构 F, G 均为两个通孔的结构, 通孔大小均为 $4\mu\text{m}^2$. F 结构的通孔沿互连线长度方向排列, 蓄水池面积为 $48\mu\text{m}^2$, 而 G 结构的通孔沿互连线宽度方向排列, 蓄水池面积为 $24\mu\text{m}^2$. 图 8 给出了 F, G 结构电阻变化率随时间的变化关系.

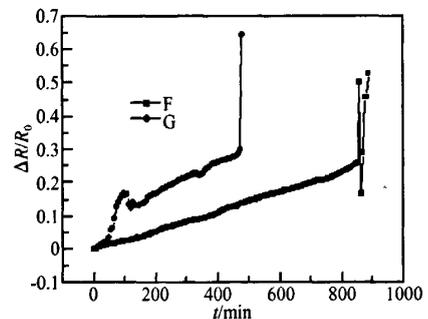


图 8 结构 F, G 电阻变化率随时间的变化关系

Fig. 8 Curves of $\Delta R/R_0$ of structure F, G versus time

虽然两种结构具有相同的通孔数目, 但是从实验数据可以看出, F 结构互连线的电迁移寿命比 G 结构的电迁移寿命大将近一倍, 与蓄水池面积之比相同. 因此可以判断在蓄水池面积相差悬殊时, 其面积是影响互连线电迁移寿命的主要因素. 虽然增加通孔可以减小通过的电流密度, 起到分流作用, 但是在上述的情况下可见分流作用并不占主导地位.

结构 A 为单通孔结构, 蓄水池面积为 $24\mu\text{m}^2$,

结构 F 为双通孔结构,蓄水池面积为 $48\mu\text{m}^2$. 图 9 给出了结构 A, F 在电迁移实验中电阻率的变化曲线. 对于 A 和 F 两种结构来说,由于蓄水池的面积是从互连线末端开始到最右边通孔的边缘结束,所以 F 结构的蓄水池面积相比于 A 结构的大一倍,能够提供的金属离子也就相对多,对电迁移的改善较大,互连线的寿命更长.可见 F 结构中增加通孔数目主要是起到增加蓄水池面积的作用,而非分流.

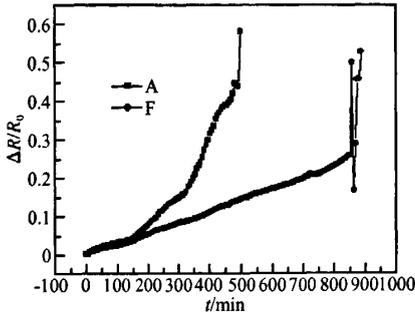


图 9 结构 A, F 电阻变化率随时间的变化关系
Fig. 9 Curves of $\Delta R/R_0$ of structure A, F versus time

如图 10 中的 I, J 结构在蓄水池面积相同的条件下,结构 J 比结构 I 多一个通孔,理论上增加一个通孔,可以减小通过单个通孔的电流密度. 单个通孔的面积均为 $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$. 从上图可以看到 J 结构的寿命相对长一点,但总的来说两种结构的电迁移寿命相差很小,也就是说增加通孔数目对电迁移寿命影响不是很大. 其次, I 结构最初的电阻率变化非常缓慢,这可能与通孔处于互连线线宽中间位置有关,但电迁移发生时,金属离子的损耗能够很快从周围得到补充,直到可提供补充的离子耗尽,电阻发生突变,引发失效.

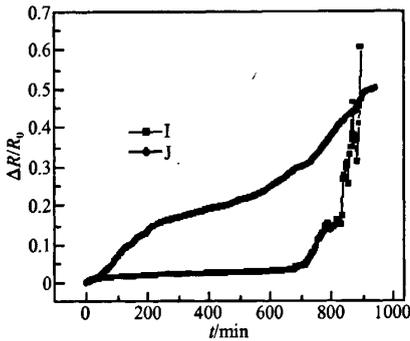


图 10 结构 I, J 电阻变化率随时间的变化关系
Fig. 10 Curves of $\Delta R/R_0$ of structure I, J versus time

图 11 中 A, G 结构的电迁移寿命基本相近, A 略大. A, G 两种结构的蓄水池区面积相同, G 结构

具有两个通孔.但是从实验数据看出,增加通孔数目并没有增大互连线的失效寿命,反而有所降低.这与该结构的通孔均位于互连线线宽的边缘有关,对蓄水池区的补偿利用率较低.

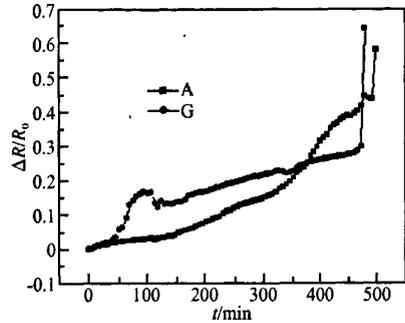


图 11 结构 A, G 电阻变化率随时间的变化关系
Fig. 11 Curves of $\Delta R/R_0$ of structure A, G versus time

总结上述几种情况可以看出,判断通孔数目对互连线的电迁移寿命的影响不能单独地考虑,而应该判断分流效应是否占主导地位,并结合通孔的位置结构、蓄水池面积综合考虑.

5 结论

蓄水池区对电迁移寿命的延长效应是由于蓄水池区金属原子可以为通孔附近被电子风带走的原子提供补给,蓄水池区的原子总量决定着蓄水池效应的大小.因此,一般来说蓄水池面积起决定性作用,但同时又与通孔的位置、大小、数目有关.在蓄水池面积相同的情况下,对蓄水池区的利用率高的结构其电迁移寿命相对延长.多通孔结构可以延长电迁移的寿命,当通孔/接触区面积较大时,这种效应会比较明显,这取决于通孔/接触区与蓄水池区的相对尺寸.

参考文献

- [1] Le H A, Tso N C, McPherson J W. Electro-migration perform of W-plug via fed lead structure. *J Electrochem Soc*, 1997, 144(7): 2522
- [2] Atakov E M, Stiram T S, Dunnell D, et al. Effect of VLSI interconnect layout on electro-migration perform. *Proceeding of the 36th International Reliability Physic Symposium*, 1998: 348
- [3] Nguyen H V, Salm C, Mouthaan T J, et al. Modeling of the reservoir effect on electro-migration lifetime. *Proceedings of 8th IPFA, Singapore*, 2001: 467
- [4] Dion M J. Reservoir modeling for electro-migration improvement of metal systems with refractory barrier. *Annual International Reliability Physics Symposium, Orlando, Florida*, 2001: 768

Reservoir Effect in Multi-Layer Metal System

Guo Chunsheng, Li Xiuyu[†], Li Zhiguo, and Wu Yuehua

(Reliability Laboratory, College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Metal iron reservoirs in multi-layer metal system with W via have great effects on the electro-migration lifetime. In this study, the sample with different reservoir structure was designed for the electro-migration test. The effect of reservoir area, via displacement, amount and size on electro-migration lifetime was concluded, and reservoir area plays a significant role among all factors.

Key words: interconnects; reservoir effect; electro-migration

EEACC: 2560J; 0170N

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0452-05

[†] Corresponding author. Email: lixiuyu@gmail.com

Received 12 December 2006, revised manuscript received 28 December 2006