

# 利用回流效应的新型金属化系统研究\*

李志国 张 炜 孙英华 程尧海 郭伟玲 吉 元 李学信

(北京工业大学 电子工程系 北京 100022)

**摘要** 本文研究了 Al 金属化系统中的回流效应, 提出了一种全新三层金属化系统抗电迁徙结构, 同时对新旧两种结构的金属化系统进行了各种动态应力的电迁徙实验对比, 结果显示出新结构在抗电迁徙性能上的明显优越性, SEM 分析对此也提供了有力的证据.

EEACC: 2550F, 0170N; PACC: 6630Q

## 1 引言

随着 VLSI 和 ULSI 迅速发展和微波功率器件性能的提高, 半导体器件的特征尺寸按比例缩小, 目前已达到微米并向亚微米方向发展, 金属化电流密度已达到  $10^5 \text{ A/cm}^2$  数量级, 极易造成金属化系统电迁徙失效, 因此成为半导体器件失效的突出问题, 再一次成为研究可靠性机理和技术最为活跃的领域, 进展相当迅速.

## 2 理论

### 2.1 电迁徙和回流效应

所谓电迁徙是指在高电流密度应力作用下金属薄膜中的金属离子与快速运动的电子(电子风)间发生了动量交换而产生的金属离子沿导体的输运现象, 称为电迁徙. 电迁徙将引起金属离子在阴极耗尽而出现空洞, 在阳极金属离子堆积而出现铝尖峰或小丘.

随着电迁徙引起器件失效的日益严重, 人们曾研究过多种方法, 如合金膜(Al-Si, Al-Cu 等), 介质覆盖, 多晶硅金属化、多层金属化等. 但实验发现, 这些措施在抗电迁徙性能上仍然是有限的. 1970 年 Blech 深入研究了电迁徙动力学机理. 发现, 电子风引起的金属离子流在导体条的正极区造成质量堆积和在负极区造成质量耗尽, 将会产生一反向于电迁徙的压力, 这个压应力将会引起堆积的金属离子反向扩散, 抵消电迁徙离子流. 此反向离子流

\* 国家自然科学基金资助项目

李志国 男, 1940 年生, 高工, 现从事微电子器件可靠性研究与教学工作

张 炜 男, 1966 年生, 博士生, 现从事微电子器件可靠性研究

孙英华 女, 1968 年生, 讲师, 现从事微电子器件可靠性研究与教学工作

1995 年 9 月 23 日收到初稿, 1995 年 11 月 22 日收到修改稿

就称为“回流”<sup>[1]</sup>。因此，可设想理论上存在某一时刻，正向电迁徙流和回流完全相互抵消，使净离子迁徙流为零。显然，回流可用来抵消电迁徙失效，提高器件金属化系统的可靠性。

## 2.2 回流模型的提出

根据上面提出的设想，分析一下在回流作用下沿条长方向 Al 金属离子的浓度分布：设 Al 金属化条长为  $L$ ，两端与 Ti 条相连。因 Ti 比 Al 电迁徙阻力强，可认为 Al 条两端边界处离子流为零，则下列连续性方程成立：

$$\begin{cases} \frac{\partial N_b}{\partial t} = \frac{\delta D_b}{S} \left( -\frac{\partial^2 N_b}{\partial X^2} + \frac{z_b^* q \rho_b j}{f k T} \frac{\partial N_b}{\partial X} \right) \\ N_b(x, 0) = N_0, \quad t = 0, \quad 0 \leq X \leq L \\ \left[ -\frac{\partial N_b}{\partial X} + \frac{z_b^* q \rho_b j}{f k T} N_b \right]_{X=0,L} = 0, \quad t > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $N_b$  为金属离子浓度； $\delta$  为平均晶粒边界宽度； $S$  为平均晶粒尺寸； $z^*$  为有效电荷； $\rho$  为电阻率； $q$  是电子电荷； $j$  是平均电流密度； $b$  表示晶界参数。

$$\text{令 } m = \frac{\sigma D_b}{S}, \quad n = \frac{z_b^* q \rho_b j}{f k T}$$

利用分离变量法解上述方程得到分析解为：

$$N_b(x, t) = \frac{N_0 nl}{e^m - 1} e^{nx} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8N_0}{nl} \left( \frac{2k\pi}{nl} \right)^2 \frac{1 + (-1)^{k+1} e^{-nl/2}}{[1 + (\frac{2k\pi}{nl})^2]^2} \times [\cos \frac{k\pi}{l} x + \frac{nl}{2k\pi} \sin \frac{k\pi}{l} x] e^{\frac{nx}{2}} e^{\frac{m}{4}(\frac{4k^2\pi^2}{l^2} + n^2)t} \quad (2)$$

上式表示了离子浓度  $N_b$  与位置和时间的关系，在零时刻，离子分布是均匀的， $N_b(X, 0) = N_0$ 。随着电迁徙的发生，开始有离子浓度出现，回流效应开始增强，离子堆积与耗尽的速度减慢，最后呈现稳态分布。将(2)式对时间求导可得到离子耗尽和堆积的速率：

$$R_{\text{ale}} = \frac{\partial N}{\partial t} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8N_0}{nl} \left( \frac{2k\pi}{nl} \right)^2 \frac{1 + (-1)^{k+1} e^{-nl/2}}{[1 + (\frac{2k\pi}{nl})^2]^2} \times [\cos \frac{k\pi}{l} x + \frac{nl}{2k\pi} \sin \frac{k\pi}{l} x] e^{\frac{nx}{2}} \frac{m}{4} \left( \frac{4k^2\pi^2}{l^2} + n^2 \right) e^{\frac{m}{4}(\frac{4k^2\pi^2}{l^2} + n^2)t} \quad (3)$$

图 1 显示了 Al 条两端和中间区域金属离子净迁徙速率。由图 1 可以看出有回流作用时离子迁徙速率随时间以指数形式趋向于零。

## 3 实验结果和讨论

为了从实验上证实这一理论并考虑其在实际器件中的应用，我们设计了一三层金属化的 Si 欧姆接触结构的回流加固实验样品，见图 2。考虑电子由界面流出的情况（负性接触孔），在高电流密度下会造成金一半界面处金属离子耗尽，而造成接触孔开路。回流加固结构在第一层 Al 金属化距接触孔  $L_g$ （回

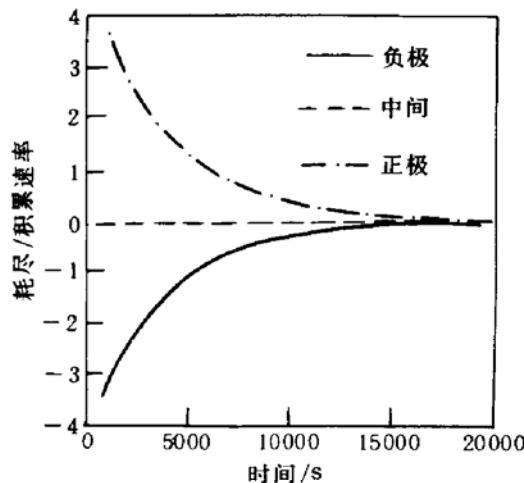


图 1 正负极及条中部金属离子迁徙速率与时间的关系

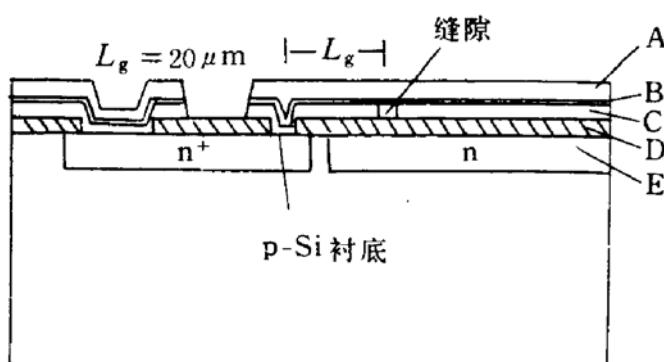


图 2 新型欧姆接触回流加固结构剖面图

图中金属层 A: Al-1%Si(500nm); B: Ti(25nm)-W(200nm)-Ti(25nm); C: 同 A, D: 500nm 热生长 SiO<sub>2</sub>; E: 一内置温度传感器, 样品具有 Kelvin 结构以实现接触电阻的精确测量

250°C, 动态电流斜坡试验, 电流斜坡速率为 1mA/min, 两种结构的电流耐力对比曲线见图 3. 从实验曲线上看到, 在电流密度小于  $2.5 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$  时, 在抗电迁徙性能上回流加固结构明显地优于普通结构, 这个电流密度远远超过美军标 (MIL-M-38510) 规定的 Al 金属化使用标准. 而在极高电流密度下 ( $> 2.65 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ ) 两种结构的中值寿命 MTF 趋于一致. 据分析这是由于缝隙处选用的 Ti/W/Ti 材料, 电阻率较高, 它将会产生较大的焦耳热而首先失效, 所以在极高电流密度条件下回流加固结构的优越性未充分显示出来. 我们曾做过红外热分布图, 缝隙处显示出一温度高峰, 证实了这一分析, 若改用 Ti/TiN/Ti 低阻材料将会有明显改善.

### 3.2 回流加固结构与普通结构频率特性对比

将加固结构与普通结构样品置于 250°C,  $2.2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ , 占空比 D=50% 脉冲加速应力下, 两种结构 MTF 与脉冲频率之间的关系对比见图 4. 从图 4 中看到在 f=0 时, 两种结构曲线相交于一点, 具有相同的 MTF 值, 由于缝隙处的焦耳热引起的失效, 使回流加固结构的优越性未充分显示出来, 其原因同 3.1 节的分析. 当频率升高, 应力减弱, 缝隙处的热失效亦相对减小, 而回流加固作用显示出来, 新结构的 MTF 明显增大.

另外, 在 250°C,  $1.9 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$  峰值, 占空比为 50% 的直流指数频率斜坡脉冲实验中还发现了电迁徙电阻随频率升高的阶跃上升现象, 见图 5. 据分析这与 Al 条中空洞的形成、湮灭与应力集中、释放间的相互作用有关. 曲线中的阶跃上升表示空洞的形成, 对应着应力的释放; 而曲线降低或平台部分表示空洞的湮灭, 对应着应力的积累, 这种阶跃过程显示了缺陷的本征弛豫过程.

流长度) 处开一  $2\mu\text{m}$  的缝隙(普通结构无此缝隙). 当  $L_g$  小于电迁徙临界长度, 则缝隙至接触孔的金属化将是稳固的<sup>[2]</sup>. 第二层金属化采用 Ti(25nm)/W(200nm)/Ti(25nm) 复合结构, 其作用有二: 一可堵塞缝隙, 中断离子流通路, 二则可作为第一、三两层金属化膜的阻挡层, 起到抑制空洞的作用. 第三层金属化仍为 Al 金属化, 作为导电层.

为了考察两种结构的抗电迁徙性能进行了如下对比试验.

### 3.1 回流加固结构与普通结构电流特性的对比

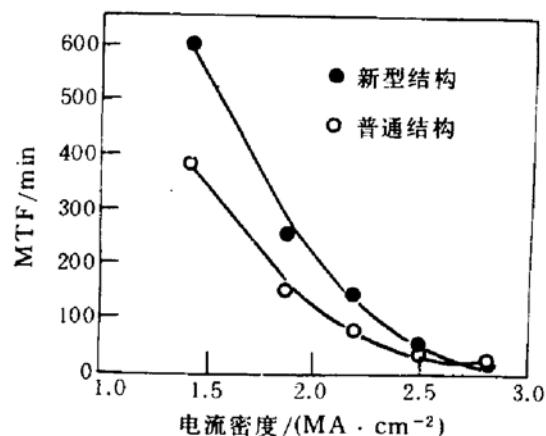


图 3 250°C, 100kHz, 占空比为 50% 的直流脉冲下 NTF 与电流密度间的关系

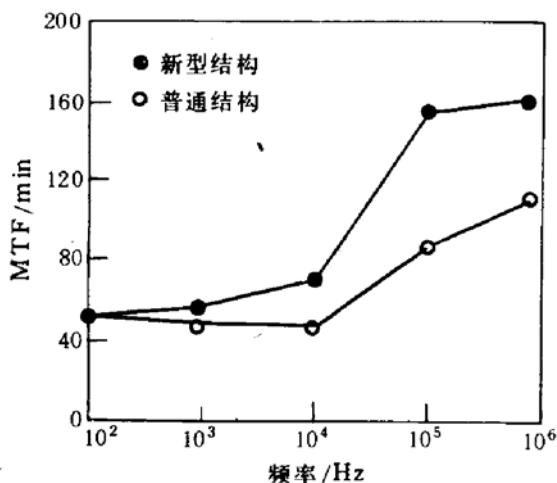


图4 250°C、 $2.2 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$  峰值、占空比为 50% 的直流脉冲下 NTF 与脉冲频率间的关系曲线

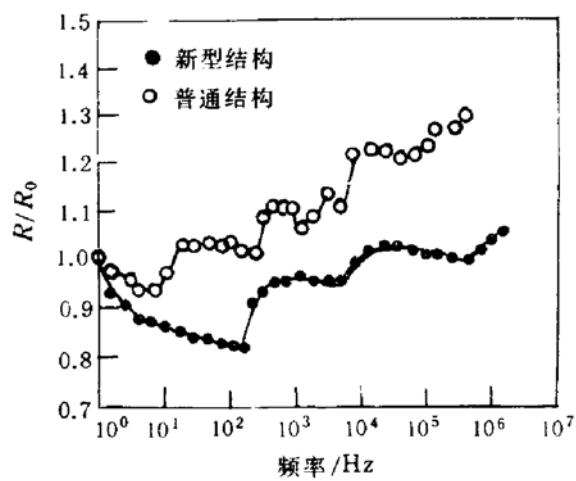


图5 250°C、 $1.9 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$  峰值、占空比为 50% 的直流指数频率斜坡脉冲下接触电阻变化与频率的关系曲线

### 3.3 回流加固结构与普通结构温度特性对比

在  $3.3 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$  条件下进行了 50~300°C 的温度斜坡试验对比, 目的在于比较两种结构对温度的承受能力。实验结果表明, 加固结构比普通结构的温度耐力大 30°C。这个试验从另一个侧面说明了回流加固结构的优越性。需要说明的一点, 加固结构“缝隙”处热分布的影响, 使结果低于理想情况, 若缝隙处电阻降低, 焦尔热减小, 则加固结构的温度耐力将会进一步提高。

### 3.4 问题与改进

新结构缝隙处金属化材料分布的非均匀性使缝隙处电流密度出现尖峰。实验样品缝隙处由 TiWTi 填充, 其阻值较上层对应部分的 Al 条大近一个数量级, 故此处大部分电流为上层铝条短路, 出现了电流分布不均匀的区域, 使该段电流密度增大, 而成为一个不安全因素。因此这种结构设计的中间阻挡层应采用高电迁移阻力低电阻率的材料, 以避免缝隙处温度过高而先失效, 我们对 TiWTi(电阻率  $\rho = 40 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) 和 TiN(电阻率  $\rho = 10 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) 两种阻挡层材料在回流加固结构上下导体层的电流分布作了计算机模拟。对 TiWTi 缝隙处上层铝的电流密度为下层铝的 19 倍, 而对 TiN 则仅为 3 倍, 这就大大地提高了缝隙处的可靠性。

## 4 SEM 分析

为进一步证实回流效应, 对新旧两种结构的实验样品进行了实验后的 SEM 观察, 如图 6 所示(见图版 I)。负性接触孔(电子由界面流出)界面处明显观察到普通结构样品 Al 耗尽严重, 极易造成接触孔开路。正性接触孔(电子由界面流入 Si 中)界面处明显观察到普通结构样品 Al 的堆积严重。进一步证实了回流加固结构明显优于普通结构。

## 5 结束语

本文从理论上建立了利用回流抑制电徙动的模型;对回流与电徙动之间的相互作用进行了定量解释,提出了一种三层金属化的欧姆接触回流加固结构,并从实验上证实了回流模型的正确性与实际应用的可行性.

### 参 考 文 献

- [1] L. A. Blech, J. Appl. Phys., 1977, **48**: 473.
- [2] V. K. Koleshko *et al.*, Thin Solid Films, 1990, **192**: 181.

## Study of Novel Metallization System Using Backflow Effect

Li Zhiguo, Zhang Wei, Sun Yinghua, Cheng Yaohai,  
Guo Weiling, Ji Yuan and Li Xuexin

(Beijing Polytechnic University Electronic Engineering Dept., Beijing 100022)

Received 23 September 1995, revised manuscript received 22 November 1995

**Abstract** A novel multi-layered metallization structure using backflow is proposed, It can intentionally restrain the electromigration failure in contact region. Under kinds of dynamic stress including current, frequency and temperature ramp, the experimental data show an evident improvement for the novel structure over the common one. SEM micrographs provide powerful proof too.

EEACC: 255OF, 0170N; PACC: 6630Q