

ナノサイズアルミニウム配線のエレクトロマイグレーション誘起応力の挙動

英 崇夫^a, 日下一也^a, 新宮原正三^b, 坂田修身^c, 松英達也^d, 野田和宏^e, 旗谷充彦^e, 大島浩二^f
^a 徳島大学 工学部, ^b 広島大学 先端物質科学研究所, ^c 高輝度光科学研究センター, ^d 新居浜工業高等専門学校, ^e 徳島大学大学院, ^f 広島大学大学院

はじめに : 近年, LSI の小型化, 高集積化に伴って配線の微細化が急速に進んでいる. 半導体の国際技術ロードマップによると, DRAM (Dynamic Random Access Memory) 内の配線最小幅は, 現在約 120nm である¹⁾. 極細配線に電流を流すとエレクトロマイグレーションと呼ばれる断線や短絡故障が発生する^{2,3)}. 高密度の電子の流れおよびそれに伴う原子の移動がその原因である. これら断線や短絡の前駆的現象として生じる配線中の応力変動を測定することで, エレクトロマイグレーションの発生初期の挙動が明らかとなる.

応力測定の有効な手段の一つに, X線回折を用いた方法がある. ところが, 現在の応力測定装置ではX線ビームの最小サイズが 100 μm のオーダーであるため, サブミクロンサイズの配線構造体の応力測定は不可能である. そこで, 本研究では放射光の高輝度特性と高空間分解能を利用してミクロンサイズの配線幅のエレクトロマイグレーション誘起応力を測定し, 内部応力の蓄積を時間および配線の場所の関数として明らかにする.

配線試料: 本研究で使用したアルミニウム配線の電極パッド近傍の顕微鏡写真を図 1 に示す. 1 本のジグザグ配線の両端にタングステン線をイオンビーム支援堆積法 (Ion beam assist method) で蒸着することで, 9本の平行配線を形成した. 配線材料はAl-1.0%Si-0.5%Cu合金で, 基板面法線方向に結晶の{111}が優先配向した多結晶構造体である. また, 配線 1 本のサイズは幅 1.7 μm , 高さ 0.8 μm , 長さ 1,350 μm であり, 保護膜はない.

実験方法: 本研究ではBL13XUの多軸ディフラクトメータ上にヒーター付き試料台を設置し, その上に配線試料を固定した. 配線試料は180 $^{\circ}\text{C}$ に加熱され, エレクトロマイグレーションが起こりやすい環境に保持した. 測定に使用した放射光のエネルギーは8.00keV($\lambda=0.154976\text{nm}$)であり, 照射面積は180 \times 180 μm^2 である.

図 2 にXRD測定位置を示す. AからEの5ヶ所に

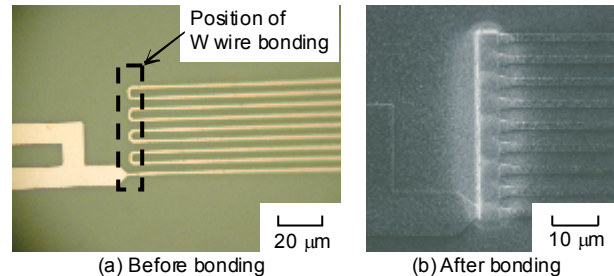


図 1 配線試料の顕微鏡写真; (a) タングステン結線前, (b) タングステン結線後

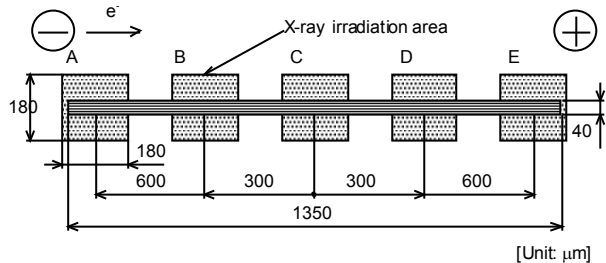


図 2 XRD測定的位置

ついて A から順番に連続して測定を行った. 1 箇所の XRD 測定時間は約 3 分であった. A から E までの測定を 1 サイクルとし, 1 サイクルの測定時間が 20 分になるように調整した. 表 1 にエレクトロマイグレーション試験条件を示す. A 側を陰極, E 側を陽極となるように電流を流した場合の電流値を正, 逆の場合を負と定義した. 配線に供給される電流は, フィードバック制御により一定に保持した. また, 供給電流は段階的に大きくし, 電流値を変化させる前には, 電流の供給を一旦停止させて回折線の変化を調べた. 実験番号 5 の開始直後に放射光の供給が長時間にわたり停止したので, その間はやむを得ず実験を中断した.

XRD測定は, $2\theta=38.4^{\circ}$ 付近に現れる111回折線を用いた. 111優先配向を有する立方晶材料の場合, 一般に2点法⁴⁾を適用して内部応力が測定される. これは, 試料表面法線と結晶面法線との成す角 ψ が 0° および 70.5° のときに得られる回折線を利用する方法であるが, 測定において長い時

表 1 エレクトロマイグレーション試験条件

EM test number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Supplied current I , mA	0	15	0	30	0	61	0	80	0	100	0	-80
Current density D_I , kA/mm ²	0	1.2	0	2.5	0	5.0	0	6.5	0	8.2	0	6.5
Holding time t , min	20	180	60	180	600	160	85	120	40	60	20	120

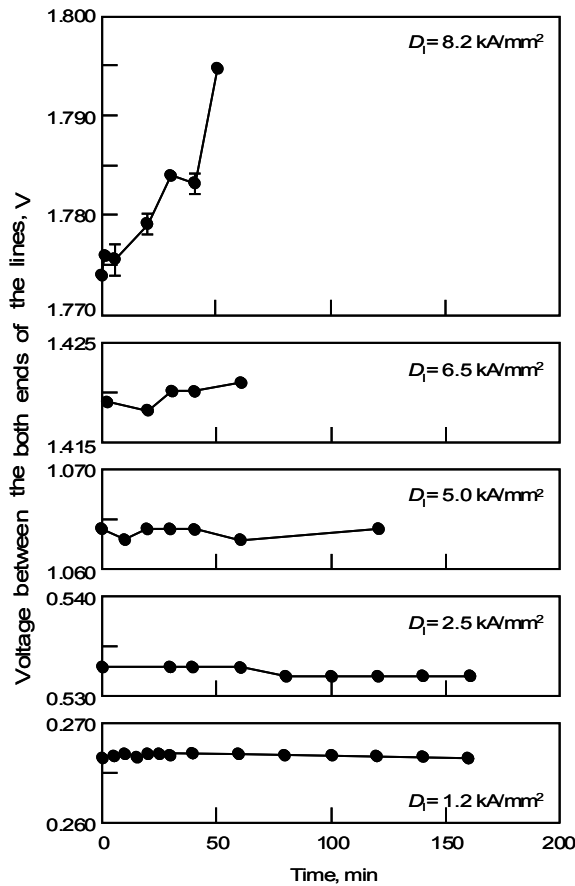


図3 各電流密度における配線抵抗の時間変化

間を必要とする。したがって、本研究では $\psi=0^\circ$ で得られる回折線のみ測定することで、配線の高さ方向のひずみを調べて、配線の応力を推定することにした。

実験結果: 供給電流と電圧値から配線抵抗を求めた。図3はそれぞれの供給電流密度 D_f における配線抵抗の時間変化を示す。低電流密度($D_f \leq 5.0$ kA/mm²)の場合、時間経過に関係なく配線抵抗は一定であったが、高電流密度($D_f \geq 6.5$ kA/mm²)の場合には、時間の経過とともに配線抵抗は増加することが分かった。特に電流密度 D_f が8.2 kA/mm²のとき、配線抵抗の増加率は著しく大きくなった。

図4は、111回折線の 2θ ピーク値の経過時間に対する変化である。全ての測定位置において、電流を供給すると 2θ ピーク値は減少し、電流の供給を停止すると 2θ ピーク値は元に戻ることが分かる。また、電流を供給し続ける間は、時間経過によらず 2θ ピーク値は一定である。電流密度が高いほど、 2θ ピーク値は大きく減少する。測定位置A点で、 2θ ピーク値の変化量が最も大きくなった。

考察: 配線に電流を流すとジュール熱が発生し、配線温度は上昇する。また、温度変化に伴って配線抵抗は変化し、その関係は次式で表される。

$$\rho(T) = \rho_0 \{1 + \alpha(T - T_0)\} \quad (1)$$

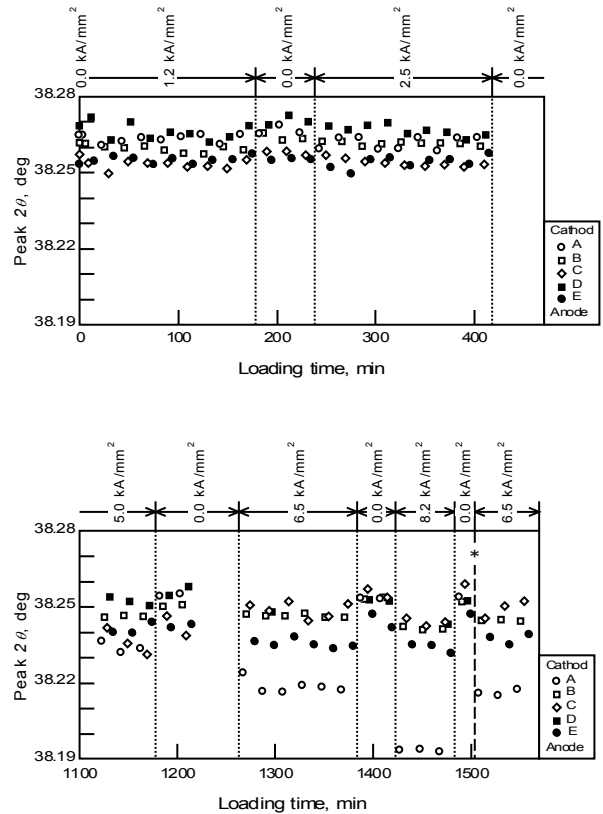


図4 111回折線の 2θ ピーク値の経過時間に対する変化

ここで、 ρ_0 は温度 T_0 での電気抵抗、 α は抵抗温度係数である。本研究で用いた配線の抵抗温度係数は別実験により約 $6.7 \times 10^{-2} / ^\circ\text{C}$ となった。(1)式を用いて抵抗の変化から配線上昇温度を計算すると、最も大きく抵抗が増加した $D_f=8.2$ kA/mm²における配線上昇温度は約 0.3°C であった。したがって、本実験では配線の温度上昇はほとんどないと言える。以上のことから、111回折線の 2θ ピーク値の変化は、エレクトロマイグレーションによって誘起された応力が原因と考えられる。

電流の供給により111回折線の 2θ ピーク値が減少したことから、エレクトロマイグレーションの前駆現象として配線中に圧縮応力が発生したと予想される。しかし、今回実験に使用した配線は実際のLSI配線と異なり、保護膜を有していない。そのため、配線場所の違いによる影響が顕著に現れなかったと考えられる。

参考文献

- 1) International Technology Roadmap for Semiconductor, International SEMATECH (1999).
- 2) H. B. Huntington and A. R. Grone, J. Phys. Chem. Solids, **20** (1961), 76.
- 3) I. A. Blech and H. Sello, Physics of Failure in Electronics Series Proceedings (USAF Rome Air Development Center Reliability, Rome, NY), **5** (1967), 496.
- 4) T. Hanabusa, Materials Science Research International, **5** (1999), 63.