

北海道大学 工学部 ○畑山 章, 義家 敏正, 浜田 弘一,
石田 巖, 岡田 亜紀良

1. はじめに

進行しつつある現象をじかに観察しながら実験を行う in situ観察は、様々な分野において多大な威力を発揮している。しかしそれを実現することは概して技術的な困難を伴うために、観察の分解能もしくは実験それ自体の精度のいずれかを犠牲にしなければならないことが多い。特に透過型電子顕微鏡（以下 TEM）では光学系を高真空に保たなければならないこともあり、高分解能な in situ観察を行おうとする時、その対象となりうる実験は格段に限定される。

しかし、作ろうとするものが微細化するに従って、SEM, TEM レベルでの微細な挙動や揺らぎが無視できなくなる。精密加工技術の進歩により、実際にそういった微細なものが加工可能になっている現在、そのような超微細な挙動を解明することと、それを解析する手段を確立することは急務であると思われる。

著者らは、特に近年微細化のめざましいLSI などに用いられるエレクトロニクス材料に見られるさまざまな挙動に興味を持ち、これらの現象について TEMにより in situ観察を行うための多機能材料試験装置を開発した。

2. 装置の設計

上に述べたようなエレクトロニクス材料に関連した現象のうち、例えば特にエレクトロマイグレーションを TEM 内で in situ 観察することを考えることとした。この現象に関連するパラメータをいろいろ変えて実験を行おうとするとき、試験装置に(1) 試料に電流を流す、(2) 加熱をする、(3) 応力を加える、という3つの機能を同時に有することが望ましい。温度や応力（またはその勾配）がエレクトロマイグレーション

に寄与することは以前から指摘されているからである。また、装置が汎用性を考慮されて設計されたならば、それらの機能を組み合わせて用いることにより、エレクトロニクス材料に限らず他の分野への応用が期待される。

3. 試作した装置

本装置では TEMの試料ホルダ部分に上記の3つの機能を持たせることにした。試作された装置の概略を図1に、試料装填部の模式図を図2に示す。試料の形状は TEMの試料に一般的な直径 $\phi 3\text{mm}$ の円板を想定している。試料を装填する部分に小さな円筒形の電気炉を取り付け、円板状の試料の左側をクランプする。試料右側は積層型圧電素子に接合された可動クランプにより支持され、この2つのクランプを通して試料は通電および加熱される。左側の可動クランプは圧電素子により駆動される。

4. エレクトロマイグレーションの in situ観察

エレクトロマイグレーションは、LSIなどの配線において、高電流密度の下で導体中の原子が一定方向に泳動する現象であり、配線パターンの断線や短絡などの原因の1つとなる。これは高密度に流れる伝導電子と導体原子の衝突により導体原子が力を受けるからであると説明されている。

この試験装置を用いて行った実験の1例として、Si単結晶上の SiO_2 膜に蒸着によりAlの細線（厚さ250nm、幅0.1mm）を形成し（図3）、これに通電した際の挙動の観察結果を図4に示す。伝導電子は写真の上から下へ流れており、エレクトロマイグレーションによりAl原子は電子の流れと同じ方向に上から下へと拡散す

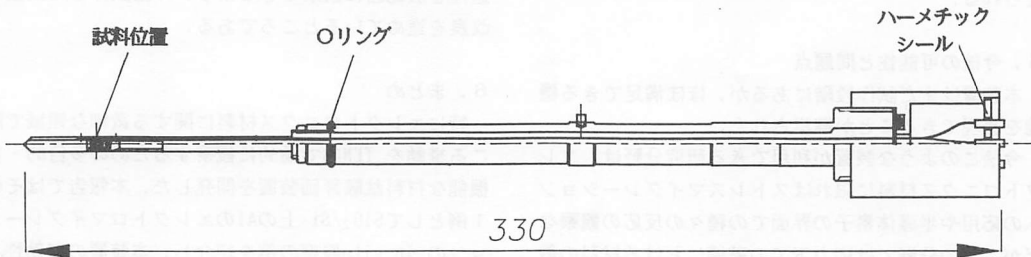


図1 試験装置の全体図

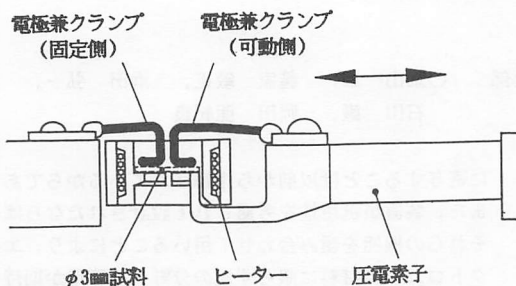


図2 試料装填部模式図

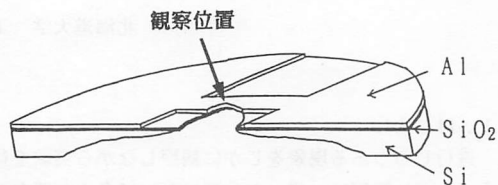


図3 試料の外形と断面

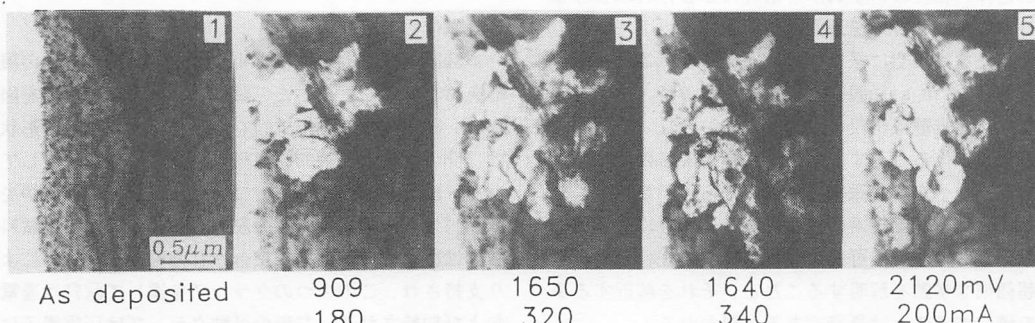


図4 SiO₂/Si上のAlのエレクトロマイグレーションによるピットの生成と成長

る。Al中に小さなピットができその後一方方向に大きく成長していく状況が観察される。この時の試料温度は200°C前後と推測される。

エレクトロマイグレーションによる故障は、流れ込む流束と流れ出る流束に過不足のある場所に生じることになる。図3のような試料では、温度と電流密度に勾配が生じ、選択的にある特定の位置にピットが形成され始める。ピットの部分には粒径の大きい結晶粒が残る傾向があるが、エレクトロマイグレーションでは粒界の原子が優先的に拡散するので、図5のように異なる粒径の結晶粒が接する境界に、伝導電子が図に示した向きに流れる場合では流入する流束が不足する。このためにピットは図4では下へと成長していくと考えられる。

5. 今後の可能性と問題点

本装置はまだ試作段階にあるが、ほぼ満足できる機能を実現できることが確認された。

今後このような装置が利用できる研究分野は、エレクトロニクス材料に限ればストレスマイグレーションへの応用や半導体素子の界面での種々の反応の観察などが、他の分野では応力下での破壊における材料の微視的な挙動や、拡散に起因する現象などが考えられる。

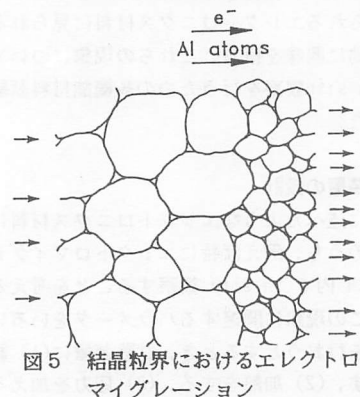


図5 結晶粒界におけるエレクトロマイグレーション

現在、さらに試料に大きな変形を与えて材料の変形過程を広範囲に観察できるよう、今回試作した装置の改良を進めているところである。

6. まとめ

特にエレクトロニクス材料に関する微細な領域で起こる挙動をTEM内で動的に観察するための多目的・多機能な材料試験評価装置を開発した。本報告ではその1例としてSiO₂/Si上のAlのエレクトロマイグレーションのin situ観察の例を紹介し、本装置の有効性を示した。