

## 405 A I 膜の熱応力の保護膜による影響

徳大工 正○英 崇夫 徳大工 正 日下一也  
徳大院 花木英司

## 1 まえがき

A I 配線の高集積化と微細化に伴って配線の断線や配線間の短絡の問題が発見されてすでに久しい。ストレスマイグレーションおよびエレクトロマイグレーションがその原因と考えられている。ヒロックやヴォイドなどの欠陥が短絡や断線の原因に直接関係していると言われている。

著者らはこれまで、これらの膜欠陥の発生機構を明らかにするため、熱酸化シリコン基板上に真空蒸着した A I 膜の残留応力を X 線的に測定してきた。まず、残留応力が焼き鈍し温度に依存して 300℃以上の焼き鈍しで残留応力緩和が起こること、また、カーボン保護膜の存在により、残留応力緩和が焼き鈍し温度の高温側にずれることを明らかにした。さらに、A I 表面の SEM 観察によるヒロックとヴォイドの発生と熱応力その場測定の結果から熱サイクル過程中の熱応力挙動についての知見を得た。

本研究では、さらに A I N の強固な保護膜による膜応力への影響を調べるため、X 線その場測定法により加熱冷却過程中の膜内の熱応力変化を測定した。

## 2 実験方法

## 2.1 A I 膜と保護膜

用意した試料は、熱酸化シリコンウェハ上に純度 99.999% の A I 膜を真空蒸着により、厚さ 1.0 μm 堆積させたもの、さらに、A I 蒸着膜上に窒化アルミニウム (A I N) あるいは窒化チタン (T i N) をスパッタリング法により堆積させたものである。

## 2.2 X 線によるその場熱応力測定

熱サイクル中のアルミニウム膜の熱応力変化を測定するために、X 線回折装置の試料台上に小型の加熱装置を取り付けた。試料の加熱冷却の熱サイクルは空気中で行った。

熱サイクルは室温からそれぞれ 473, 573, 673, 723 K の間で、室温から始まる加熱過程で 100 K おきに応力測定を行い、冷却過程で再び 100 K おきに測定を繰り返しながら室温まで戻した。

A I 蒸着膜は試料表面法線方向に {111} が優先配向しているため、 $\psi_1 = 0^\circ$  および  $\psi_2 = 70.5^\circ$  の 2 点の格子ひずみを測定することにより、次式から応力値を算定した。

$$\sigma = \frac{1}{S_{44}/2} \frac{\varepsilon(\psi_1) - \varepsilon(\psi_2)}{\sin^2 \psi_1 - \sin^2 \psi_2}$$

なお、 $S_{44}$  の値の温度依存性を勘案して、文献値を用いて温度 T の 3 次式に表し、各温度での値を用いて応力値を評価した。

$$S_{44} = (3.16 + 1.06 \times 10^{-3} T + 4.90 \times 10^{-7} T^2 + 1.18 \times 10^{-9} T^3) \times 10^{-2}$$

応力測定は Cr K  $\alpha$  特性 X 線による平行ビームで並傾法により行い、222 回折線を用いた。

## 3 実験結果

## 3.1 A I 蒸着膜の熱応力測定

図 1 は A I 蒸着膜の各温度サイクルにおける熱応力変化を示したものである。同一試料を用いて、四つの熱サイクルすなわち室温～473 K, . . . , 室温～723 K を順番に応力測定を行った。

まず、蒸着のままの状態では約 50 MPa の引張残留応力が膜内に存在しており、最初の加熱過程で膜内の応力は圧縮側に変化し、473 K までの加熱で小さい圧縮応力を保つ。冷却の過程では、直線的に引張応力が増大して、室温まで冷却した時点で残留応力は約 170 MPa になる。引き続き行った加熱サイクルでは、室温から 373 K までの間は引張応力から 30 MPa 程度のわずかな圧縮応力に変化するが、この温度を越えると膜内の応力は増加することなく、ほぼ一定値を保って最高温度に至る。冷却過程では初期に応力値は引張状態になるが、その後応力上昇率が減少し、さらに冷却が続くと再び上昇率が增大する。そして冷却過程の最後は再び上昇率の減少傾向がみられる。

## 3.2 A I N 膜で保護した場合の A I 膜の熱応力

図 2 は A I 蒸着膜の表面に保護膜としての A I N 膜をスパッタリング蒸着した場合の A I 膜内の熱応力変動を示したものである。

初期状態としては A I N 膜の蒸着により約 150 MPa の残留応力を有している。加熱の初期過程で膜内の応力は圧縮側に変動し、373 K を越えるあたりで変動率が変化したが、保護膜のない場合に比べて、その挙動は異なり、加熱の最高温度まで圧縮応力が増大し続ける。すなわち、各温度サイクルの最高温度における圧縮応力は保護膜のない場合に比べてはるかに大きくなる。冷却過程では圧縮から引張への変化が生じ、その変化率も複雑ではあるが、保護膜のない場合の特徴的な応力変化は顕著にはみられない。また、冷却終了時の残留応力も保護膜のない場合に比べて大きい引張残留応力になる。

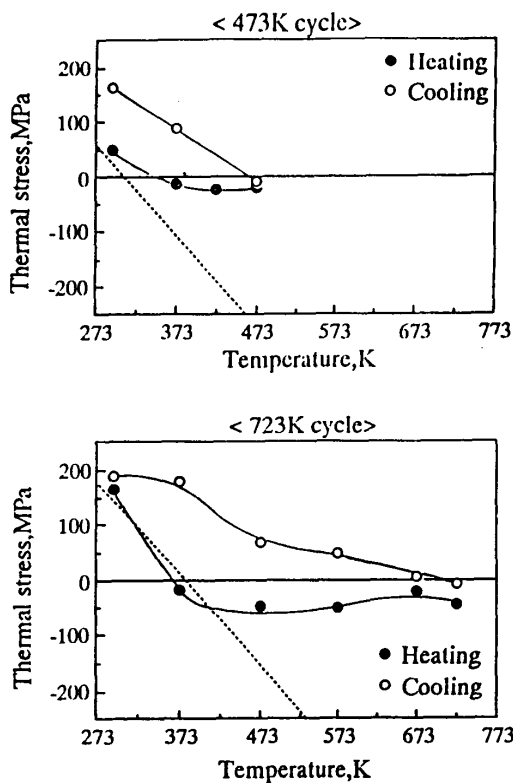


Fig. 1 Variation of thermal stress in aluminum film without passivation.

#### 4 考察

温度変化を与えた場合に膜内に発生する熱応力は、基板材料と膜の熱膨張係数の差に基づく応力が主体である。基板の厚さに対して膜厚が薄い場合、温度変化 $\Delta T$ により発生する膜内の熱応力変化 $\Delta\sigma$ は次式で表される。

$$\Delta\sigma = \frac{E_{Al}}{1-\nu_{Al}} (\alpha_{Si} - \alpha_{Al}) \Delta T$$

ここで、 $E_{Al}$ と $\nu_{Al}$ はAl膜のヤング率とポアソン比であり、 $\alpha_{Si}$ と $\alpha_{Al}$ は基板材料のSiとAlの線熱膨張係数である。

図1および2に描いた破線は、上式より計算される $\Delta\sigma/\Delta T$ のこう配であり、加熱過程の初期において、実験値はほぼこの直線に添って圧縮応力へと変化する。373Kを超えると圧縮応力の増加が減少するが、この原因としては、圧縮応力による膜の塑性変形とヒロックの発生による応力緩和が考えられている。とくに、後者はアルミニウム原子の移動を伴う現象であり、表面拡散や粒界拡散によっている。冷却過程において、保護膜の無い試料で応力上昇率の低下する範囲がある。膜内の圧縮応力が引張応力に転じた時点で膜の引張塑性変形が生じることによって応力緩和が起こると共に、再びアルミニウム原子の移動でヴォイドが発生し、その周囲の応力緩和領域がX線的な

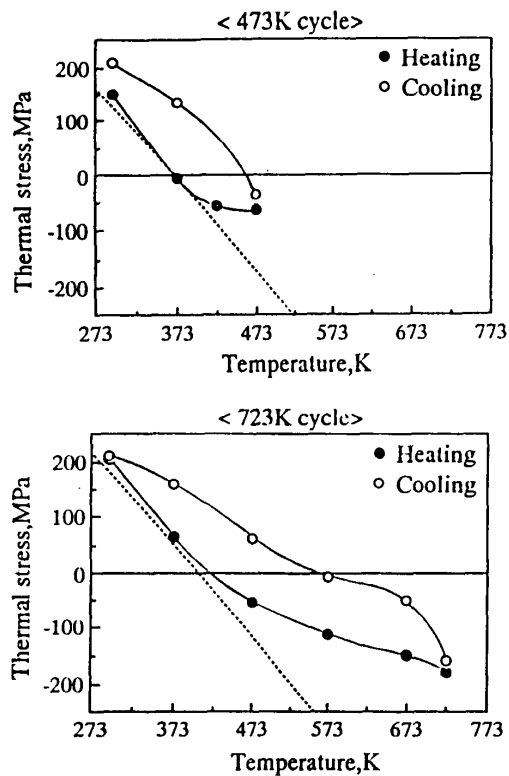


Fig. 2 Variation of thermal stress in aluminum film with AlN passivation.

応力緩和現象を引き起こす。

Al膜の表面を保護膜で被覆した場合、Al膜自身に自由表面が無くなるため塑性変形が拘束され、その結果応力緩和は小さくなる。また、前述の表面拡散も拘束されるためアルミニウム原子の拡散は著しく減少し、加熱過程でのヒロック形成そして冷却過程でのヴォイド形成が抑制される。したがって、Al膜内の熱応力挙動を考えると、保護膜のない場合に比べて、圧縮、引張応力ともに大きくなる。

#### 5 まとめ

シリコン基板上に蒸着した{111}配向アルミニウム膜の熱応力を種々の熱サイクル過程にその場測定を行い、保護膜の有無による熱応力挙動を観察した。加熱過程ではその初期に、基板と膜との熱膨張係数差で推定される応力変化に添って圧縮側に変動し、その後、膜の塑性変形やヒロックの形成により応力変化率が小さくなる。高温からの冷却過程では、膜内の応力は引張になるが、ここでも塑性変形とヴォイド形成により応力の緩和が生じる。保護膜のある場合は、これらの原因による応力緩和が抑制されるので、保護膜のない場合に比べて圧縮、引張応力ともに大きい値となった。