

ストレスマイグレーションの空孔流モデル

青柳 稔*

Modeling of vacancy flux due to stress-induced migration

Minoru AOYAGI

要 旨

半導体デバイスに使用される金属配線における信頼性の課題の一つに、ストレスマイグレーションがある。これは、半導体デバイスを高温に長期間放置するだけで、金属配線の内部にボイドや断線を生じる現象である。本研究は、この現象の温度特性に関するメカニズムを理論的に解明することを目的としている。まず、配線内部の残留熱応力を計算し、その結果を用いて配線内部の空孔濃度を求めた。次に、空孔が、配線内部に形成されたスリット状のボイドへ拡散する場合の、空孔流束の温度特性を求めた。その結果、ボイドが大きくなり配線内部の応力が緩和されると、ボイドに向かう空孔流束の最大値は低温にシフトすることが明らかになった。つまり、ボイドが小さな場合には最大空孔流束は温度が高いほど大きく、ボイドが大きくなると最大空孔流束は低温にシフトする。この理論解析結果は、実験結果と傾向的に一致する。

Abstract

The stress-induced migration phenomenon is one of the problems related to the reliability of metal interconnections on semiconductor devices. The phenomenon causes voids and fractures to occur in the interconnections when the semiconductor devices are maintained at a high temperature for long periods. The purpose of this study is to theoretically clarify the temperature characteristics of the phenomenon. First, the residual thermal stress and the vacancy concentration in the interconnection with a slitlike void were calculated. Next, the vacancy flux to the slitlike void was considered at various temperatures. The theoretical results reveal that the temperature characteristic of the vacancy flux has a peak at a certain temperature which changes due to stress relaxation. Therefore, the temperature facilitating easy void formation shifts to a lower value with void expansion.

1 研究の経緯

半導体デバイスに使用される金属配線の信頼性の課題としてストレスマイグレーションがある。これは、半導体デバイスを高温に保存するだけで、配線にボイドや断線を生じる現象である。この現象は、配線内部に熱力学的に不可避免的に発生した空孔が、配線内部に生じている応力の勾配を駆動力として、移動、集積することで発生する。ストレスマイグレーションに関する研究は、1984年にIRPS(International Reliability Physics Symposium)において始めて報告されて以降^{1,2)}、多くの研究

がなされてきたが³⁻⁷⁾、その定量的なメカニズムについては確立されていない。

本研究では、この現象の温度特性の理論解明を目的として基礎的な検討をおこなった。まず、配線内部の応力と空孔濃度を求めた。次に、応力勾配を駆動力とした空孔流束を計算し温度特性を求めた。最後に、解析結果と実験結果を比較した。

2 配線内部の応力

半導体デバイスに使用される金属配線は、図1に示すように下地と保護膜に囲まれた構造になっている。この構造において、配線には製造プロセ

*助教授 電気電子工学科

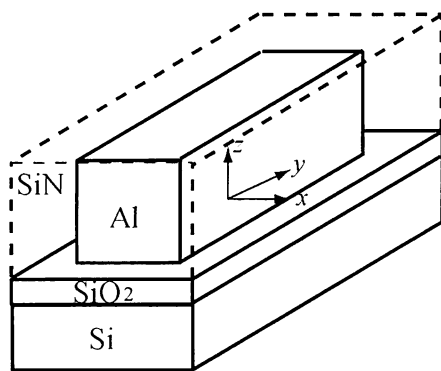


図1 配線の構造例

ス時に生じた残留熱応力が発生している。この応力は、半導体デバイスを構成する各材料間の熱膨張係数の差に起因して発生する。しかしながら、金属配線と、これら下地や保護膜の熱膨張係数は1桁以上の差があり、金属配線の熱膨張係数の方が大きい。従って、金属配線の周囲を固定境界として、残留熱応力を計算しても著しい誤差は生じないと考えられ、以降ではこの近似を用いて配線内部の応力を求めた。

配線内部の応力は一般的に次式で表される。⁸⁾

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \alpha (T-T_0) + \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y &= \alpha (T-T_0) + \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu (\sigma_z + \sigma_x)] \\ \varepsilon_z &= \alpha (T-T_0) + \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y)]\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 ε_x 、 ε_y 、 ε_z 、 σ_x 、 σ_y 、 σ_z はそれぞれ、配線内部の x 、 y 、 z 方向のひずみと応力、 α は配線材料の熱膨張係数、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 T_0 は基準温度である。

配線材料を等方等質弾性体と仮定すると、(1)式から、平面ひずみの場合における、配線内部の応力は次式のように求まる。

$$\sigma = \sigma_x = \sigma_y = \frac{\alpha E (T-T_0)}{2\nu - 1} \quad (2)$$

σ は引っ張り応力の場合に正とする。

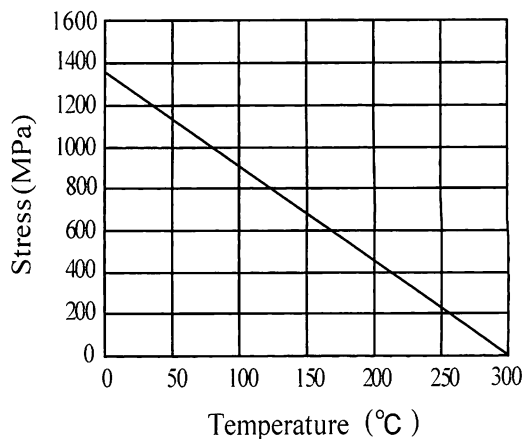


図2 残留熱応力と温度の関係

一般的な半導体デバイスに使用される金属配線を考え、配線をアルミニウムとした場合の、温度と残留熱応力の関係を図2に示す。ここで、 $\alpha = 22.5 \times 10^{-6}$ (1/k)、 $E = 69 \times 10^9$ (GPa)、 $\nu = 0.33$ とした。また、配線内部の残留熱応力は300 (°C)において零とした。

3 配線内部の空孔濃度

金属材料には、統計熱力学的に空孔が不可避免的に安定して存在する。その場合、空孔濃度 C は次式で表される。⁹⁾

$$C = \exp\left(-\frac{E_F}{kT}\right) \exp\left(\frac{S_F}{k}\right) \exp\left(-\frac{\sigma \Omega}{kT}\right) \quad (3)$$

ここで、 E_F は空孔の形成エネルギー、 S_F は空孔の形成エントロピー、 Ω は空孔の体積である。空孔濃度は、配線を構成する原子数に対する、空孔数の比で表される。

図3に温度と空孔濃度の関係を、応力をパラメータとして示す。ここで、アルミニウム配線を考慮して、 $E_F = 0.702$ (eV)、 $S_F = 1.6k$ とした。

4 ボイドと応力、空孔濃度の関係

配線内部に図4に示すような幅 L のスリット状のボイドが存在すると仮定して、配線内部の応力について考察する。この状態では、配線は初めから断線状態であるが、ボイドの大きさと応力緩和の関係を明らかにするために、この手法を導入する。

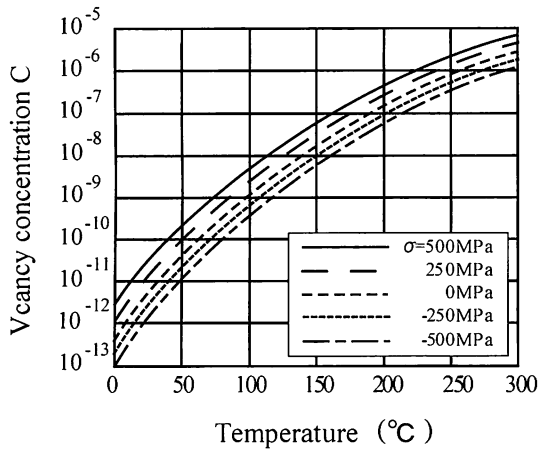


図 3. 応力と空孔濃度の関係

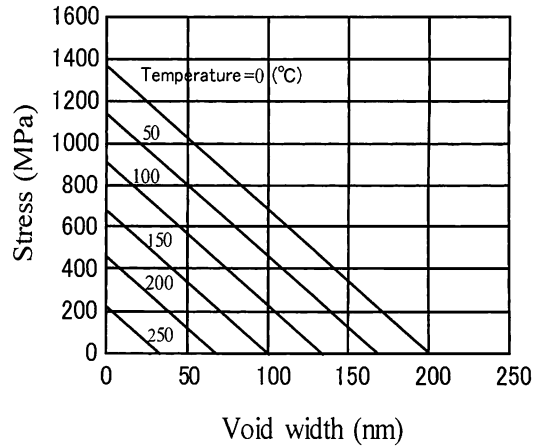


図 5. ボイド幅と応力の関係

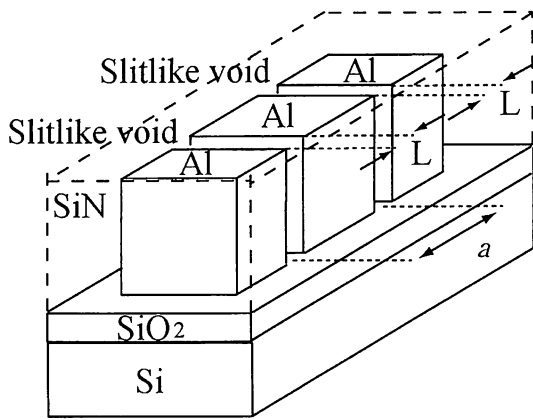


図 4. スリット状ボイド

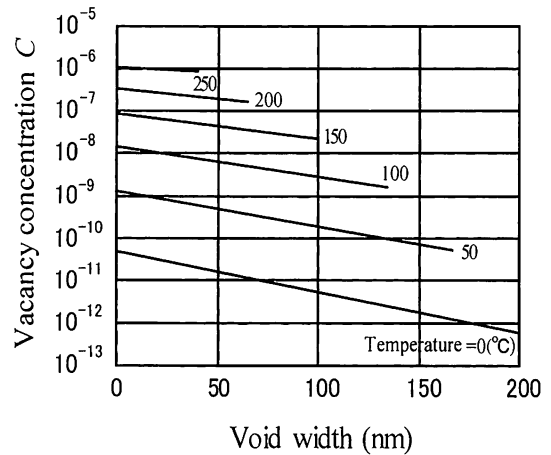


図 6. ボイド幅と空孔濃度の関係

配線内部にボイドが存在すると応力は緩和される。ボイドの幅 L と配線内部の応力の関係は次式で示される。ただし、配線内部の応力は均一であると仮定した。

$$\sigma = \frac{aET}{a(2\nu-1)(1-(1-aT)^3)} L - \frac{aET}{(2\nu-1)} \quad (4)$$

図 5 に、ボイドの幅の大きさと配線内部の応力を示す。ボイドの間隔 a は $10 (\mu\text{m})$ とした。任意の温度において、ボイド幅に上限があるのは、ボイドがそれ以上大きくなると、配線内部の応力が圧縮応力になってしまい、ストレスマイグレーションが生じないことによる。

この図 5 の応力に対応した空孔濃度を図 6 に示す。配線内部の空孔濃度は、(3)式から明らかのように温度が高いほど濃度は高い。

5 空孔流束

以上の議論を統合して配線内部の空孔流束 J について考察する。

配線内部にボイドが存在しなければ、配線内部の空孔濃度は均一であり、かつ、応力の勾配が存在しないから空孔は拡散することができない。従って、空孔流束 J は零である。

しかし、配線内部に空孔の吸収源が存在すれば、空孔は応力勾配を駆動力として、その吸収源に向かって拡散する。これはボイド表面の応力は、それ以外の部分よりも表面部分の拘束が存在しない

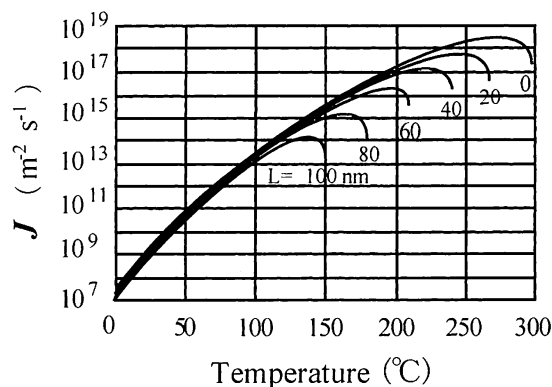


図7. ボイドへの空孔流束 J

ため応力が小さくなり、ボイド表面の空孔濃度はその他の部分に比べて低くなる事による。つまり、配線内部に存在するボイドは空孔の吸収源になる。このボイドへの空孔の拡散の結果、ボイドは拡張される。

一方、配線を構成する原子は、空孔と反対方向に拡散してゆくから、原子はボイド周辺から配線内部に向かって拡散することになる。この結果として、それまで残留熱応力により引っ張られていた原子の引っ張り力は緩和されるから、配線内部の引っ張り応力は緩和される。

以上の議論をもとに空孔流束について考える。空孔流束 J はFickの第1式より次式で示される。

$$J = - \frac{D}{kT} C_V \nabla (\sigma \Omega) \quad (5)$$

ここで、 C_V は単位体積当たりの空孔数である。 D は空孔の拡散定数であり、 $D = D_0 \exp(-E_{mv}/kT)$ で表される。

空孔の挙動をより厳密に解析するには、Fickの第2式を考える必要がある。しかしながら、ストレスマイグレーションは、断線まで数千から数万時間という非常に長い時間を要する準静的な現象であり、かつ、発生した空孔はボイドに吸収されるまでは消滅しないと仮定して、Fickの第1式より解析を進めた。

ボイド幅 L に対する空孔流束 J を計算した結果を図7に示す。計算にあたり、配線内部の応力は図5に示した値を用い、簡単化のためにボイド表面の応力は零とした。また、アルミニウム金属中の空孔の拡散を考え、 $D_0 = 0.000171 \text{ (m}^2/\text{s)}$ 、

$E_{mv} = 0.65 \text{ (eV)}$ とした。これはアルミニウム原子の自己拡散係数である。

6 考 察

図7から、ボイド幅が小さい場合には、残留熱応力を零と仮定した300 (°C) 直前に最大空孔流束が存在し、ボイド幅が大きくなり応力緩和が大きくなると、最大空孔流束は低温側にシフトすることが判る。つまり、ストレスマイグレーションにおいて、配線内部に断線には至らない小さなボイドが形成される状態では、応力緩和が小さいから、高温においてこれらは形成されやすい。一方、断線を生じるような大きなボイドが形成される時点では、配線内部の応力緩和が進行した状態であるから、それよりも低温側においてそれらは形成されやすい。

結果として、小さなボイドが配線内部に形成される時期では、保護膜が形成される温度付近でボイドの形成は頻繁におこなわれ、断線を生じるような時期では、保護膜形成温度よりも低い温度で、空孔の集積がおこなわれる。これは、各種の温度における高温放置による、断線による配線寿命の実験結果⁴⁻⁶と一致している。

7 ま と め

理論的にストレスマイグレーションの温度特性について解析した。その結果、ストレスマイグレーションにおいて、配線内部に断線には至らない小さなボイドが形成される状態では、残留熱応力の応力緩和が小さいから、高温においてこれらは形成されやすい。一方、断線を生じるような大きなボイドが形成される状態では、配線内部の応力緩和が進行した状態であるから、それよりも低温側においてそれらは形成されやすいことを示した。

参考文献

- 1) J. Klema, R. Pyle and E. Domangue, Proc. Int. Reliability Phy. Symp. 22 (IEEE, New York, 1984), p. 1.
- 2) J. Curry, G. Fitzgibbon, Y. Guan, R. Muollo, G. Nelson and A. Thomas, Proc. Int. Reliability Phy. Symp. 22 (IEEE, New York, 1984), p. 6.
- 3) K. Hinode, N. Owada, T. Nishida and K. Mukai, J. Vac. Sci. & Technol. B5, 518 (1987).
- 4) J. W. Mcpherson and C. F. Dunn, J. Vac. Sci. & Technol. B5, 1321 (1987).
- 5) A. Tezaki, T. Mineta and H. Egawa, Proc. Int. Reliability Phy. Symp. 28 (IEEE, New York, 1990), p. 221.
- 6) M. Kato, H. Niwa, H. Yagi and H. Tsuchikawa, J. Appl. Phys. 68, 334 (1990).
- 7) S. Mayumi, T. Umemoto, M. Shishino, H. Nanatsue, S. Ueda and M. Inoue, Proc. Int. Reliability Phy. Symp. 25 (IEEE, New York, 1987), p. 15.
- 8) 村上敬宜, 弾性力学 (養賢堂, 東京, 1998).
- 9) 藤田英一, 金属物理 (アグネ書房, 東京, 1996)

(平成14年11月25日受理)

