

研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19760060  
 研究課題名(和文) 原子輸送と微視組織変化を考慮した金属薄膜界面近傍における高温損傷機構の解明  
 研究課題名(英文) Damage mechanism of thin film at elevated temperature due to atomic migration and evolution of microstructure  
 研究代表者 澁谷 忠弘 (SHIBUTANI TADAHIRO)  
 横浜国立大学・大学院工学研究院・特別研究教員  
 研究者番号：10332644

## 研究成果の概要：

本研究は、組織変化を伴う原子輸送による欠陥発生・成長メカニズムを解明し高温環境下での損傷評価手法を確立することを目的としている。局所的なクリープ変形によって形成される多軸応力勾配は、欠陥を急速に成長させる。薄膜-基板界面での微視構造変化を考慮した応力解析を行い、原子輸送による欠陥発生には2種類のモードがあることを明らかにするとともに微視組織変化を考慮した破壊モデルを提案した。また、欠陥発生は結晶サイズに大きく依存することを指摘し、その妥当性をナノインデンテーション法により確認した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	0	1,100,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	2,400,000	390,000	2,790,000

研究分野：微小材料強度学

科研費の分科・細目：工学・機械材料・材料力学

キーワード：原子輸送, 金属薄膜, 高温強度, 微細組織, クリープ, 錫ウイスカ

## 1. 研究開始当初の背景

膜厚が、ミクロンオーダー以下の金属薄膜は電子デバイスに代表される微細構造物の主要な構成要素の一つである。苛酷な環境に晒される薄膜においては、従来構造物とは異なる損傷挙動を示す。電流や応力を駆動力とする原子輸送に起因した欠陥の発生・成長はその典型的な破壊機構の一つである。一方、多数の構成要素が集中する微細構造物では

界面損傷も主要なメカニズムの一つとなる。異種材料で構成される微小構造物においては、界面端部近傍での応力集中場は破壊の駆動力となりやすい。

高密度電流などに起因して高温環境に晒される金属薄膜では、界面近傍の高温損傷過程が重要となる。高温環境では、上記の原子輸送による影響は大きくなるとともに、金属薄膜の組織変化も進行するため極めて複雑

な挙動を示す。このため、金属薄膜の高温損傷課程については、体系的に検討されているとはいえない。

## 2. 研究の目的

本研究は、微細構造の変化と原子輸送を考慮した金属薄膜界面の高温損傷メカニズムを解明することを目的としている。

クリープによる応力緩和が生じやすい高温環境では、多軸応力場が形成される。そこで、多軸応力状態での原子輸送による微小欠陥発生・成長の基本メカニズムの解明を図る。原子輸送微細構造の変化を考慮したシミュレーションによってこれらの競合下での破壊機構の解明を図る。具体的には、局所成長した化合物による応力発生メカニズムの解明を行い、化合物形成が原子輸送による欠陥成長に及ぼす影響について検討する。

提案したメカニズムの検証を目的として、基板上の金属薄膜を対象とした微小圧子を用いた試験を行い、欠陥発生評価試験を実施する。以上の、一連の成果を統合することにより微視組織変化を伴う原子輸送による欠陥発生・成長メカニズムの解明を図る。

## 3. 研究の方法

本研究では、高温環境での破壊機構を対象にしているため、比較的融点の低い錫系薄膜を対象として検討した。銅基板上の錫薄膜は界面において金属間化合物を形成するため、微視構造が変化する。対象となる錫めっき表面では、化合物成長によって生じる応力を駆動力としてウイスカと呼ばれる髭状結晶の欠陥が形成されることが知られている。本研究では、高温環境下での組織変化を伴う欠陥発生・成長現象の代表例として錫ウイスカの発生メカニズムを検討した。

ウイスカ形成の基本メカニズムの解明を目的として、球圧子試験によるウイスカ発生評価を実施する。機械的に加えられた圧力と押し出し変形によって、周辺部に応力集中場が形成される。これにより、原子輸送が局所的に加速されて欠陥発生箇所を特定するとともに短時間で微小欠陥を確認することが可能となる。

マイクロ構造と界面での微視組織の変化を考慮した応力場を有限要素解析により求めることにより応力誘起の原子輸送挙動を明らかにする。また、金属間化合物の幾何学的配置が原子輸送挙動に及ぼす影響について検討する。

高温環境で生じる微小欠陥の発生を定量的に評価することを目的として、欠陥発生モデルを提案すると共に、その有

効性を検証することを目的としてナノインデンテーション試験を実施した。制御された微小荷重と薄膜表面の観察結果から得られる欠陥発生挙動を用いて有限要素解析から欠陥発生の臨界値の推定を試みた。加えて、FIBによる断面観察から化合物と欠陥発生との関係を調査した。

## 4. 研究成果

クリープを考慮した薄膜内部の多軸応力場と粒界拡散をベースとした欠陥生成モデルを提案して、欠陥の成長メカニズムについて検討した。局所的なクリープ変形によって形成される多軸応力勾配は、欠陥を急速に成長させる。膜内部の応力勾配は、膜のクリープ特性に強く依存しており、その把握が重要となる。

図1は、球圧子試験結果を示す。保持後6時間でウイスカ発生が確認されており原子輸送が圧力によって加速されていることが確認できた。また、図1には最長ウイスカが確認された72時間後の表面写真を示す。加圧部から少し離れた箇所に欠陥が発生している。これは、局所的な多軸の応力集中場が加圧部から少しはなれた部分に生じることと定性的に一致しており、提案したモデルの有効性を示唆している。

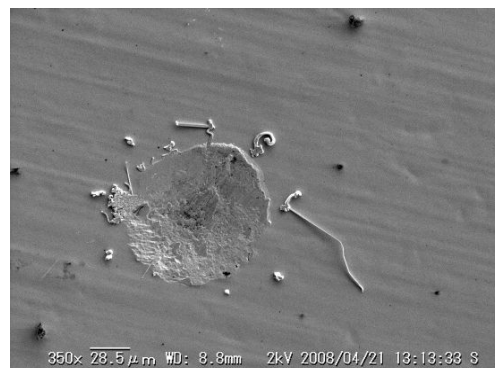
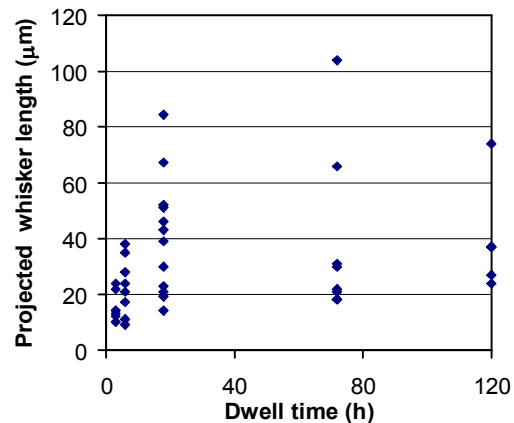


図1 球圧子試験結果

薄膜-基板界面での微視構造変化を考慮した応力解析を行い、原子輸送による欠陥成長メカニズムについて検討した。図2は、多結晶薄膜の粒界上に金属間化合物の局所成長を考慮した応力解析結果を示す。微視構造の幾何学的な配置によって、原子輸送挙動に2種類のモードがあることを明らかにするとともに微視組織変化を考慮した破壊モデルを提案した。提案したモデルは、様々な研究報告で確認されている微小欠陥の成長挙動を定性的に上手く説明している。

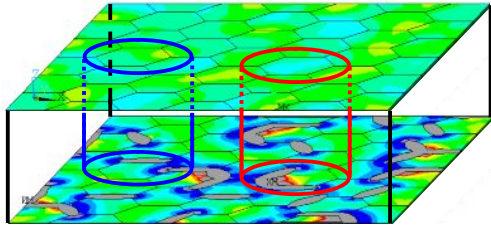


図2 化合物の局所成長を考慮した応力解析結果

2年度目は、提案した欠陥発生・成長モデルの有効性を検証することを目的として、より定量的な評価が可能である実験を行った。欠陥の発生には表面エネルギーの増大が伴うため、必要となる応力には臨界値が存在する。図3は、ウイスカ成長モデルを示す。外部仕事と表面エネルギーの釣り合いから、臨界応力は結晶サイズに大きく依存することを明らかにした(図4参照)。

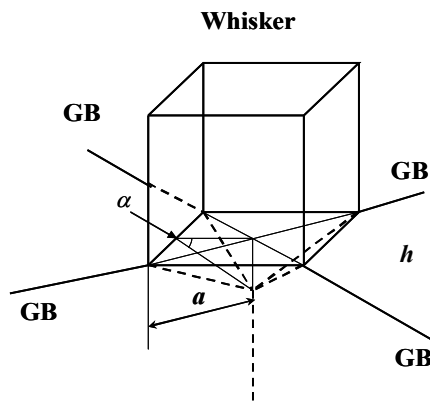


図3 微視構造を考慮したウイスカ発生モデル

提案したメカニズムの検証を目的として、ナノインデンテーション法を用いて微小欠陥発生評価を実施した。融点の低い錫めっき被膜を用いることで、室温環境でも高温破壊に相当する破壊挙動を再現できるため、引き続き錫めっき膜

を対象とした。ナノインデンターは微小荷重を制御することで欠陥発生を定量的に評価することが可能である。光沢錫めっき皮膜上を対象として試験を実施した結果、ある一定荷重を超えるとウイスカの発生を確認した。また、初年度に得た基礎データを元に必要な応力を図5に示すように有限要素解析により定量的に求めた。得られた値は、提案した理論より推定される値とよく一致しておりその有効性が確認できた。さらに、FIBによる断面観察より化合物がウイスカ形成に及ぼす影響について検討した。一連の観察および実験結果は、提案した破壊メカニズムでうまく説明することが可能であり、その有効性を検証することができた。

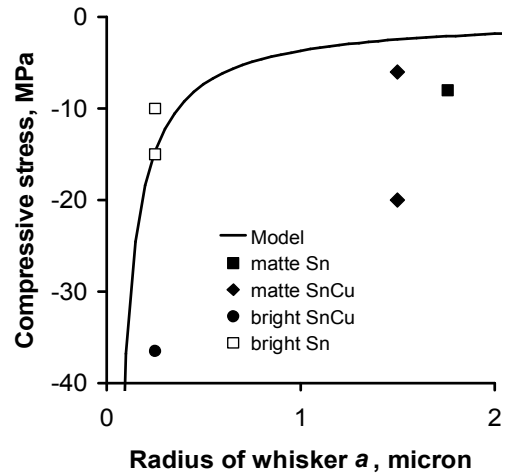


図4 ウイスカ径と臨界応力の関係

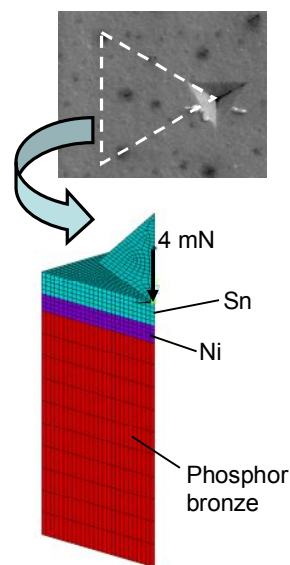


図5 有限要素解析モデル

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① 澁谷忠弘, 山下拓馬, 于強, 白鳥正樹, ”錫ウイスカ発生における局所成長した金属間化合物の影響“, エレクトロニクス実装学会誌, 12巻, 1号, 53-61ページ(2009), 査読有.
- ② Tadahiro Shibutani, Ji Wu, Qiang Yu and Michael Pect, “Key reliability concerns with lead-free connectors”, Microelectronics Reliability, Vol 48, No. 10, pp. 1613-1627 (2008), 査読有.
- ③ Tadahiro Shibutani, Qiang Yu, Masaki Shiratori and Michael Pecht, Pressure induced tin whisker formation, Microelectronics Reliability, Vol. 48, No. 6, pp. 1033-1039 (2008), 査読有.

[学会発表] (計3件)

- ① 澁谷忠弘, ”Pressure Induced Tin Whisker Formation on SnCu Finish by Nanoindentation Creep” 10th Electronics Packaging & Technology Conference, 2008.12.12, Singapore
- ② 澁谷忠弘, ”Effect of Creep Properties on Pressure Induced Tin Whisker Formation”, Second International Conference on Secure System Integration and Reliability Improvement, 2008.7.17, Yokohama.
- ③ 澁谷忠弘, ”Evaluation of pressure induced tin whisker formation”, Successful Lead-Free/RoHS Strategies Conference 2007, 2007.6.21, Boxborough, MA, USA

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

澁谷 忠弘 (SHIBUTANI TADAHIRO)

横浜国立大学・大学院工学研究院・特別研究教員

研究者番号：10332644

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者