

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03864

研究課題名（和文）微小界面構造体における潜在欠陥情報の抽出

研究課題名（英文）Detection of potential defects on small-scale interfacial structures

研究代表者

宍戸 信之（shishido, nobuyuki）

近畿大学・理工学部・講師

研究者番号：00570235

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、局所の界面強度を直接評価可能な方法論によって、微小な界面構造体におけるき裂の進展抵抗と潜在するき裂形状の双方を評価することで、微小構造体の大規模システムであるエレクトロニクスデバイスの初期破壊リスクの定量化を試みた。実際の製造プロセス同様に熱負荷を加えて破壊させた試験結果から導かれる破壊挙動とその頻度分布が、それを再現するモデルとよい一致を示した。これは本方法論を発展させることで、半導体デバイスなどの破壊リスクを定量化する設計手法を実現可能であることを示唆する結果である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現時点で配線強度の脆弱箇所にサブミクロンスケールで直接アクセスできる可能性をもった唯一の方法論を用いて、実際に材料微視構造スケールの脆弱部の定量的強度情報を、試験的ではあるが抽出することができた。本方法論を発展させることで、半導体デバイスなどの破壊リスクを定量化する設計手法に結びつけることが期待できる。また、材料科学的観点からマイクロ・ナノ構造体の変形挙動は徐々に明らかにされているが、機械工学の観点からの重要性が高い異材界面の付着強度といった、より複雑な系について理論体系を整備するための一助となることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：Copper interconnect systems of semiconductor devices has a risk of mechanical fracture along with the trend of further integration and miniaturization, because of many weak interfaces stacked to compose multilayered copper/dielectric systems. In order to estimate the fracture risk of the semiconductor products, not only the values of those adhesion strengths but also the information of the existing defect that can possibly initiate the interfacial fracture are essential. In this research, both the adhesion strength and the stochastic distribution of defect size at copper/dielectric interface that can be regarded as an equivalent crack were estimated. The crack extension behavior during the thermal load test as the same as a semiconductor process, shows good agreement with the developed model based on the fracture strength dependent on the microstructure of metal interconnect.

研究分野：破壊力学

キーワード：界面強度 エレクトロニクス 欠陥 材料組織

### 1. 研究開始当初の背景

インフラや医療分野への利用が期待される高品位のエレクトロニクス製品はその信頼性の定量化が普及の鍵となる。その反面、製品の更なる高性能化・高機能化を実現する内部構造の微細化・高密度化は、その信頼性を著しく低下させ、機械的な破壊は深刻な問題のひとつとなっている。なかでも配線金属/保護層界面の付着強度は弱いとされ、四点曲げやインデンテーションなどで定量評価が試みられるが、得られた強度情報に基づく設計であっても予期せず界面での剥離を起点とするデバイスの破壊が生じているのが現状である。

このように設計と現実とで乖離が生じる背景には、製造プロセスおよび形状に対して配線材料の物性が敏感であるために、配線の付着強度が局所的に変動している可能性があると考えられる。前述の四点曲げ法はミリメートルサイズのマクロな試験片を扱うために、空間的に均質化された強度を得るのみであり、同一界面上での局所的な強度変動の検出は不可能である。また、インデンテーション法はマイクロメートルサイズの領域で界面を剥離させるが、目的とする界面だけでなくその薄膜自身も同時に破壊するため、得られたデータから付着強度のみの情報を抽出することは困難である。以上のような既存の評価法で、デバイス内部の局所的な付着強度を定量的に評価できているとは言い難い。

そこで、研究代表者はこれまでに走査電子顕微鏡 (SEM) 内で剥離試験を行うことにより、サブミクロンスケールの局所界面強度の定量評価を可能とした。得られた試験片個々の付着強度は大きくばらつき、最弱部では平均値の半分以下という予想を超えた脆弱箇所が存在が明らかになった。これは従前のマクロスケール評価では検出困難な、局所的な強度変化の存在を定量的に示す機械工学上重要な実験事実である。また、このような局所変動の主因子のひとつとして、配線金属の結晶方位と界面強度との相関性を見出した。ただし、これらの評価で得られた強度パラメータはいずれもき裂の進展抵抗もしくはそれを規定する量に相当するものであり、破壊の起点となるき裂が構造中で如何に存在し、またその形状が如何ほどであるかを記述するものではない。このため、破壊リスクを定量化するためには前述のき裂進展抵抗のみならず、き裂形状や寸法といったき裂そのものの情報が不可欠である。

### 2. 研究の目的

本研究では、局所の界面強度を直接評価可能な方法論によって、微小な界面構造体におけるき裂の進展抵抗と潜在するき裂形状の双方を評価することで、微小構造体の大規模システムであるエレクトロニクスデバイスの初期破壊リスクの定量化を試みる。剥離試験においてき裂近傍に荷重を加えることでき裂の安定的な進展を促し、初期き裂の影響なく、き裂進展抵抗を抽出することができる。一方、界面から離れた位置で荷重を加えると、潜在き裂を起点としてき裂は不安定進展し破壊に至る。本研究では、これら力学的条件の異なる試験評価を組み合わせることで、微視的な界面構造におけるき裂進展抵抗ならびに初期き裂形状双方の強度パラメータをそれぞれ取得する。それらの統計情報によって、実際の構造体における破壊確率の定量予測が可能となる。

### 3. 研究の方法

本研究では、局所界面強度の変動について、その支配的な因子と推察される金属結晶粒構造に関して実験に基づく評価を行い、界面強度分布を規定する諸量の探索を目指す。

#### (1) 半導体配線に内在する初期き裂寸法の実験的評価

まず単結晶からなる銅と SiN 保護層からなる界面構造試験体を対象として、FIB-SEM 複合ビーム装置に小型ナノインデンタを装荷した局所評価ステーションを用いてき裂進展抵抗を評価する。次に、銅/SiN 界面を有する半導体配線構造を Fig.1 のように FIB 加工し、剥離が予想される界面から遠方に荷重を負荷することで、初期き裂の進展で不安定に破壊が進行させて、有限要素解析により既知のき裂進展抵抗から初期き裂寸法を求める。このとき、事前に電子線の透過によって界面端部における初期欠陥を直視により検出しておき、剥離試験により見積もられた結果と比較する。

#### (2) 熱ストレスによる拡大き裂の評価

研究期間中途の項目(1)の進捗結果で、半導体構造体の潜在き裂が SEM 観察による直視が不可能であったことを踏まえ、意図的にき裂の成長、進展させることを企図した。熱ストレスによるマイグレーションを誘発し、SEM で観察可能なサイズまで初期欠陥を拡大した試験体を扱うことで、剥離試験により抽出されたき裂情報と、実際のもの

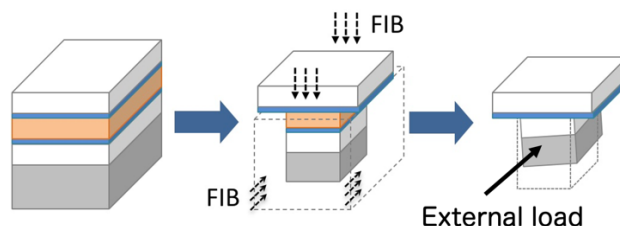


Fig.1 Fracture test for evaluating initial crack length

を比較検討する。最終的には熱ストレスによって得られた配線全域におけるマクロな強度情報と、項目(1)のミクロな試験評価に基づく予測モデルからの統計的期待値とを比較し、予測モデルの検証とする。

#### 4. 研究成果

##### (1) 半導体配線に内在する初期き裂寸法の実験的評価

まず前述の局所評価ステーションを用いた単結晶構造試験片の試験結果と、有限要素法による応力解析の結果から、き裂進展に要するエネルギーと塑性散逸エネルギーを抽出し、その差分を物理的に普遍的な界面結合のエネルギーとして扱うことで、任意の形状寸法のき裂の進展抵抗を見積もるモデルを構築した。次に半導体配線構造体から製作された試験片を対象として Fig.2 に示すような、目的の界面から十分遠方に外力を加えて界面の不安定破壊を生じさせる試験を実施し、実験により得られた破壊荷重と既知のき裂進展抵抗から初期き裂の寸法  $a_0$  を求めた。得られたき裂寸法  $a_0$  は  $28\text{nm} \pm 6\text{nm}$  であり、FIB 加工によるダメージ層厚さ程度であること、当初予期していたよりもそのばらつきが小さいこと、などから実構造での剥離発生の有無が初期欠陥の大小ではなく、銅の結晶組織に起因するき裂進展抵抗の大小が主として寄与していると考えられる。また  $a_0$  が数  $10\text{nm}$  程度であるとの見積りは実際の SEM 観察でその存在が直視できなかった事実とも整合し、これは単結晶構造の試験結果より予測される当該試験体のき裂進展抵抗値が十分な妥当性を有することを意味する。

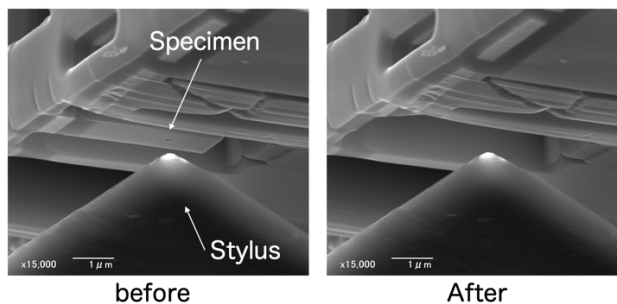


Fig.2 Resistance of poly and single crystals for different angle

##### (2) 熱ストレスによる拡大き裂の評価

加熱炉で半導体配線の一端を加工により開放させた試験片を  $400^\circ\text{C}$  まで昇温保持し、熱応力による開放端からのき裂進展を光学顕微鏡システム（松電舎製 SDS-USHK・x270~x2700）により観察した。き裂進展結果の一例を Fig.3 に示す。熱負荷後のき裂長さを整理したところ、Fig.4 のような分布となった。同一構造配線に同様の熱負荷を加えた結果としてのき裂進展量が大きくなばらつきを有するのは、その初期き裂ではなく、当該界面のき裂進展抵抗がばらついているためと考えられる。そこで Fig.5 に示すような有限要素モデルによる応力解析を実施して、き裂進展抵抗を求めたところ、 $G_c = 7.4 \pm 1.8 \text{ J/m}^2$  であった。これは同半導体配線構造体から  $5\mu\text{m}$  角の試験片を作製して機械的な剥離試験を実施した結果  $7.0 \pm 1.1 \text{ J/m}^2$  と比べてみても平均値は大きく外れておらず、熱ストレスと機械的なストレスではほぼ同様に扱えることを示唆している。一方、項目(1)による予測モデルにおいて次の仮定を用いた場合、き裂進展抵抗は  $7.0 \pm 1.6 \text{ J/m}^2$  であり、よい一致を示した。熱負荷前後で結晶組織に変化はなく、また幅  $1\mu\text{m}$  以上の配線構造では、メッキ金属に集合組織や配向を示さないため、結晶方位はランダムに分布し、その界面結合のエネルギーはすべての方位の値が等確率で統計分布するとみなした。

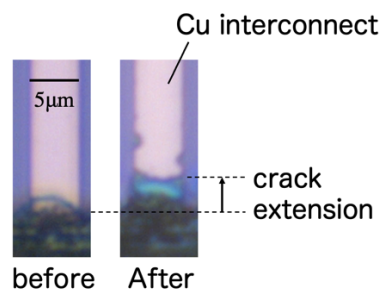


Fig.3 Crack extension by heating

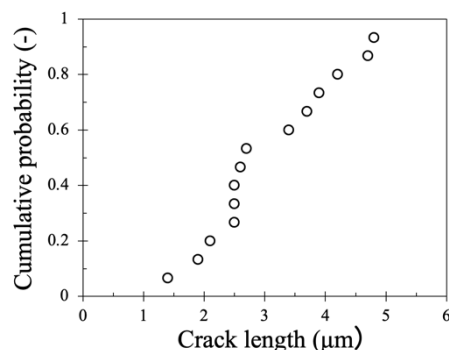


Fig.4 Distribution of crack length

また、半導体配線に高い電流密度で電流を印加し、マイグレーションにより直視可能な欠陥を意図的に生じさせる実験評価をおこなった。電流印加後に空孔のような欠陥が観察されたが、微細配線では電流印加による発熱によって、結果として熱応力が生じるため、非常に大きなき裂進展も確認された。本評価は、マイグレーションによる空孔の成長と熱応力に起因したき裂進展とが重畳した結果であるため、それぞれを分離する解析することが今後の課題となる。

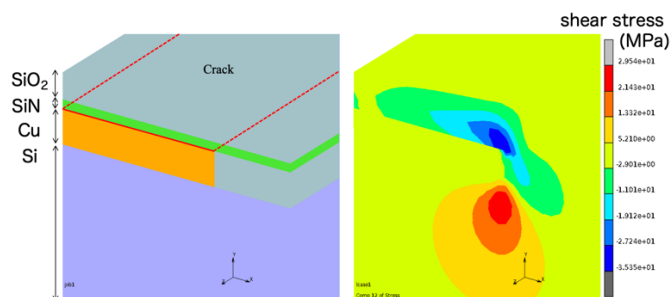


Fig.5 Finite element analysis result of thermal load

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------