

神谷庄司

名古屋工業大学大学院工学研究科・教授

高密度多層配線・三次元積層構造における局所的機械強度の計測手法の開発

§1. 研究実施の概要

本研究では、次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資するべく、三次元積層 LSI や 45nm ノード以降の多層配線にまで対応可能な全く新しい局所的機械強度の計測評価手法と、その取得データに基づく積層構造の機械的信頼性設計手法を半導体産業に提供することを目的とする。計画第2年度である平成 22 年度は、初年度より続く SEM 中での機械試験の先行例調査を踏まえて、局所機械的強度評価ステーションの仕様を策定し、初期型インデントシステムの評価ステーションへの設置・組上げを完了した。この初期型は、真空中で一貫した材料特性・機械特性評価を実現する最終目標をひとまず先送りにし、まず堅実な性能を持つ SEM-FIB 内ナノインデントを装備することにより、早期に初期分解能の評価試験を開始することに主眼を置いた構成(試料ホルダ・インデント一体型)となっている。12 月にはこれを用いてサブミクロン試料を対象とする剥離試験に必要なリファレンスデータの取得を行い、破壊力学的相似則から予測される 100nm 空間分解能を有する局所強度マッピングの実現に資する荷重計測精度を有することを確認した。

サブミクロン局所機械強度評価には、剥離試験に用いる試験片寸法の小型化だけでなく、十分に小さな先端曲率を持つ圧子の設計製作が必要となる。光学顕微鏡下の予備試験結果も踏まえ、2011 年 1 月下旬には、局所強度評価の第一ステップとなる 1 ミクロン試験片を対象としたインデント触針アダプタ製作およびダイヤモンド触針の先端形状加工が完了し、対応する試験片サイズの剥離試験にも成功した。引き続き、付着強度のマッピングに向けてデータ取得中である。一方で、初期型インデントシステムとは別に、真空中一貫試験のための次世代機の検討を進めている。

§2. 研究実施体制

(1)「名工大」グループ

①研究分担グループ長:神谷 庄司 (名古屋工業大学大学院工学研究科、教授)

②研究項目

- ・三次元デバイス構造のサブミクロン局所強度評価のための装置設計及びその組上げ
- ・サブミクロン試験片を対象とした局所機械的強度マッピング

(2)「慶応」グループ

①研究分担グループ長:大宮 正毅 (慶應義塾大学理工学部、准教授)

②研究項目

- ・界面エネルギー解析プログラムの構築と測定パラメータの感度解析
- ・界面エネルギー評価用 GUI の構築

§3. 研究実施内容

(文中の引用番号は § 4の成果発表に対応する)

3.1 研究目的 微細化に代わる半導体産業の次のパラダイムは三次元化にある。多層・積層構造では絶縁体/Si と金属との界面が立体的に構成されているが、図1に多層配線の例を示すように、微細化・複雑化により機械的な応力による界面のはく離・き裂が拡大・進展しやすい状態にあり、現実の多層配線や三次元積層 LSI のウイークポイントと開発のボトルネックになっている。そこで本研究では、走査型電子顕微鏡内での実験を行うことにより 100nm スケールの局所強度と

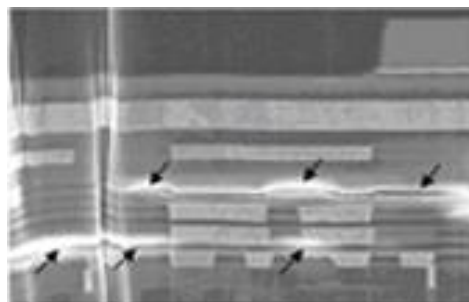


図1 多層配線構造の層間破壊の例

Charles Odegard et al. Texas Instruments Inc., 2005
Electronic Components and Technology Conference; p.1163.

内部応力の定量評価を可能とする装置と手法を開発し、世界に先駆けて多層配線の界面の機械的強度をサブミクロンスケールの分解能でマッピングして、マクロスケールの機械的強度との違いを定量化することを狙う。

研究計画第2年度である本年度は、初年度から続く予備調査の結果に基づいて上記の目的達成に必要な装置の仕様策定と設計を行い、2010 年 12 月に機械的強度評価ステーションのアセンブルを完了した。以降は動作調整および使用条件を確立し、2011 年 1 月からは構築した評価ステーションと界面じん性評価プログラムとを組み合わせることでサブミクロン局所強度マッピングに着手した。

3.2 機械強度評価ステーションの構築 H21 年度より既存の装置を用いて実施した予備実験で得られた、10 ミクロン空間分解能での銅ダマシン構造の界面強度の揺らぎと応力集中に関する知見について、本年度初頭の国際会議で 2 件の発表^(4・2)を行った。また、界面じん性値の評価に関する基本的検討についても、学術誌への論文掲載^(4・1)を行った。本年度はこれらの予備試験結果とインデンタシステムの SEM 内での使用先行例の調査結果とを踏まえ、局所機械的強度評価ステーション搭載のインデンタの仕様策定と装置のアセンブルを実施した。

SEM/FIB 中に EBSD とナノインデンタ両方を装着して連続的に使用するために、当初ナノインデンタの荷重変位変換器(トランスデューサ)部を分離して装荷する構成で評価ステーションの設計を進めた。その一方で、試料ホルダーとトランスデューサを一体化させたケースでノイズ特性が向上したとの調査結果もあったため、インデンタメーカーとの協議の結果、評価ステーションのベースである SEM/FIB への搭載時のリファレンス性能データ確保を重視し、評価ステーションのプロトタイプとしてまず図2に示す一体型インデンタを搭載した。SEM/FIB 内で実際に微小荷重押込みを行ってインデンタ性能を評価した結果、荷重計測のノイズレベルは図3に示すように数百 nN 程度であることが見出された。当初懸念されていた SEM・FIB に起因する外乱に関しては、一体型においてさほど影響がなく、破壊力学的相似則から予測される 100nm 空間分解能を有する局所強

度マッピングの実現に資する荷重計測精度が確保できていることを確認した。

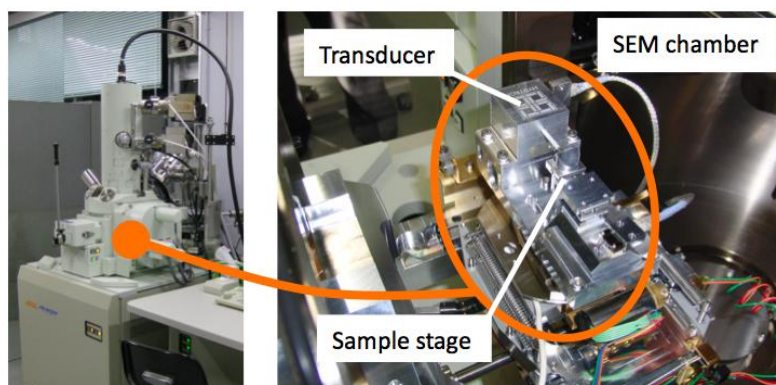


図2 評価ステーション(左:SEM-FIB、右:インデンタ)

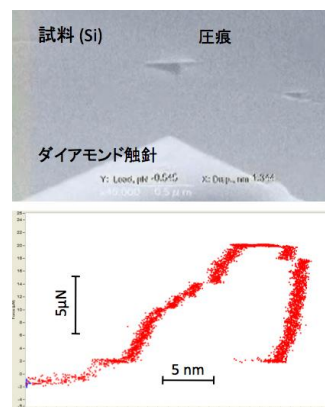


図3 インデント結果

また、研究計画の目標スケールである 100 ナノメートルサイズでの局所機械強度評価には、剥離試験に用いる試験片寸法の小型化だけでなく、インデンタ圧子の先端形状(先端角・曲率半径)もそれに対応して最適化する必要がある。本年度では、局所強度評価の第一ステップとなる 1 ミクロン試験片を対象としたインデンタ触針の先端形状加工をおこない、図4のように対応する試験片サイズの剥離試験にも成功した。以降、配線上のマッピングを目指し、剥離試験データを取得中である。

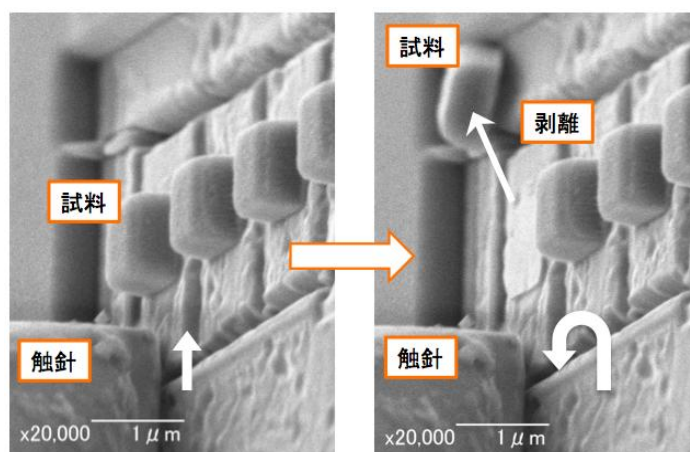


図4 SEM 内剥離試験の様子

3.3 評価ステーション中のナノインデンタ部の改良 現行機ではナノインデンタが試料ホルダーと一体であるため、真空を保持したまま SEM/FIB 中で EBSD とナノインデンタ両方を使用することはできない。大気暴露せずに結晶方位および強度・材料特性双方を解明することは重要な案件であるため、次年度の改良型製作へ向けてインデンタメーカーと再度協議を開始した。

3.4 界面じん性評価プログラムの構築と測定パラメータの感度解析 本研究では、実験で得られた破壊荷重をもとに界面き裂進展シミュレーションを行い、界面じん性値を評価する。その際、SEM 内の画像から試験片の寸法を測定して解析モデルを作成するため、その測定精度による誤差が評価結果に影響を及ぼすことが懸念される。そこで試験片の測定精度が及ぼす界面強度評価結果への影響について感度解析を行った。解析では図4の試験片を想定したモデルを作成し、荷重点高さ、膜厚、残留応力を種々変えて 3 次元き裂進展シミュレーションを行い、界面じん性値

を評価した。これより、図5に示すように残留応力の測定精度の影響が特に大きいことがわかった。また、膜厚が薄い場合はこれに加えて膜厚や荷重点高さの影響も大きくなる。以上のことから、サブミクロン試験片による局所強度マッピングを行う際には、モデルの作成精度にも十分な注意が必要となる。

3.5 界面エネルギー評価用 GUI の構築 本研究では、研究者以外にも容易に界面エネルギーを評価できるシステムを構築すべく、モデルの作成からシミュレーションの実行、さらに界面エネルギーの評価までの一連のプロセスを、自動的に行うインターフェースプログラムの構築を行っている。今年度は、Microsoft Excel の VBA を使い、Excel ワークシートに寸法、材料定数などを入力し、界面エネルギーの評価までを自動的に行うインターフェースプログラムのプロトタイプを製作した(図6)。今後、このツールの整備を行いつつ、局所強度マッピングを行っていく。

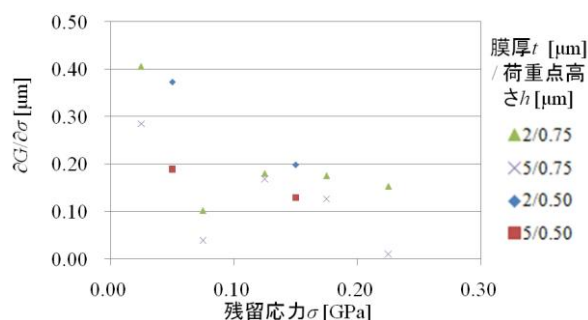


図5 残留応力の測定精度が及ぼす
じん性値への影響

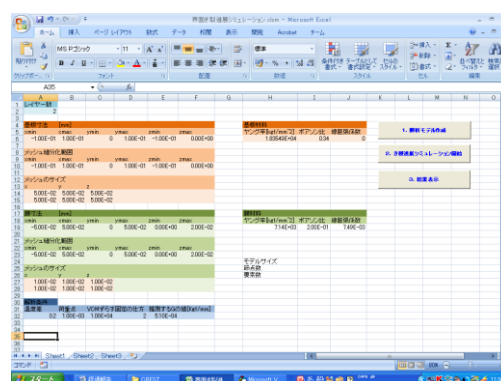


図6 Excel VBA による界面エネルギー
評価用 GUI のプロトタイプ

§4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. Shoji Kamiya, Hiroshi Shimomura, Masaki Omiya, Takashi Suzuki, “A comparative study of a new microscale technique and conventional bending techniques for evaluating the interface adhesion strength in IC metallization systems”, Journal of Materials Research, vol. 25, No. 10, pp.1917-1928, 2010 (DOI: 10.1557/JMR.2010.0258).
2. Shoji Kamiya, Hisashi Sato, Masahiro Nishida, Chuantong Chen, Nobuyuki Shishido, Masaki Omiya, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, Takeshi Nokuo, Tadahiro Nagasawa, “Micro-scale Evaluation of Interface Strength on the Patterned Structures in LSI Interconnects”, AIP conference proceedings vol. 1300, pp.33-38, 2010.