

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. 研究実施体制

### (1)「名工大」グループ

- ① 研究代表者: 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
  - ・半導体デバイス配線のサブミクロン局所機械強度評価
  - ・局所強度マッピングおよび配線結晶組織と機械特性の相関調査
  - ・劣化加速試験の計画および予備試験

### (2)「慶応」グループ

- ① 主たる共同研究者: 大宮 正毅 (慶應義塾大学理工学部、准教授)
- ② 研究項目
  - ・弾塑性き裂進展解析手法の検討
  - ・モデル試験片によるき裂進展シミュレータの検証

## § 2. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

**2.1 研究の目的と現況** 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。LSI 内部で立体的に構成されている絶縁体/Si と金属との界面は、機械的な応力によりはく離・き裂が拡大・進展しやすい状態にあり、多層配線や三次元積層 LSI のウイークポイントとなる。このような破壊を予期・回避する機械工学の方法論を実現するためには、設計時において構造各部の局所強度情報が不可欠であるが、現状では同一材料界面の巨視的強度情報が参考にされるのみである。このような機械工学上の最重要情報が欠落した設計では製品の信頼性確保が困難であり、半導体分野における新規デバイス開発の足枷となっている。そこで本研究では、走査電子顕微鏡内で機械試験を行うことにより 100nm スケールの局所強度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することで、半導体デバイスの機械設計に不可欠な局所強度情報の取得を目指す。

研究計画第3年度である平成 23 年度は、前年度に構築した局所評価ステーションと界面エネルギー評価プログラムを組み合わせることで、LSI 配線上での局所界面強度マッピングを行った。本プロジェクトの第一のマイルストーンとして設定した 100nm スケール解像度については既にその実現が確実視される実験結果を得た。一方、同じ界面でも局所的に強度が大きく変動することを見出し、その原因を把握して強度信頼性の向上に生かすべく、配線の金属微細組織の変形特性との関連との相関性評価にも着手し、成果が上がりつつある。具体的な内容については次項以下に述べるが、これらは既に国内外の招待講演等で発表されており、平成 24 年度においても既に二件の国際会議招待講演が予定されているなど、関連分野に大きなインパクトを与えつつある。

**2.2 LSI 配線上機械強度マッピング** 平成 22 年度に運用を開始した局所強度評価ステーションを用い、LSI 銅配線上にサブミクロンスケール試験片を作製し、Cu 配線/SiN 保護層界面のはく離試験を行った。図 1 は、本研究の第一のマイルストーンでもある 100nm スケールではく離試験の様子である。後述するき裂進展シミュレーションを援用することで、試験片フットプリント部の寸法を空間解像度とする局所界面強度情報が得られる。強度マップの一例として、配線幅方向の位置に対して解像度 1 $\mu$ m で評価した結果を図 2 に示す。こ

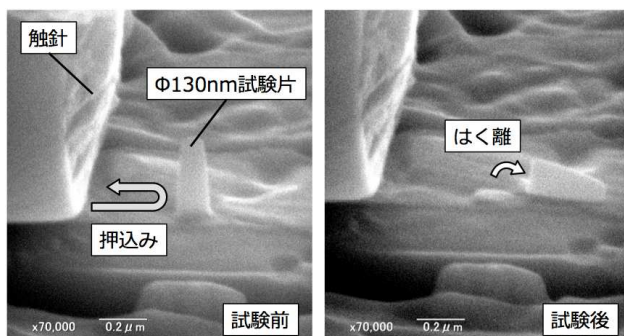


図 1 100nm スケールはく離試験の様子

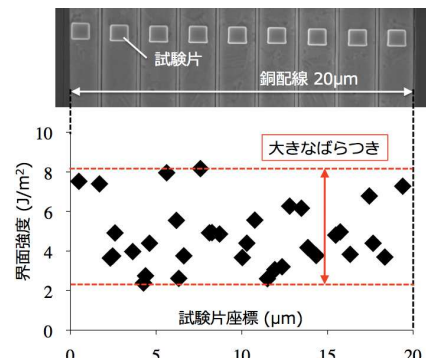


図 2 Cu/SiN 界面強度マップ

ここでは当初に予期した配線上の位置の影響は見られなかったが、試験片個々の付着強度は  $4.8 \pm 1.6 \text{ J/m}^2$  と大きくばらつき、最弱部では平均値の半分以下であった。これは従前のマクロスケール評価では検出困難な、局所的強度変化の存在を示す結果である。

**2.3 配線の微細組織と強度の相関評価** 局所強度が配線上で位置に依らず不規則に変化していたことから、不規則に分布する銅の結晶組織が強度に直接的に関与していることが推察できる。そこで配線中の結晶粒サイズに応じた試験片を作製し、結晶組織と強度との関係の調査を行った。EBSD 解析とサブミクロンスケールはく離試験を組み合わせることで、図3に示すように特定の結晶状態において強度が低下する傾向を、世界に先駆けて見出した。引続き強度と組織の相関情報を充実させ、機械的ウイークポイントの発現機構解明を目指す。

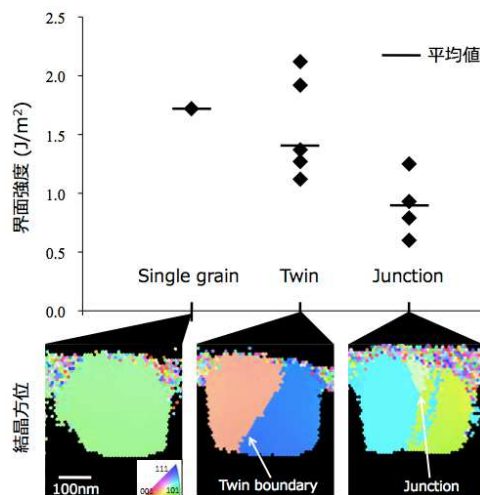


図3 界面強度と銅微細組織の相関

**2.4 加速試験による劣化挙動評価** 半導体デバイスの長期信頼性確保には強度の経時劣化挙動を把握することが重要である。平成 23 年度後半より、外部機関の環境槽を使用して温度サイクルによる劣化加速の予備試験を行った。結果は図4のように従来からマクロな構造でよく知られる劣化挙動と同様の傾向を示しており、機械工学に立脚した寿命設計予測の可能性を示唆するものであった。このような強度の経時変化と前述の微視組織によるウイークポイントの情報とを組み合わせることで、デバイスの機械不良発生の統計的な定量予測が期待できる。以上の予備試験結果を踏まえ、平成 24 年度には平成 23 年度末に導入した小型温度試験器を用いて評価を進め、配線の局所強度の劣化挙動についての知見を蓄積する。

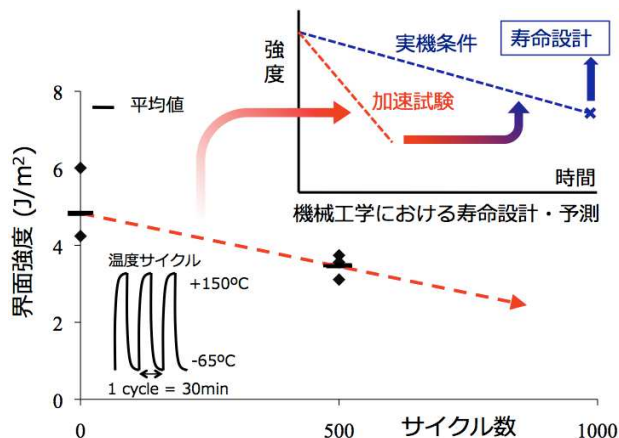


図4 劣化加速試験における局所強度変化

**2.5 SEM 中ナノインデンタ部の改良** 前述のように、配線の局所強度と金属の微細組織には強い相関が見られるため、大気暴露せずに配線の組織観察およびその強度・材料特性評価を行うことが重要な案件となる。そこで真空を保持したまま EBSD カメラとナノインデンタ両方を使用することを可能とするべく機器構成を改良した次世代機を平成 23 年度末に導入し、FIB による試料作製・インデンタによる機械試験・EBSD による組織観察の連携実行へ向けて調整中である。

## 2.6 モデル試験片によるき裂進展シミュレータの検証

本研究における強度評価のキーポイントであるき裂進展シミュレーションが、実際のき裂進展を的確に反映していることを直接的に検証するべく、アクリル樹脂を用いたモデル試験片でははく離試験と三次元弾性き裂進展シミュレーションとの比較を行った。図5に示すように、シミュレーション結果はモデル試験片によるき裂進展挙動と極めてよく一致しており、シミュレータとそれによる強度評価の妥当性が確認できた。

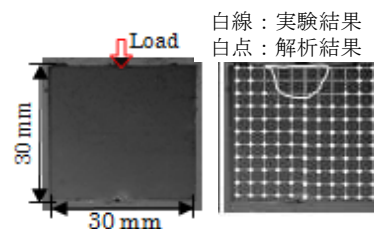


図5 き裂進展挙動の比較

## 2.7 弾塑性き裂進展解析手法の検討

本研究では、はく離試験で得られた破壊荷重を用いて界面き裂進展シミュレーションを行い、界面付着強度を評価する。これまでの三次元弾性き裂シミュレーションを用いて異なる寸法の試験片の界面付着強度を評価した結果、図6に示すように試験片寸法が小さくなるほど破壊強度が小さくなるという寸法依存性が見られた。その原因として銅の塑性変形の影響が考えられたため、弾塑性き裂進展シミュレーションによる界面強度評価の検討を行った。三次元弾塑性き裂進展シミュレーションの開発には時間を要するため、平成23年度は三次元弾性き裂進展シミュレーションの結果を二次元弾塑性き裂進展シミュレーションに反映させる手法を構築することで、界面強度に対する塑性変形の影響の基本的評価を行った。弾塑性シミュレーションにおいては、図6に示すように界面強度が試験片寸法に依らずほぼ一定の値が得られていることから、塑性変形の考慮が極めて重要であることがわかる。このことは、前述した結晶構造と強度の関連についても、変形特性の結晶方位依存性が関与している可能性が高いことを示唆している。平成24年度に向けてこの解析に資するべく、EBSDにより得られる結晶毎の方位情報を反映可能な、三次元弾塑性き裂進展シミュレーションのプログラム開発に着手している。

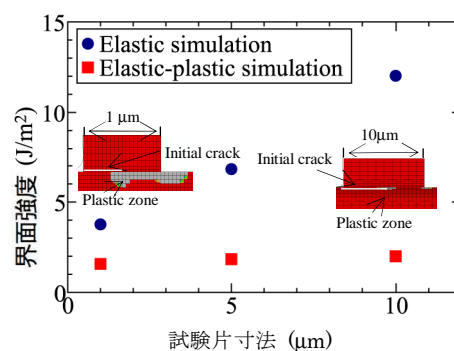


図6 試験片寸法の界面強度への影響

## §3. 成果発表等

### ●知財出願

- ① 平成23年度特許出願件数(国内 1件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 1件)