

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「次世代エレクトロニクスデバイスの創出  
に資する革新材料・プロセス研究」  
研究課題「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」

## 研究終了報告書

研究期間 平成21年10月～平成27年3月

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)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

本研究では、次世代エレクトロニクスデバイスのさらなる集積化に機械工学の観点から寄与するべく、サブミクロンスケールの三次元積層 LSI 多層配線に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。そのため名工大グループでは、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の開発を行った。これにより、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に成功した。その結果、同じ界面であっても局所的に強度が大きく変動することを新たに見出し、強度分布の定量的評価を行った。この変動の原因を解析すべく、配線の金属微細組織との相関性評価にも着手し、配線金属の結晶粒界および結晶粒方位に見かけの強度が強く依存することを明らかにした。これらの知見を統合することで、材料組織の寸法が構造の寸法に肉迫するようないわゆるナノテク構造物では、個々の構造の強度のばらつきが大きくなり、潜在的な破壊リスクが高いことを見出した。

慶應グループでは、名工大グループの試験データと連携して界面強度を抽出可能なき裂進展シミュレータを開発した。さらに、金属の塑性変形を考慮して塑性変形に費やされるエネルギーと界面剥離に要するエネルギーを分離することで、後者が試験片寸法に依存しない量となることを示した。これらの結果を総合することにより、配線金属材料の結晶組織の変形特性が局所的な低強度箇所の形成の要因であることが明らかになりつつある。また、き裂進展に必要なエネルギーと破壊応力との関連づけに不可欠な、銅配線上に存在する潜在欠陥の寸法を同定する手法を、あわせて開発した。このような潜在欠陥を考慮したき裂進展シミュレータによるき裂伝播経路解析を行った結果、銅配線角部におけるキャップ層との界面の応力集中領域に存在する欠陥が、破壊の起点となることを明らかにした。一方、配線構造全体の剛性の大半を銅とキャップ層との界面が担っており、ここにき裂が進展してひとたび完全にはく離すると、構造の剛性が局部的に失われて周囲に破壊が伝播することが見出された。すなわち、銅とキャップ層との界面強度がデバイスの機械的な大規模破壊を防ぐ鍵となることが明らかとなった。

一方、本研究で開発した機械的信頼性設計手法を半導体産業へ提供すべく、TCAD プロセスシミュレータと有限要素解析を組み合わせた破壊確率予測ツールの構築を行った。そして、製造プロセスによる熱応力や、CPI (Chip Package Interaction) による応力解析から、銅配線上に想定される欠陥に対応したエネルギー解放率の分布を算出し、そして、名工大グループの実験結果から得られた結晶粒構造に起因した銅配線上の強度分布を比較することで破壊確率を算定する手法を開発した。これにより、設計者の意図する三次元多層配線構造がどの程度安全であるかを定量的に把握することができ、設計段階での三次元多層配線構造の破壊リスク管理が可能となった。

### (2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

1. 原著論文: Shoji Kamiya, Nobuyuki Shishido, Shinsuke Watanabe, Hisashi Sato, Kozo Koiwa, Masaki Omiya, Masahiro Nishida, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, Takeshi Nokuo, Tadahiro Nagasawa, "Grain-scale adhesion strength mapping of copper wiring structures in integrated circuits", Surface and Coatings Technology, Vol.215, No.25, 280-284, 2013.

概要: SEM 中でのサブミクロンスケールのはく離試験によって、配線/保護層界面の付着強度が同一配線上であっても局所的に大きく変動することを見出した。さらにその強度変動と配線銅の微視組織との相関について調査し、結晶粒界の存在が局所強度低下の一因であることを示唆する結果を得た。

2. 原著論文:Chuantong Chen, Kozo Koiwa, Nobuyuki Shishido, Shoji Kamiya, Masaki Omiya, Hisashi Sato, Masahiro Nishida, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, Takeshi Nokuo, Tadahiro Nagasawa, “Specimen size effect on elastic-plastic strength evaluation of interface between thin films”, Engineering Fracture Mechanics, in press.

概要:サイズの異なる試験片を作製してその強度と寸法の相関性を調査した結果、我々の方法論で評価可能である界面結合エネルギー値が、試験評価寸法に依らない、構造設計に利用可能な強度パラメータであることを明らかにした。

#### < 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. 出願特許:剪断剥離試験による界面強度の評価方法(特願 2012-165496)

概要:LSI 配線の最弱部である銅/保護層界面の強度を正しく評価するための基本的技術として、実際の配線寸法に対応するサブミクロン領域での破壊試験を可能とする方法論を開発した。従来の実験室サイズの試験では大面積における見かけの平均強度しか得られなかったが、この新規技術により微細配線構造の局所強度の分布を定量化することがはじめて可能となった。この技術は後述する破壊リスクの定量化に必要不可欠なツールの一つであり、他の特許とともに LSI 配線構造設計の新たなイノベーションに貢献するものである。

2. 出願特許:単結晶の結晶塑性特性評価が可能な試験片(特願 2014-115933)

概要:LSI 配線構造における銅/保護層界面のき裂進展を評価するに当たっては、サブミクロン領域での銅の弾塑性特性を適切に把握することが必要となる。従来の評価技術では転位のバーストにより発生する不安定変形により計測が困難となっていたが、これを回避する新規試験片形状を発明したことで、破壊リスク定量化に不可欠な情報の一つとなる塑性変形初期の特性を、安定な状態で定量的に把握することを可能ならしめた。

3. 出願特許:金属配線と絶縁層との密着強度の改善する方法(特願 2014-184766)

概要:LSI 配線構造の破壊起点となる銅/保護層界面を強化して破壊リスクを本質的に低下させる新しい方法論を見出した。パッケージングされた状態のLSI多層配線に対して加熱および冷却を繰り返すことで、金属配線と絶縁層の密着強度を改善することが可能となる。本技術は、界面の強度向上がデバイス製造後の工程においても可能であることを意味し、破壊リスクの定量化とあわせて、配線構造の破壊回避に有用な技術を提案するものである。

## § 2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ①「名工大」グループ

##### 研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	神谷 庄司	名古屋工業大学	教授	H21.10～H27.3
	西田 政弘	同上	准教授	H21.10～H27.3
	佐藤 尚	同上	准教授	H21.10～H27.3
*	穴戸 信之	同上	CREST研究員	H22.4～H27.3
*	小岩 康三	同上	CREST研究員	H23.6～H26.12
	中村 友二	(株)富士通研究所 基盤研究所	特任研究員	H21.10～H27.3
	鈴木 貴志	同上	主管研究員	H21.10～H27.3
	野久尾 毅	日本電子(株)  SM 事業ユニット	ユニット長	H21.10～H27.3
	長澤 忠広	同上	チームリーダー	H22.4～H24.2
	鈴木 俊明	同上	ユニット長	H24.3～H27.3
*	杉山 裕子	テンプスタッフピープル (名古屋工業大学)	派遣職員	H22.10～H25.9
*	松田 舞	同上	派遣職員	H21.10～H24.10
*	青山 名美	名古屋工業大学	技術補佐員	H24.11～H27.3
	陳 傳形	同上	博士課程学生	H22.4～H27.3

##### 研究項目

- ・装置開発
- ・局所強度マッピング
- ・寿命予測と設計スキーム確立

#### ②「慶應」グループ

##### 研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	大宮正毅	慶應義塾大学理工学部	准教授	H21.10～H27.3

##### 研究項目

- ・き裂進展シミュレーション  
界面エネルギー解析プログラム作成  
評価用き裂進展シミュレータ開発

## § 3 研究実施内容及び成果

### 3.1 装置開発(名工大グループ)

#### (1)研究実施内容及び成果

高集積化デバイスにおける破壊リスクの定量化と低減に資する機械工学を確立するためには、なによりもまずその構造のスケールでの強度の評価が重要な要件となる。そこにはこれまでのマクロな強度評価手法では検知することのできなかつた微小領域における強度の変動が存在し、デバイスの予期せぬ破壊の原因となっている可能性が予測される。本研究項目では、この局所強度評価を実際の配線構造の寸法で実施することを可能とする、新規装置の開発を目指した。

上記の局所強度、およびその評価に影響を及ぼすと考えられる配線の結晶方位分布、さらにその変形特性と内部応力、という各項目の定量的計測を実現するため、試料作製および観察用 SEM/FIB 複合ビーム装置に弾性応力評価用電子線後方散乱回折 (EBSD) 装置と機械試験用ナノインデンタを組合せた、局所強度評価ステーションの構築を行った。SEM/FIB 中に EBSD とナノインデンタ両方を装着し、試料を大気暴露することなく真空中で順次連続的に使用することは容易ではなく、ナノインデンタの性能を考慮しつつ最適な装荷方法の設計と開発を進めた。

当初計画では多様な実験を真空中で連続して実行するための自由度を重視し、荷重変位変換器(トランスデューサ)部のみを SEM/FIB のステージと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。一方、その間に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が得られたため、インデンタメーカーとの協議の結果、計画した全ての実験を真空中で一貫連続して実施することはひとまず先送りにして、評価ステーションの重要な基本性能となるノイズレベルの低減を最重視し、平成 22 年度にまず図1に示す一体型インデンタを SEM/FIB のステージに直接搭載した第一世代の評価ステーションを組み上げた。これにより当初の分離装荷型で懸念されていた SEM/FIB 真空系の振動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も予測された 100nm 空間分解能を有する局所強度マッピングの実現に必要な荷重計測精度が実現できた。また、サブミクロンスケール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、対応する圧子の設計製作も必要となる。ステーション完成の平成 22 年度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触針の先端形状加工についても計画通り完了し、対応する試験片サイズの剥離試験に成功した。続く平成 23 年度には実験系の改良を進め、当初計画された本研究の第一のマイルストーンである 100nm スケールでの剥離試験を実現した。図 2はその試験の様子である。

当初計画になかった設計変更により装置の立ち上げに多少の遅れを出したが、結果的に実験に必要な低ノイズレベルの速やかな実現が可能となり、当初計画された高分解能試験がほぼ予定通りの期間で達成された。一方、この第一世代の評価ステーションによる実験において、次の研究項目2で詳述する配線の局所強度と金属の微細組織との間の強い相関関係が得られ、この新規知見の詳細な解析のために、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より一層重要な案件として再認識された。このため第一世代の評価ステーションの開発完了に引き続き、真空を保持したまま EBSD カメラとナノインデンタの両方を使用することを可能とする第二世代の開発に着手した。ナノインデンタの試料ホルダーに回転自由度を付与し装置構成を変更することで、低ノイズという第一世代の特質を保持したまま、図3のように試料作製/観察、機械試験、EBSD 観察による結晶方位解析がシームレスに実行可能となる。平成 22 年度末にはこの構成を特許出願し、詳細設計の後に平成 23 年度末には組上げを完了した。

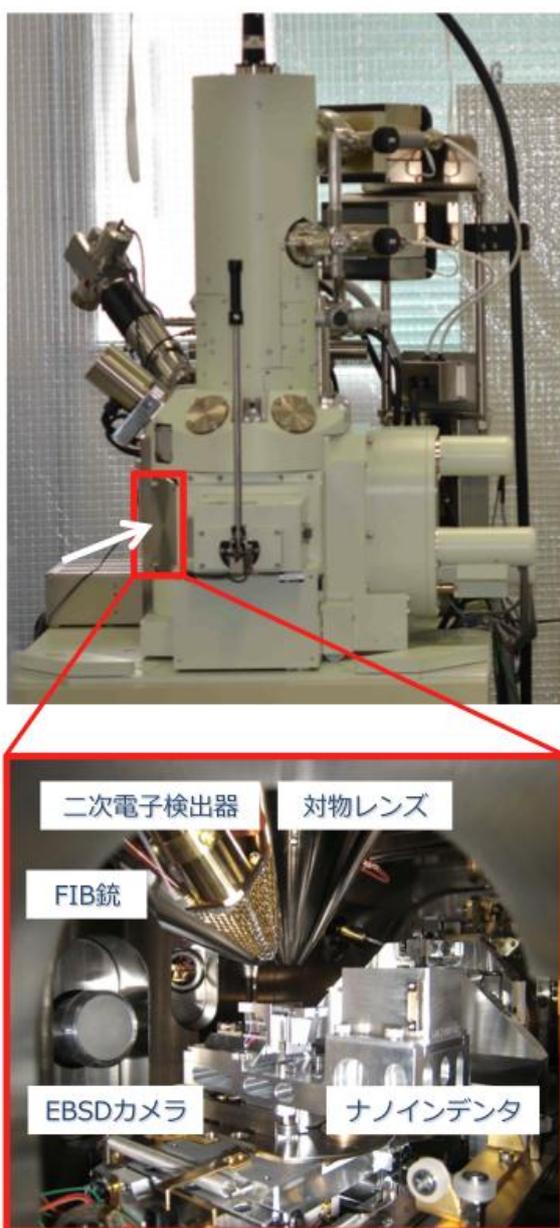


図1 局所評価ステーション(第一世代)

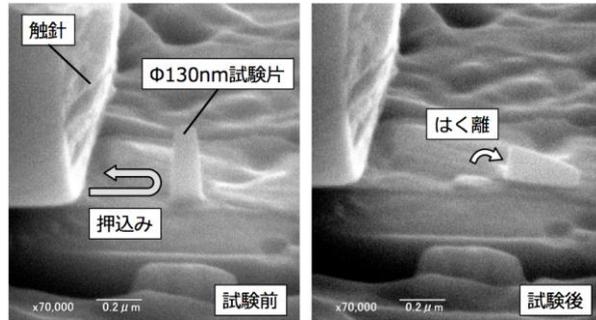


図2 100nm スケール剥離試験の様子

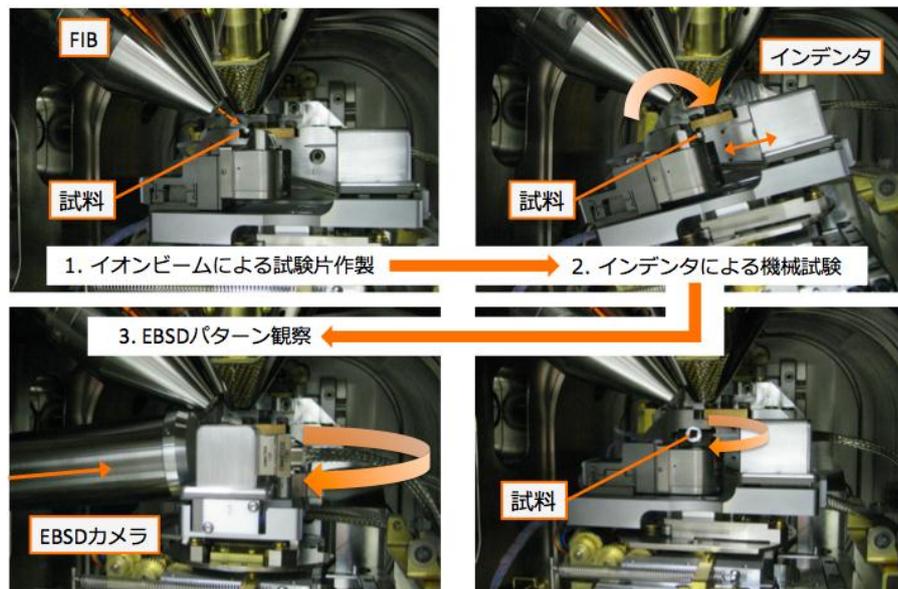


図3 局所強度評価ステーション(第二世代)

### 3.2 局所強度マッピング(名工大グループ)

#### (1)研究実施内容及び成果

複雑にパタニングされた構造を持つデバイス中の界面の強度は、同じ材料から構成される均一な膜のマクロな平均強度とは異なることが予想されるが、これを実測した例はこれまでに存在しなかった。本研究項目では実際の積層配線構造の界面に対してサブミクロンスケールの分解能を持つ局所強度の評価を実施し、デバイスの予期せぬ破壊の原因となる局所的な脆弱箇所の検出とその定量的解析を企図した。

先の研究項目1における装置開発の成果を踏まえて平成 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。後の研究項目4で詳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強度情報を界面のじん性値(結合エネルギー)として定量的に得ることができる。

得られた局所強度の分布を示すマップの一例として、配線幅方向の位置に対して解像度  $1 \mu\text{m}$  で評価した結果を図4に示す。当初は局所形状に依存したプロセスパラメタの変動等による強度変化を危惧していたが、ここでは予想に反して配線上の位置の影響は見られなかった。一方、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という予想を超えた脆弱箇所の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、局所的強度変化の存在を定量的に示す機械工学上重要な成果である。また、局所強度が配線上で位置によ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方位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、平成 24 年度より配線中の結晶粒サイズに応じた試験片を作製し、これを用いたサブミクロンスケール剥離試験と結晶方位解析とを組み合わせることで、結晶粒構造と強度との関係の調査を行った。これにより、図5に界面強度の評価結果を示すように、複雑な結晶粒構造を有する場合に強度が低下する傾向を見出した。続く平成 25 年度には、さらに試験片をより小型化して単一結晶粒上に作製することで、粒界を含まない試験片の作製および強度評価を行い、結晶粒そのものと局所強度の相関について調査した。得られた結果は図6に示す通り、局所強度が接着している銅結晶面方位にも強く依存することを示唆するものであった。さらに同一面方位での接着であっても、破壊時の変形方向が異なる場合

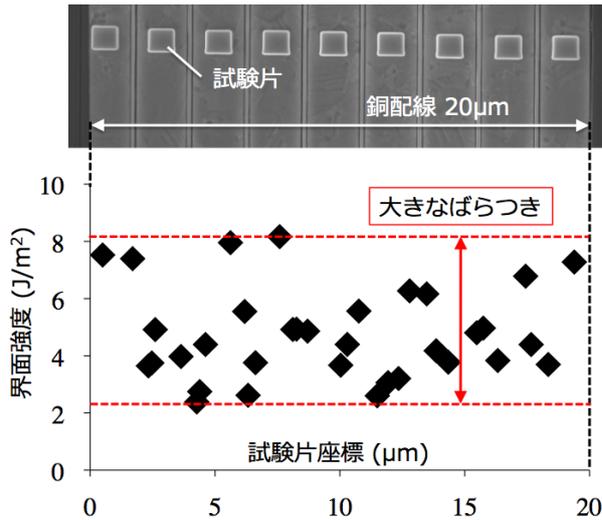


図4 Cu/SiN 界面強度マップ

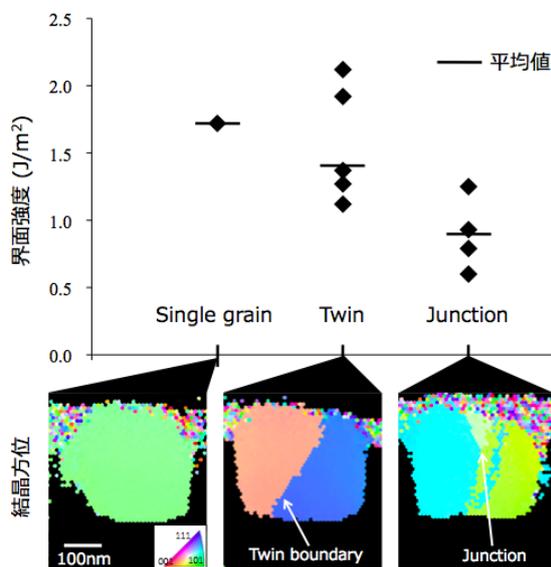


図5 界面強度と銅微細組織の相関

で見かけの強度に差があることから、接着面方位だけでなく、結晶塑性に起因した変形の異方性もまた重要であることを示唆している。さらに、EBSDによるウィルキンソン法にてLSI銅配線に存在する残留応力(内部応力)について調査した結果、銅配線の双晶粒界およびCu/絶縁層界面近傍に0.9GPa程度の高い残留応力が存在しており、材料そのものの非均質な構造が局所的破壊挙動に複雑な影響を及ぼしている可能性が見出された。

前年度に開発を完了した、第二世代インデントを装荷した評価ステーションにより、機械試験中のEBSD観察による結晶方位解析が可能となった。これを用いて、剥離試験中の局所変形評価法を構築し、結晶粒構造に対応した局所変形と強度との相関性調査を開始した。図7は評価の一例であるが、界面剥離プロセスにおける粒界近傍での局所的な大変形の存在を示唆する結果となっている。

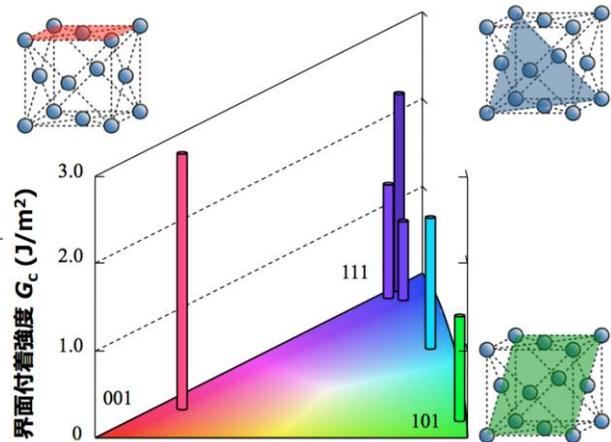


図6 局所強度と銅結晶方位の相関

後の項目で述べる結晶粒構造を反映したき裂進展シミュレーションと連携し、局所強度が低下するメカニズムを解明することで、結晶粒の組合せによって生じる脆弱部の定量的強度情報の予測が期待できる。

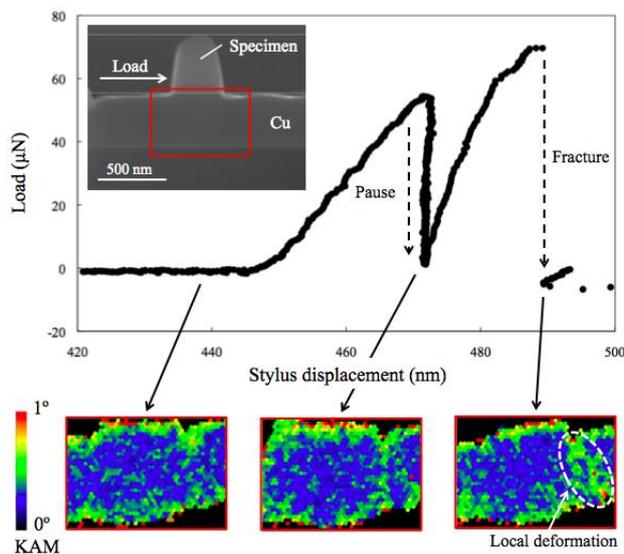


図7 剥離試験中の局所変形その場観察

これまでに我々の開発した評価手法を用いて得られた成果は、Cu/SiN系のダマシン配線構造を対象としたものであり、その局所強度のばらつきの解析を進めてきたが、これを定量的に信頼できる情報として取り扱うためには、そこに内在する評価法起因のばらつきも正しく把握する必要がある。そこで本年度は、銅バルク材にSiN保護層を積層したCu/SiN界面構造体をリファレンス試料として作製し、その強度分布を同様の手法で評価した。得られた強度のばらつきはバルク材試料において非常に小さいものであった。これは我々がこれまでに報告した局所強度変動が配線構造特有のものであることを示す確たる証左である。

また、今回得られた知見の普遍性について検討するために、Cu/SiN界面構造のみならずCu/SiC界面+lowk材からなる配線構造体の強度評価も追加で実施した。構成材料が異なる系でも、これまで同様に結晶粒構造に依存して局所強度が低下する傾向を示したため、得られた知見はそのまま適用できると判断した。

### 3.3 寿命予測と設計スキーム確立 (名工大グループ)

#### (1) 研究実施内容及び成果

機械工学の観点においては、構造物の長期信頼性確保のために強度の経時劣化挙動を把握することが重要である。経時挙動を観察する手法として、温度サイクルによる劣化加速試験が一般的に多用される。電子デバイスについても同様にJEDEC等の規格が知られているため、本研究項目では温度サイクル試験と先に述べた局所強度試験とを組み合わせることにより、局所強度の変動の定量的把握を目指した。

当初の計画では平成23年度より劣化加速試験を開始する予定で試験方法の調査を実施したが、強度評価ステーションの立ち上げが先述の設計変更により遅れたため、実際には年度後半より外部機関の環境試験装置を使用して、所定の温度サイクルの影響に関する予備試験を行った。その結果は図8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長期信頼性予測の可能性を示唆するものであった。この予備試験結果を踏まえ、平成23年度末に導入した小型温度試験機を用いて引き続き、JEDEC-JESD22-A104 (Condition C) に準拠した温度サイクル試験(-70°C~+150°C)をダマシン配線試料で行い、その後局所強度試験を行うことで、強度の経時変化挙動の調査を行った。図9(a)に示す通り、得られた局所強度は、サイクル初期に見られたような一般的な強度劣化挙動とは少し異なり、低下ののちにゆるやかに上昇している。これは当初予想とは異なる挙動であり、強度に与える別の因子の存在を示唆するものであった。そこで、配線の微視組織分析を同時に行った結果、図9(b)のように、温度サイクル試験のごく初期に再結晶が生じて、粒が微細化されると平行して、サイクル数増加とともに結晶粒の粗大化がみられた。結晶粒構造が初期に複雑化したことで強度が低下し、その後上昇したというシナリオは、我々のこれまでに得た知見と一致するものであった。寿命予測においても、その材料微視構造、特に結晶粒構造が重要な役割を持っていることを示唆する結果である。一方、半導体配線に温度処理を施し、その金属結晶粒構造を制御することで、界面処理のプロセスとは独立に、見かけの界面強度の向上が可能であることを見出した。

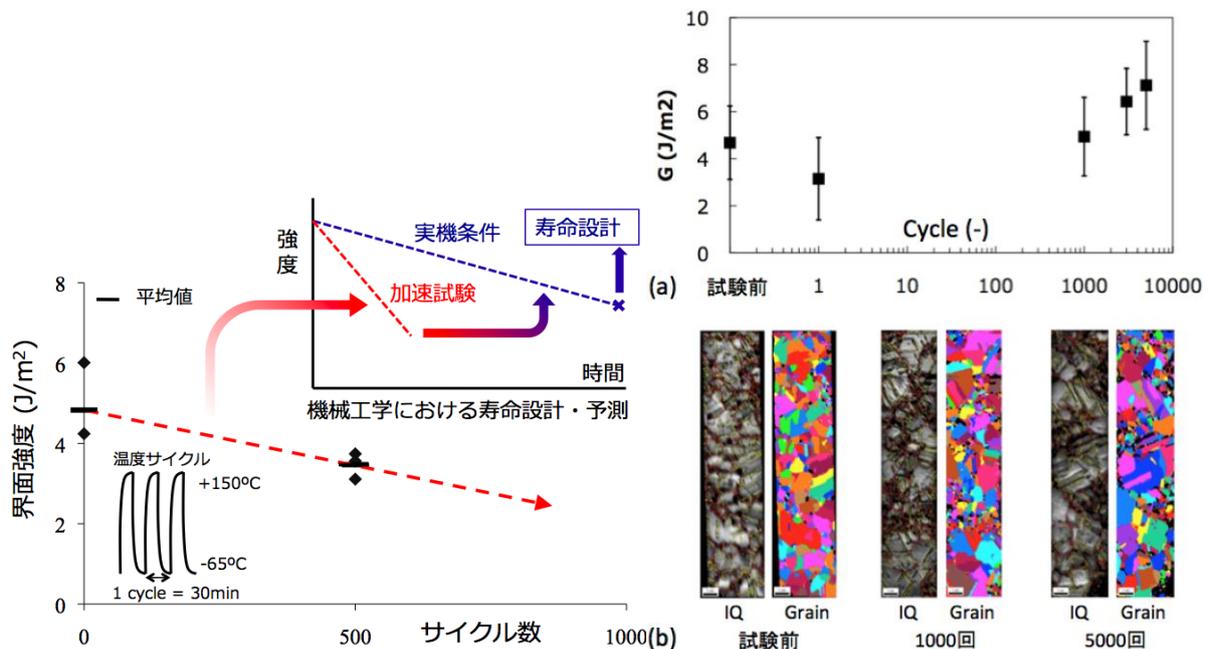


図8 劣化加速試験における局所強度変化 図9 強度と金属組織の温度サイクル経時変化

### 3.4 き裂進展シミュレーション(慶應グループ)

#### (1)研究実施内容及び成果

実験により試験片をはく離させた際に得られる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、界面付着強度を界面の結合エネルギーとして定量評価する必要がある。そのためのツールとして、界面エネルギー解析プログラムの高機能・高精度化と、GUIを用いて簡便に操作するための評価用き裂進展シミュレータの開発を目的とした。

LSI中の銅配線と絶縁層界面にき裂が進展する場合、銅配線には塑性変形が生じる。そのため、塑性散逸エネルギーを考慮した界面強度評価を行う必要があり、これを界面エネルギー解析プログラムとして構築した。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検討し、界面強度に及ぼす塑性変形の影響を評価した。また、局所強度マッピングによる実験結果から、界面上の銅結晶の方位と結晶粒界の構造が界面付着強度に強く影響することが明らかになったため、平成24年度においては、EBSDにより得られる結晶毎の方位情報を反映可能な、結晶塑性理論を導入した三次元弾塑性き裂進展シミュレーション手法を検討した。当初計画では、平成23年度で界面エネルギー解析プログラムの作成は完了予定であった。しかし、局所強度マッピングより得られた知見から、新たに結晶方位の影響を考慮した弾塑性解析を行う必要がでてきたため、結晶塑性理論を導入した界面エネルギー解析プログラムの作成を実施した。また、Excel VBAを用いたGUIで操作できるき裂進展シミュレータの開発を行い、き裂進展シミュレータの操作性を向上させた。以下、これまでに得られた成果について報告する。

1. 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の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10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。

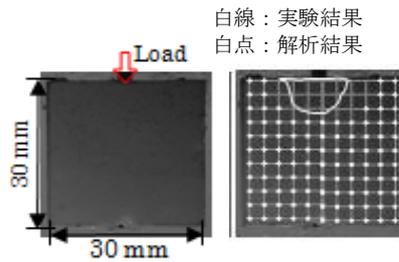


図 10 き裂進展挙動の比較

2. 弾塑性き裂進展解析手法の検討 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 11 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、平成 23 年度においては、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用いて、界面の分離に必要なエネルギーすなわち界面エネルギーと、周辺の材料の塑性変形に消費されるエネルギーを分離して評価することを試みた。その結果、図 11 に示すように界面エネルギーが試験片寸法に依らずほぼ一定の値となり、見かけの界面強度評価結果が塑性変形に強く影響されていることが明らかとなった。このことは、結晶方位により塑性変形メカニズム、すなわち転位の挙動が変わるため、前述した結晶構造と強度の関連においても、ナノスケールにおける局所強度評価では塑性変形機構を考慮した解析が必要であることを意味している。

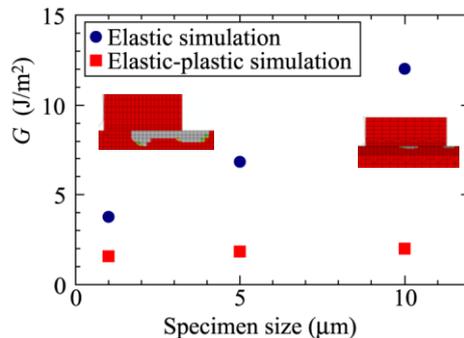


図 11 試験片寸法の界面強度への影響

3. 銅の結晶塑性特性の同定手法の開発 試験片寸法が小さくなり、結晶塑性機構を考慮した解析が必要であることがこれまでの経緯から判明しているため、EBSD により得られる結晶毎の方位情報を反映しつつ三次元弾塑性き裂進展シミュレーションを行うことのできる、新たな界面エネルギー評価プログラムの開発に着手した。作成したプログラムを実行することにより、異なる結晶方位を持つ三次元弾塑性有限要素モデルにおけるき裂進展をシミュレートでき、界面上の銅配線の結晶方位が界面強度に与える影響を定量的に評価できることを既に確認した。2 つ以上の結晶方位の異なる銅結晶を含んだモデルを作成すれば、コンビナトリアル解析により結晶粒界等の影響も抽出できる手法を確立できると考えられる。しかし、マクロサイズのバルク銅の特性をナノスケールのき裂進展シミュレーションに用いた場合、寸法効果の影響を受けて実際の銅の特性を再現できておらず、正確な界面強度を評価できないことが判明した。そのため、実際の実験状況をコンピュータ上で再現するために、銅単結晶上にナノインデンテーション試験を行い、シミュレーションと組み合わせて銅の結晶塑性パラメータのフィッティングを行うことによって銅の特性評価を試みたが、結晶のすべりが局所的かつ突発的に発生する転位バースト現象を起こし、連続的な銅の結晶塑性パラメータを同定できない結果となった。銅の特性の評価法としては、ピラーの引張・

圧縮、曲げ等があるが、それらの試験では試験片の自由表面を転位が貫通することで不安定な挙動を生じやすく、局所的なすべり変形や寸法効果の影響が大きく見える傾向にある。一方、絶縁層に拘束された空間で変形する配線の変形を評価するためには、試験片を貫通するような局所的なすべり変形が起こらない試験をする必要がある。そこで、銅単結晶からなる微小ねじり試験を考案し、シミュレーションを援用した変形特性のパラメータ取得法を考案した。図 12 にモデルの形状を示す。なお、図 13 の配線上の EBSD 画像および SEM 画像に示すように、実際の配線上の銅単結晶を用いて試験片を作製できていることがわかる。

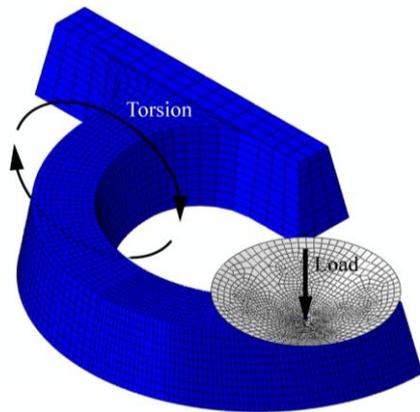


図 12 銅単結晶のねじり試験モデル

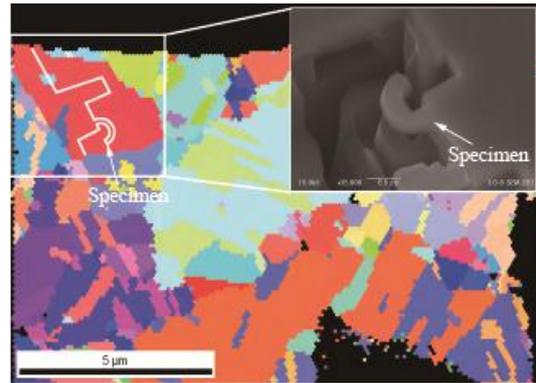


図 13 配線上銅単結晶のねじり試験片

4. TCAD プロセスシミュレータを用いた破壊確率リスク評価手法の構築 TCAD プロセスシミュレータによる製造プロセス中に生じる応力解析にもとづき、銅配線上に想定される欠陥に対応したエネルギー解放率の分布の期待値を算出し、結晶粒構造に起因した強度分布と比較することで、破壊確率を予測するモデルの構築を行った。具体的には、TCAD プロセスシミュレータ(HyENEXSS)を用いて、銅配線製造プロセスを再現し、さらに、成膜や熱処理時に銅配線に生じる応力を解析した。また、銅配線サンプルの電子顕微鏡観察から、銅配線上に存在する欠陥サイズを測定し、それを初期欠陥と仮定し、欠陥から成長するき裂のエネルギー解放率を計算する手法を構築した。そして、銅配線上の初期欠陥の位置を種々変えることで、エネルギー解放率の空間分布を求め、その出現頻度をヒストグラム化し、確率密度関数  $P_{\text{energyrelease}}$  を定義した(図 14)。一方、結晶粒構造に起因した強度分布も、EBSD の分析結果から結晶方位の出現頻度をヒストグラム化し、同様に確率密度関数  $P_{\text{fracturetoughness}}$  を定義した(図 14)。そして、この 2 つの確率密度関数の積集合 ( $P_{\text{energyrelease}} \wedge P_{\text{fracturetoughness}}$ ) から銅/絶縁膜界面における破壊確率を予測することが可能となった。

このように、TCAD プロセスシミュレータとき裂進展シミュレータ、さらに、強度評価ステーションによる測定結果と EBSD による結晶方位の分析を組み合わせることで、製造時に生じるであろう破壊確率リスクを定量的に予測するための工学モデルを構築した。

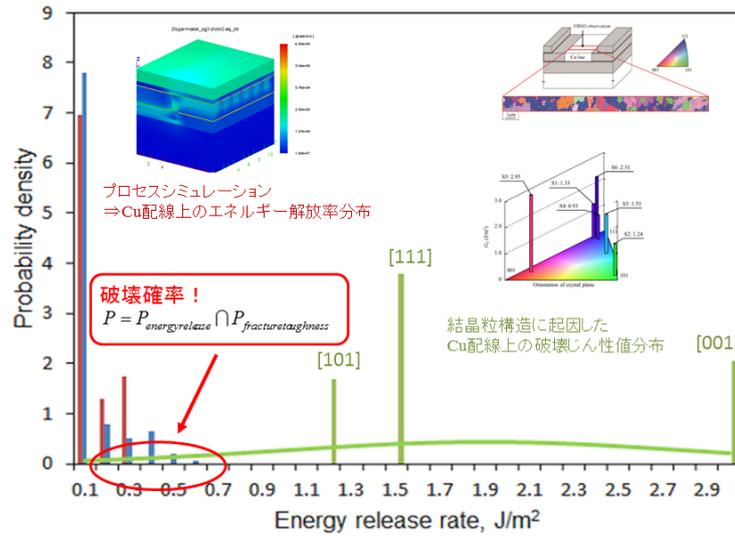


図14 破壊確率リスクを予測するための工学モデル

以上の潜在欠陥の議論を踏まえ、図 15 に示すはんだボールを押して、はんだ接合部をせん断はく離させる Ball shear テスト時のき裂伝播経路解析を行った結果、銅配線角部のキャップ層との界面の応力集中領域に存在する欠陥が破壊の起点となることを明らかにした。一方、配線構造全体の剛性の大半をき裂伝播中に銅とキャップ層との界面が担っており、ここにき裂が進展してひとたび完全にはく離すると、構造の剛性が局部的に失われて周囲に破壊が伝播することが見出された。また、ビア周辺ではビアがあることにより低層まで荷重が伝わるため、ビアで挟まれた配線の銅とキャップ層の界面から比較的低荷重で、き裂進展が起き不安定き裂進展に至るが、ビアがストッパーとなり、き裂進展を阻止するためそれ以上の進展は起きない。一方、ビアから離れた配線では、一旦、銅とキャップ層との界面をき裂が突破し不安定き裂進展に至ると、ストッパーがないため大規模な破壊へと至る可能性がある。そのため、銅とキャップ層との界面強度がデバイスの機械的な大規模破壊を防ぐ鍵であり、今後エアーギャップの採用など、銅とキャップ層の負荷が集中する場合、ますます界面強度の定量的な把握が重要となってくると考えられる。

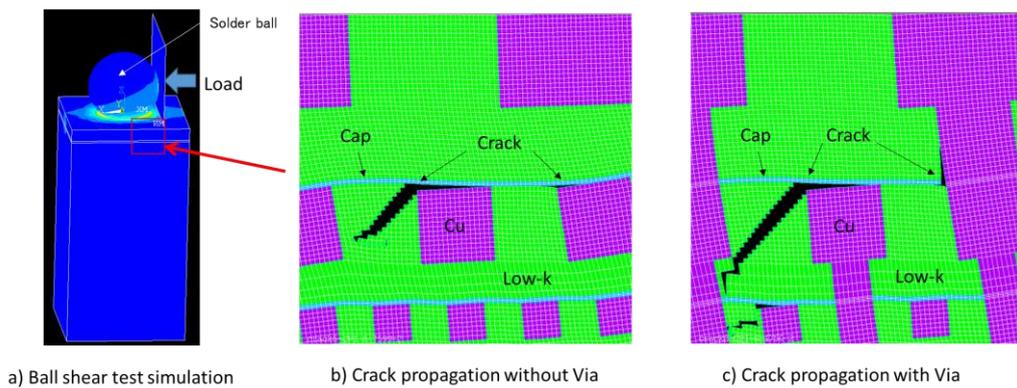


図 15 Ball shear 試験時における三次元多層配線におけるき裂発生とその進展予測

## § 4 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 1件、国際(欧文)誌 10件)

1. 著者、論文タイトル、掲載誌 巻、号、発行年

### 【国内和文誌】

陳伝形、宍戸信之、小岩康三、神谷庄司、佐藤尚、西田政弘、大宮正毅、鈴木貴志、中村友二、鈴木俊明、野久尾毅、“結晶組織に起因する銅配線の界面強度分布の試験片寸法効果”、日本機械学会論文集(A編)、79巻799号、ノートNo.2012-JAN-0731, 354-358, 2013.

### 【国際欧文誌】

1. Hisashi Sato, Nobuyuki Shishido, Shoji Kamiya, Kozo Koiwa, Masaki Omiya, Masahiro Nishida, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, Takeshi Nokuo, “Local distribution of residual stress of Cu in LSI interconnect”, Materials Letters, Vol.136 362-365, 2014.
2. Chuantong Chen, Kozo Koiwa, Nobuyuki Shishido, Shoji Kamiya, Masaki Omiya, Hisashi Sato, Masahiro Nishida, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, Takeshi Nokuo, Tadahiro Nagasawa, “Specimen size effect on elastic-plastic strength evaluation of interface between thin films”, Engineering Fracture Mechanics, in press.
3. Nobuyuki Shishido, Yuka Oura, Hisashi Sato, Shoji Kamiya, Kozo Koiwa, Masaki Omiya, Masahiro Nishida, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, Takeshi Nokuo, Toshiaki Suzuki, “Crystal orientation effect on local adhesion strength of the interface between a damascene copper line and the insulation layer”, Microelectronic Engineering, Vol.120, 71-77, 2014.
4. Chuantong Chen, Nobuyuki Shishido, Shoji Kamiya, Kozo Koiwa, Hisashi Sato, Masaki Omiya, Masahiro Nishida, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, Takeshi Nokuo, Toshiaki Suzuki, “Evaluation for interface strength fluctuations induced by inhomogeneous grain structure of Cu line in LSI interconnects”, Microelectronic Engineering, Vol.120, 52-58, 2014.
5. Masaki Omiya, Kozo Koiwa, Nobuyuki Shishido, Shoji Kamiya, Chuantong Chen, Hisashi Sato, Masahiro Nishida, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, Toshiaki Suzuki, Takeshi Nokuo, “Experimental and numerical evaluation of interface adhesion on Cu/SiN in LSI interconnect structures”, Microelectronics Reliability, Vol.53, Issue 4, 612-621, 2013.
6. Kozo Koiwa, Masaki Omiya, Nobuyuki Shishido, Shoji Kamiya, Hisashi Sato, Masahiro Nishida, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, Toshiaki Suzuki, Takeshi Nokuo, “Development of Cu/Insulation Layer Interface Crack Extension Simulation with Crystal Plasticity”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.52, 04CB05, 2013.
7. Shoji Kamiya, Nobuyuki Shishido, Shinsuke Watanabe, Hisashi Sato, Kozo Koiwa, Masaki Omiya, Masahiro Nishida, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, Takeshi Nokuo, Tadahiro Nagasawa, “Grain-scale adhesion strength mapping of copper wiring structures in integrated circuits”, Surface and Coatings Technology, Vol.215, No.25, 280-284, 2013.
8. Nobuyuki Shishido, Satoru Matsumoto, Chuantong Chen, Hisashi Sato, Masaki Omiya, Shoji Kamiya, Masahiro Nishida, Takeshi Nokuo, Tadahiro Nagasawa, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, “Interface Toughness Evaluation with Specimens Fabricated by Focused Ion Beam for Micro Scale Devices and Packages”, ASME 2011 Pacific Rim Technical Conference & Exposition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Systems, Proceedings of InterPACK 2011, Portland OR, July 6-8 (2011).
9. 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”, American Institute of Physics Conference Proceedings Vol.1300, pp.33-38, (2010).

10. 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.

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

1. 神谷庄司、密着強度の評価における表面形成と塑性変形のエネルギー -界面の分離に要するエネルギーの解析的評価の試み-、表面技術、Vol. 63, No. 12, 2012, 718-724.

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

- ① 招待講演 (国内会議 10 件、国際会議 8 件)

国内会議

1. 神谷庄司、メタル/セラミックス界面の密着強度に及ぼす構造寸法の効果 -機械工学で診る微小界面構造のナノテクシンドローム-、日本セラミックス協会第27回秋季シンポジウム、鹿児島、2014年9月.
2. 佐藤尚、EBSDを装備したナノ評価ステーションによるLSI多層配線の組織および局所界面強度解析、Cross Courtワークショップ、東京、2014年5月.
3. 神谷庄司、マイクロデバイスにおける薄膜界面の密着強度と結合エネルギーの破壊力学的評価、第9回表面技術会議、東京、2014年1月.
4. 神谷庄司、宍戸信之、小岩康三、佐藤尚、西田政弘、大宮正毅、中村友二、鈴木貴志、野久尾毅、鈴木俊明、マイクロ・ナノデバイスの構造信頼性評価に対応する新しいサブミクロンスケール機械工学への挑戦、日本実験力学会2013年度年次講演会講演論文集、由利本荘、2013年8月20-22日.
5. 神谷庄司、佐藤尚、大宮正毅、宍戸信之、小岩康三、西田政弘、中村友二、鈴木貴志、野久尾毅、鈴木俊明、“LSI配線構造中のCu/絶縁膜界面の結晶粒レベル局所強度に対応するサブミクロン機械工学への挑戦”、応用物理学会シリコンテクノロジー分科会多層配線研究会・電子情報通信学会デバイス材料研究会共催研究会、東京、2013年2月4日.
6. 神谷庄司(名工大)、宍戸信之、佐藤尚、小岩康三、大宮正毅、西田政弘、鈴木貴志、中村友二、野久尾毅、長澤忠広、“走査電子顕微鏡下機械試験により評価されたLSI配線の局所付着強度”、2012年春季第59回応用物理学関係連合講演会、東京、2012年3月
7. 神谷庄司(名工大)、SEM中ナノインデンターが拓く機械工学のためのナノラボラトリー -半導体デバイス開発のための積層配線の局所強度評価-、第12回ナノインデンテーション研究会、東京、2011年12月
8. 宍戸信之(名工大)、SEM中ナノインデンタが拓く新しいミクロの機械工学-FIB-SEM総合評価ステーションによる半導体デバイスの機械強度マッピングの試み-、日本電子SEMユーザーズミーティング、大阪、2011年7月
9. 佐藤尚(名工大)、複合ビームとEBSDの併用によるサブミクロン領域の材料組織と機械的性質の解析、日本電子SEMユーザーズミーティング、東京、2011年7月
10. 神谷庄司(名工大)、FIBによる微細加工とSEMによるその場観察を併用した新しい微小構造強度試験、日本電子SEMユーザーズミーティング、名古屋、2011年6月

国際会議

1. Shoji Kamiya, "Study of Local Interface Toughness in ULSI Interconnects Using a

- Mechanical Test in a Scanning Electron Microscope”, 13<sup>th</sup> International Workshop on Stress-induced Phenomena in Microelectronics, Austin, Texas, October 15-17, 2014.
2. Nobuyuki Shishido, “Estimate of Defect Size Initiating Interfacial Fracture in Interconnect Structures”, 13<sup>th</sup> International Workshop on Stress-induced Phenomena in Microelectronics, Austin Texas, October 15-17, 2014.
  3. Shoji Kaiya, Scale-dependent distribution of local interface adhesion strength in LSI interconnect structures –a nanotech syndrome of materials seen with the eyes of mechanical engineering –, 5th International Conference on Advanced NanoMaterials, Aveiro, Portugal, July 1-4, 2014.
  4. Shoji Kamiya, Interface adhesion energy and apparent adhesion strength between Cu and insulation layers in damascene metallization systems, Advance Metallization Conference 2013, Tokyo, Japan, Oct 8-10 (2013), Session 5-4.
  5. Shoji Kamiya, “Nano-scale mechanical engineering for the reliability of thin film structures in advanced micro electronics devices”, 2012 Annual Meeting of Taiwan Association for Coating and Thin Film Technology, Taipei, Taiwan, Nov 9-10, 2012.
  6. Shoji Kamiya, Nobuyuki Shishido, Shinsuke Watanabe, Hisashi Sato, Kozo Koiwa, Masaki Omiya, Masahiro Nishida, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, Takeshi Nokuo, Toshiaki Suzuki, “Impact of Grain Boundaries on Adhesion Strength of Cu Interconnect structure ”, 12th International Workshop on Stress-Induced Phenomena in Microelectronics, Kyoto, Japan, May 28-30, 2012.
  7. Shoji Kamiya, Nobuyuki Shishido, Hisashi Sato, Kozo Koiwa, Masaki Omiya, Chen Chuantong, Masahiro Nishida, Tomoji Nakamura, Takashi Suzuki, Takeshi Nokuo, Tadahiro Nagasawa, “In-situ SEM mechanical testing for adhesion energy mapping of multilayered Cu wiring structures in integrated circuits”, International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films, San Diego, CA, April 23-27, 2012.
  8. Shoji Kamiya (Nagoya Institute of Technology), Nobuyuki Shishido, Hisashi Sato, Masahiro Nishida, Chen Chuantong, Masaki Omiya, Tomoji Nakamura, Takashi Suzuki, Takeshi Nokuo, Tadahiro Nagasawa, “Sub-micron Scale Local Strength Evaluation for LSI Interconnect Structures”, MRS 2011 Spring, San Francisco, April 2011.

② 口頭発表 (国内会議 27 件、国際会議 19 件)

1. 発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日

国内会議

1. 越智亮太、宍戸信之、佐藤尚、小岩康三、神谷庄司、西田政弘、大宮正毅、鈴木貴志、中村友二、野久尾毅、鈴木俊明、結晶粒界がもたらす銅/保護層界面の局所強度変動、日本機械学会東海支部第 64 期総会、愛知、2015 年 3 月。
2. 宍戸信之、佐藤尚、西田政弘、神谷庄司、小岩康三、大宮正毅、鈴木貴志、中村友二、野久尾毅、鈴木俊明、銅配線構造の局所強度分布に対する結晶粒寸法の効果、日本機械学会 2014 年度年次大会、東京 北千住、2014 年 9 月。
3. 陳傳形、宍戸信之、小岩康三、神谷庄司、大宮正毅、佐藤尚、西田政弘、鈴木貴志、中村友二、鈴木俊明、野久尾毅、異なる結晶方位における Cu/SiN 界面の分離に要するエネルギーの力学的評価、日本機械学会 2014 年度年次大会、東京 北千住、2014 年 9 月。
4. 小岩康三、大宮正毅、陳傳形、宍戸信之、神谷庄司、佐藤尚、西田政弘、鈴木貴志、中村友二、鈴木俊明、野久尾毅、微小試験片を用いた銅単結晶の結晶塑性特

性評価手法の開発、日本機械学会 M&M2014 材料力学カンファレンス、福島大学、2014年7月20日

5. 花井誠、宍戸信之、神谷庄司、佐藤尚、小岩康三、西田政弘、大宮正毅、鈴木貴志、中村友二、野久尾毅、鈴木俊明、LSI 配線中の Cu/SiN 界面付着強度に対する銅粒界局所変形の影響、日本機械学会東海支部第 63 期総会、名古屋、2014年3月.
6. 神谷庄司、マイクロデバイスにおける薄膜界面の密着強度と結合エネルギーの破壊力学的評価、第 9 回表面技術会議、東京、2014年1月(招待講演).
7. 桑林敦、大宮正毅、小岩康三、宍戸信之、神谷庄司、佐藤尚、西田政弘、鈴木貴志、中村友二、鈴木俊明、野久尾毅、TCAD プロセスシミュレータを用いた LSI 銅配線/絶縁膜界面におけるエネルギー解放率分布予測、日本機械学会第 26 回計算力学講演会、佐賀大学、2013年11月3日
8. 安藤嘉信、小岩康三、大宮正毅、宍戸信之、神谷庄司、佐藤尚、西田政弘、鈴木貴志、中村友二、鈴木俊明、野久尾毅、銅の結晶塑性を考慮したき裂進展シミュレーションによる LSI 中の銅/絶縁層界面付着強度の評価、OS1218、日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス、岐阜、2013年10月.
9. 陳傳形、宍戸信之、小岩康三、神谷庄司、大宮正毅、佐藤尚、西田政弘、鈴木貴志、中村友二、鈴木俊明、野久尾毅、銅結晶塑性に起因する Cu/SiN 界面じん性値の異方性、J211022、日本機械学会 2013 年度年次大会、岡山、2013年9月.
10. 向山諒太、泉隼人、宍戸信之、神谷庄司、“単結晶シリコンの塑性特性における吸蔵水素の影響”、日本機械学会東海支部第 62 期総会、No. 526、三重、2013年3月.
11. 松瀬優也、宍戸信之、神谷庄司、佐藤尚、杉山裕子、小岩康三、西田政弘、大宮正毅、鈴木貴志、中村友二、鈴木俊明、野久尾毅、“配線銅/保護層界面剥離試験中の銅結晶粒構造その場観察による界面付着強度と局所変形との相関評価”、日本機械学会東海支部第 62 期総会、No. 533、三重、2013年3月.
12. 大浦由香、杉山裕子、宍戸信之、神谷庄司、佐藤尚、小岩康三、西田政弘、大宮正毅、鈴木貴志、中村友二、鈴木俊明、野久尾毅、“半導体デバイス配線中の Cu/SiN 界面局所付着強度に及ぼす銅の結晶方位の影響”、日本機械学会東海支部第 62 期総会、No. 534、三重、2013年3月.
13. ナムスライマングラフ、小岩康三、大宮正毅、宍戸信之、神谷庄司、佐藤尚、西田政弘、鈴木貴志、中村友二、鈴木俊明、野久尾毅、“き裂進展シミュレーションによる LSI の Cu/SiN 界面付着強度に対する銅の結晶粒構造の影響の評価”、日本機械学会東海支部第 62 期総会、No. 535、三重、2013年3月.
14. 大浦由香、宍戸信之、神谷庄司、佐藤尚、小岩康三、西田政弘、杉山裕子、大宮正毅、鈴木貴志、中村友二、鈴木俊明、野久尾毅、“LSI 多層配線システム中の銅/絶縁層界面におけるサブグレインスケール付着強度の結晶方位依存性”、日本機械学会 M&M2012 材料力学カンファレンス、松山、2012年9月
15. 渡邊慎介、宍戸信之、神谷庄司、佐藤尚、小岩康三、杉山裕子、西田政弘、大宮正毅、鈴木貴志、中村友二、鈴木俊明、野久尾毅、“サブミクロン銅ダマシ配線のマルチグレイン構造と絶縁層界面局所強度”、日本機械学会 M&M2012 材料力学カンファレンス、松山、2012年9月
16. 高園敬太、宍戸信之、神谷庄司、佐藤尚、小岩康三、杉山裕子、西田政弘、大宮正毅、鈴木貴志、中村友二、鈴木俊明、野久尾毅、“半導体デバイスの信頼性設計に向けた銅配線の局所機械特性マッピング”、日本機械学会 M&M2012 材料力学カンファレンス、松山、2012年9月

17. ナムスライマンダフゾル、小岩康三、大宮正毅、宍戸信之、神谷庄司、佐藤尚、西田政弘、鈴木貴志、中村友二、鈴木俊明、野久尾毅、“結晶の異方性を考慮したき裂進展シミュレーションによる銅配線／絶縁層界面の強度評価”、日本機械学会 M&M2012 材料力学カンファレンス、松山、2012 年 9 月
18. 小岩康三、大宮正毅、宍戸信之、神谷庄司、佐藤尚、西田政弘、鈴木貴志、中村友二、鈴木俊明、野久尾毅、“銅配線の弾塑性特性を導入した局所界面付着強度評価手法の開発”、日本機械学会 M&M2012 材料力学カンファレンス、松山、2012 年 9 月
19. 陳傳形、宍戸信之、小岩康三、神谷庄司、佐藤尚、西田政弘、大宮正毅、鈴木貴志、中村友二、鈴木俊明、野久尾毅、“結晶組織に起因する銅配線の界面強度分布の試験片寸法効果”、日本機械学会 2012 年度年次大会、金沢、2012 年 9 月 9 日～12 日
20. 渡邊慎介、宍戸信之、神谷庄司、佐藤尚、小岩康三、杉山裕子、陳傳形、西田政弘、大宮正毅、鈴木貴志、中村友二、長澤忠広、野久尾毅、“ダマシン銅配線の局所界面強度と結晶粒分布との相関評価の試み”、日本機械学会東海支部第 61 期総会、名古屋、2012 年 3 月
21. 高園敬太、宍戸信之、神谷庄司、佐藤尚、小岩康三、杉山裕子、陳傳形、西田政弘、大宮正毅、鈴木貴志、中村友二、野久尾毅、長澤忠広、“SEM 中ナノインデンテーションと EBSD による結晶方位マッピングを連携させた LSI 銅配線の局所機械特性評価”、日本機械学会東海支部第 61 期総会、名古屋、2012 年 3 月
22. 住田純也、大宮正毅、小岩康三、陳傳形、宍戸信之、神谷庄司、佐藤尚、西田政弘、野久尾毅、長澤忠広、鈴木貴志、中村友二、“LSI 配線界面局所強度評価のための弾塑性き裂進展シミュレーションの開発”、日本機械学会東海支部第 61 期総会、名古屋、2012 年 3 月
23. 宍戸信之、陳傳形、神谷庄司、大宮正毅、佐藤尚、西田政弘、鈴木貴志、中村友二、野久尾毅、長澤忠広、“集積回路配線用銅薄膜の付着強度評価における試験片寸法の効果”、日本機械学会 2011 年度計算力学講演会、岡山、2011 年 10 月
24. 大宮正毅、原田壮章、北山祐希、神谷庄司、宍戸信之、“せん断荷重下における接着界面のき裂進展解析”、日本機械学会 2011 年度計算力学講演会、岡山、2011 年 10 月
25. 宍戸信之、陳傳形、神谷庄司、大宮正毅、佐藤尚、西田政弘、野久尾毅、長澤忠広、鈴木貴志、中村友二、“SEM 中インデンタによるサブミクロンスケール付着強度評価”、日本実験力学会 2011 年度年次講演会、奈良、2011 年 8 月
26. 陳傳形、宍戸信之、松本悟、神谷庄司、佐藤尚、西田政弘、大宮正毅、鈴木貴志、中村友二、長澤忠広、野久尾毅、“半導体デバイス配線構造における局所付着強度分布の統計的評価の試み”、日本機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス、北九州、2011 年 7 月
27. 陳傳形、神谷庄司、佐藤尚、西田政弘、宍戸信之、大宮正毅、鈴木貴志、中村友二、野久尾毅、長澤忠広、“集積回路中の配線用銅薄膜界面に対する付着強度の評価”、日本機械学会 2010 年度年次大会、名古屋、2010 年 9 月

#### 国際会議

1. Masaki Omiya, Shoji Kamiya, Nobuyuki Shishido, Kozo Koiwa, Hisashi Sato, Masahiro Nishida, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, Toshiaki Suzuki, Takeshi Nokuo, Scenario for Catastrophic Failure in Interconnect Structures Under Chip Package Interaction, 2015 IEEE International Reliability Physics Symposium, Monterey, CA, USA April 19-23, 2015.
2. Nobuyuki Shishido, Chuantong Chen, Shoji Kamiya, Kozo Koiwa, Masaki Omiya, Hisashi

- Sato, Masahiro Nishida, Tomoji Nakamura, Toshiaki Suzuki, Takeshi Nokuo, Toshiaki Suzuki, "Grain structure effect on the stochastic distribution of local adhesion strength at metal/dielectric layer interface in copper wiring systems", International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films, San Diego, CA, April 28–May 2, 2014.
3. Nobuyuki Shishido, Kozo Koiwa, Shoji Kamiya, "Interface toughness evaluation for the ceramics/polyimide structures fabricated with different process conditions", Mechanical Issues for Flexible Electronics, Leoben, Austria, April 10–11, 2014.
  4. Chuantong Chen, Kozo Koiwa, Nobuyuki Shishido, Shoji Kamiya, Masaki Omiya, Hisashi Sato, Masahiro Nishida, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, Takeshi Nokuo, Toshiaki Suzuki, "The effect of plastic anisotropy on evaluation Cu/SiN interface strength with different copper crystal orientation", Materials for Advanced Metallization 2014 (MAM2014), Chemnitz, Germany, March 2–5, 2014.
  5. Shoji Kamiya, "Interface adhesion energy and apparent adhesion strength between Cu and insulation layers in damascene metallization systems", Advance Metallization Conference 2013, Tokyo, Japan, Oct 8–10 (2013), Session 5–4. (Invited)
  6. Nobuyuki Shishido, Shoji Kamiya, Chuantong Chen, Hisashi Sato, Kozo Koiwa, Masaki Omiya, Masahiro Nishida, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, Takeshi Nokuo, Toshiaki Suzuki, Macroscopic and microscopic interface adhesion strength of copper damascene interconnects, 2013 IEEE International Interconnect Technology Conference, Kyoto, Japan, June 13–15 (2013), 57–59.
  7. Nobuyuki Shishido, Shoji Kamiya, Hisashi Sato, Kozo Koiwa, Masaki Omiya, Masahiro Nishida, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, Takeshi Nokuo, Toshiaki Suzuki, "Device-in-situ measurement of local adhesion strength for metal wiring systems fabricated in micro-systems", ASME 2013 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems (InterPACK 2013), San Francisco, US, July 16–18 2013.
  8. Kozo Koiwa, Masaki Omiya, Nobuyuki Shishido, Shoji Kamiya, Hisashi Sato, Masahiro Nishida, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, Toshiaki Suzuki, Takeshi Nokuo, "Development of interfacial crack extension simulation between copper and insulation layer with multi-grain structure", Materials for Advanced Metallization 2013 (MAM2013), Leuven, Belgium, March 10–13 2013.
  9. Chuantong Chen, Nobuyuki Shishido, Shoji Kamiya, Kozo Koiwa, Hisashi Sato, Masaki Omiya, Masahiro Nishida, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, Takeshi Nokuo, Toshiaki Suzuki, "Evaluation for interface strength fluctuations induced by inhomogeneous grain structure of Cu line in LSI interconnects", Materials for Advanced Metallization 2013 (MAM2013), Leuven, Belgium, March 10–13 2013.
  10. Hisashi Sato, Nobuyuki Shishido, Shoji Kamiya, Kozo Koiwa, Masaki Omiya, Masahiro Nishida, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, Takeshi Nokuo, Tadahiro Nagasawa, "Local Deformation and Interfacial Fracture Behavior of Cu/Dielectric Systems in Interconnect Structures", Advanced Metallization Conference 2012 (ADMETA2012), Tokyo, Japan, October 22–25, 2012.
  11. Kozo Koiwa, Masaki Omiya, Nobuyuki Shishido, Shoji Kamiya, Hisashi Sato, Masahiro Nishida, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, Toshiaki Suzuki, and Takeshi Nokuo, "Development of Cu/insulation layer interface crack extension simulation with single crystal plasticity", 2012 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2012), Kyoto, Japan, September (2012)

12. N. Shishido, H. Sugiyama, S. Kamiya, H. Sato, K. Koiwa, M. Nishida, M. Omiya, T. Nagasawa, T. Nokuo, T. Suzuki, T. Nakamura, “Nano-scale Fracture Test for Local Interface Adhesion Strength Evaluation in LSI Interconnects”, Microscopy & Microanalysis 2012 Meeting, Phoenix, AZ, USA, July 29 - August 2 (2012).
13. Nobuyuki Shishido, Hisashi Sato, Chuantong Chen, Shoji Kamiya, Kozo Koiwa, Masaki Omiya, Masahiro Nishida, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, Takeshi Nokuo, Tadahiro Nagasawa, “In-situ observation of fracture behavior and local plastic deformation in sub-micron scale fracture test of interconnect structures”, Materials for Advanced Metallization 2012, Grenoble, France, March (2012)
14. Chuantong Chen, Nobuyuki Shishido, Kozo Koiwa, Shoji Kamiya, Hisashi Sato, Masahiro Nishida, Masaki Omiya, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, Takeshi Nokuo, Tadahiro Nagasawa, “A new approach to evaluation of interface adhesion strength for micro-scale interconnect structures in LSI”, International Workshop on Micro/Nano-Engineering, Kyoto, December (2011)
15. Kozo Koiwa, Masaki Omiya, Nobuyuki Shishido, Shoji Kamiya, Chuantong Chen, Hisashi Sato, Masahiro Nishida, Takeshi Nokuo, Tadahiro Nagasawa, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, “Numerical Simulation of Elastic-plastic Interface Crack Extension for Local Interface Toughness Mapping in LSI Interconnect Structures”, EMAP 2011, Kyoto, December (2011)
16. Nobuyuki Shishido, Hisashi Sato, Chuantong Chen, Kozo Koiwa, Masaki Omiya, Shoji Kamiya, Masahiro Nishida, Takeshi Nokuo, Tadahiro Nagasawa, Takashi Suzuki, and Tomoji Nakamura, “In-situ SEM Observation of Micro-scale Fracture Test for Estimating Local Interface Strength between Cu and SiN in Semiconductor Devices”, EMAP 2011, Kyoto, December (2011).
17. Nobuyuki Shishido, Chuantong Chen, Hisashi Sato, Shoji Kamiya, Masahiro Nishida, Masaki Omiya, Takeshi Nokuo, Tadahiro Nagasawa, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, “Local Interface Strength Evaluation for LSI Interconnect with Micron Resolution”, 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials, Nagoya, Japan, October (2011).
18. Nobuyuki Shishido, Satoru Matsumoto, Chuantong Chen, Hisashi Sato, Masaki Omiya, Shoji Kamiya, Masahiro Nishida, Takeshi Nokuo, Tadahiro Nagasawa, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, “Interface Toughness Evaluation with Specimens Fabricated by Focused Ion Beam for Micro Scale Devices and Packages”, ASME 2011 Pacific Rim Technical Conference & Exposition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Systems, Proceedings of InterPACK 2011, Portland OR, July 6-8 (2011).
19. 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”, American Institute of Physics Conference Proceedings Vol.1300, pp.33-38, (2010).

③ ポスター発表 (国内会議 1 件、国際会議 1 件)

【国内会議】

1. 宍戸信之、佐藤尚、高園敬太、陳傳形、神谷庄司、大宮正毅、西田政弘、野久尾毅、長澤忠広、鈴木貴志、中村友二、 “FIB-SEM 総合評価ステーションによる LSI 機械特性マッピング”、LSI テスティングシンポジウム 2011、大阪、2011 年

11 月

【国際会議】

1. Nobuyuki Shishido, Yuka Oura, Hisashi Sato, Shoji Kamiya, Kozo Koiwa, Masaki Omiya, Masahiro Nishida, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, Takeshi Nokuo, Toshiaki Suzuki, “Crystal orientation effect on local adhesion strength of the interface between a damascene copper line and the insulation layer”, Materials for Advanced Metallization 2013 (MAM2013), Leuven, Belgium, March 10-13 2013.

(4)知財出願

①国内出願 (5件)

1. 半導体集積回路の配線構造設計装置、発明者(神谷庄司、大宮正毅)出願人(国立大学法人名古屋工業大学)、平成 26 年 10 月 16 日、(特願 2014-211318)
2. 金属配線と絶縁層との密着強度の改善する方法、発明者(佐藤尚、宍戸信之、西田政弘、神谷庄司)出願人(国立大学法人名古屋工業大学)、平成 26 年 9 月 11 日、(特願 2014-184766)
3. 単結晶の結晶塑性特性評価が可能な試験片、発明者(小岩康三、神谷庄司)出願人(国立大学法人名古屋工業大学)、平成 26 年 6 月 4 日、(特願 2014-115933)
4. 剪断剥離試験による界面強度の評価方法、発明者(神谷庄司、宍戸信之)、出願人(国立大学法人名古屋工業大学)、平成 24 年 7 月 26 日、(特願 2012-165496)
5. 被検査試料測定装置及び被検査試料測定装置の制御方法、発明者(神谷庄司、佐藤尚、宍戸信之、野久尾毅、長澤忠広)、出願人(国立大学法人名古屋工業大学、日本電子株式会社)、平成 23 年 12 月 16 日、(特願 2011-276211)

(5)受賞・報道等

① 受賞

日本機械学会機械材料・材料加工部門 部門表彰(奨励講演論文部門)、陳傳彤、2013 年 9 月 9 日

Presentation awards of MAM2012 (Materials for Advanced Metallization 2012, Grenoble), Nobuyuki Shishido, “In-situ observation of fracture behavior and local plastic deformation in sub-micron scale fracture test of interconnect structures”, 14th March, 2012.

(6)成果展開事例

①社会還元的な展開活動

- 半導体関連企業対象に受託分析を行うフィリピン国営組織 (Industrial Technology Development Institute: ITDI) に所属する研究者 2 名が故障解析ツールとして本研究で開発した局所評価ステーションを視察、得られた成果とともにステーションの適用事例について紹介した。
- 一般財団法人ファインセラミックスセンター材料技術研究所より、局所評価ステーションを用いたコーティング材の機械特性評価についての問い合わせがあり、関連する成果についての講演依頼および技術指導を行う(2012 年 10 月予定)。
- 日本電子(株)経由で大学所属の研究者に対して局所評価ステーションを用いたナノスケール機械試験のデモおよび情報交換を行った。

## § 5 研究期間中の活動

### 5. 1 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
H21年10月21日	第1回 CRESTメンバーミーティング(非公開)	日本電子(株) 昭島製作所	7名 (+関連装置メーカー4名)	H21年度の研究内容とスケジュールの打合せ及び装置見学
H21年12月17日	第2回 CRESTメンバーミーティング(非公開)	名古屋工業大学	9名	研究内容、装置開発の現況報告/今後の方針、実験改善点等打合せ
H22年3月26日	第3回 CRESTメンバーミーティング(非公開)	日本電子(株) 昭島製作所	5名	研究内容、装置開発の現況報告/4月の国際会議について打合せ等
H22年5月15日	第4回 CRESTメンバーミーティング(非公開)	名古屋工業大学	6名	研究内容/装置開発/学会予定について報告。今後の方針について打合せ。
H22年6月4日	第5回 CRESTメンバーミーティング(非公開)	日本電子(株) 昭島製作所	6名	研究内容、装置仕様の策定、今後の方針、について打合せ
H23年1月18日	第6回 CRESTメンバーミーティング(非公開)	日本電子(株) 昭島製作所	8名	研究進捗報告。今後の計画について打合せ。
H23年4月19日	第7回 CRESTメンバーミーティング(非公開)	日本電子(株) 昭島製作所	9名	研究内容/装置開発/学会予定について報告。5月サイトビジットに向けた調整。
H23年11月19日	第8回 CRESTメンバーミーティング(非公開)	日本電子(株) 昭島製作所	8名	研究内容/装置開発/学会予定について報告。今後の方針について打合せ。
H24年3月29日	第9回 CRESTメンバーミーティング(非公開)	日本電子(株) 昭島製作所	9名	研究進捗/装置開発について報告。今後の方針について打ち合わせ。
H24年7月2日	第10回 CRESTメンバーミーティング(非公開)	日本電子(株) 昭島製作所	6名	研究進捗およびサイトビジットに向けた今後の方針について打ち合わせ。
H24年7月6日	第11回 CRESTメンバーミーティング(非公開)	名工大	5名	研究進捗報告。サイトビジットに向けた調整。
H24年10月11日	第12回 CRESTメンバーミーティング(非公開)	名工大	7名	研究進捗報告および中間評価会に向けた調整。
H25年1月16日	第13回 CRESTメンバーミーティング(非公開)	日本電子(株) 昭島製作所	6名	研究進捗報告および今後の方針について打ち合わせ。
H25年5月23日	第14回 CRESTメンバーミーティング(非公開)	日本電子開発館	8名	総括面談&公開シンポ準備のためのミーティング

H25年 8月13日	第15回CRESTメンバーミーティング(非公開)	名古屋工業 大学	5名	研究進捗報告のためのミー ティング
H25年 9月5日	第16回CRESTメンバーミーティング(非公開)	慶應大学日 吉キャンパ ス	5名	研究進捗報告のためのミー ティング
H25年 12月25、26 日	第17回CRESTメンバーミーティング(非公開)	慶應大学日 吉キャンパ ス	5名	研究進捗報告のためのミー ティング
H26年 1月7日	第18回CRESTメンバーミーティング(非公開)	日本電子開 発館	8名	研究進捗報告のためのミー ティング
H26年 4月4日	第19回CRESTメンバーミーティング(非公開)	日本電子開 発館	6名	研究進捗報告および領域会 議への準備
H26年 5月14日	第20回CRESTメンバーミーティング(非公開)	日本電子開 発館	5名	研究進捗報告のためのミー ティング
H26年 9月17日	第21回CRESTメンバーミーティング(非公開)	(株)富士通 本社	4名	研究進捗報告および最終報 告書への準備
H26年 9月18日	第22回CRESTメンバーミーティング(非公開)	北海道大学	3名	研究進捗報告および最終報 告書への準備
H27年 2月5日	第23回CRESTメンバーミーティング(非公開)	慶應大日吉 キャンパス	5名	研究進捗報告および領域ワ ークショップの講演準備

## §6 最後に

### <得られた成果の意義>

このプロジェクトの最大の成果は、次世代エレクトロニクスデバイスのイノベーションに機械工学という分野が寄与できる領域が存在することを提示できたことだと認識している。方法論を具体化し実用性を高めるフェイズは、当初予期した以上に時間がかかることが判明した計算手法等を含めて、今後の展開で改善していかざるを得ない。一方で、これまでに見出された成果、すなわち構造を要素(部材)に分解して構造物全体の強度を演繹する機械工学的基本方針が、構造物に見合った大きさの局所強度評価によりサブミクロンスケールの対象においても機能し得ることは、機械と電子・応用物理の双方にとって今後の新しい展開を見出し得る一つの希望をもたらしたと考えている。この理念を我が国の産業に帰還すべく、次の項で今後の展開として述べる方向を一例として、今回のCRESTを足がかりに新しい機械工学のさらなる可能性を追求したい。

### <今後の研究の展開>

集積回路(LSI)の配線はCu/low-k多層化技術により、高密度化、高性能化が進んできたが、多様な実装形態の開発に伴い、ICチップ単体で問題なく完成した多層立体配線構造において、実装時の機械的負荷(CPI, Chip Package Interaction)によって不良が生じる例が繰返し生じている。不良リスクを最小化することは、生産効率向上、スピーディーな製品の市場投入につながり、市場競争力の優位性の点から新規特性デバイスの開発と同じくらい重要な課題である。しかし、近年、ものづくりの国際水平分業化が進み、日本国内で生産プロセスラインを持つ企業が少なくなっており、従来行われてきた経験的なモノづくりができなくなりつつある。そのため、国際的なものづくりの競争力を維持するためには、TCAD(テクノロジーCAD)に代表されるような、シミュレーション技術を用いたデバイス特性の予測、実装時の製品の信頼性・寿命の予測が重要となってきた。本研究開発された、LSI配線の銅配線と絶縁膜界面の強度をサブミクロンレベルで評価する手法、銅配線と絶縁膜界面における破壊リスクを統計的に算出する手法や新知見・技術をもとに、多様な実装モジュールに対応可能な工学モデルの構築、そのモデルに基づいた故障リスク予測シミュ

ーション技術の開発を行っていく。そして、モデルベース機械不良リスクアセスメントを可能にし、T-CADをベースとした設計から製造プロセス、製品の長期信頼性の予測を実現させたい。

一方、集積回路のさらなる高密度化・高速化のために、ウェハを積層して一つのチップにするウェハレベルパッケージもここ数年で採用されている。ウェハ同士を繋ぐ銅配線の微細化が進み、数ミクロンレベルの銅細線が用いられるようになってきている。この場合、本研究で得られた知見である銅の結晶粒状態に起因した強度の揺らぎによる配線強度にばらつきが懸念される。そのため、ウェハレベルパッケージにおいても信頼性を確保するために、本研究で得られた知見をもとにした故障リスクの定量化を行い、製品の長期信頼性予測技術を確立し、引き続き機械工学の視点から、日本の半導体産業へ貢献していきたい。