

「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」
平成21年度採択研究代表者

H24 年度 実績報告

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
 - ・寿命予測と設計スキーム確立

(2) 慶應グループ

- 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
 - ・結晶粒構造を考慮した弾塑性き裂進展解析手法の検討
 - ・TCAD シミュレータによる成膜プロセス中の応力解析

§ 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 多層配線や三次元積層集積回路の機械的なウークポイントである配線/絶縁体界面での破壊を予期・回避するためには、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、現状は同一材料界面の巨視的強度情報が参考にされるのみにすぎない。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、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、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。

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。さらに、同じ配線の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た。本年度は、この変動の原因を解析すべく、配線の金属微視組織と局所強度との相関性評価に着手した。特に、微視組織に敏感な塑性変形特性に着目し、局所強度と塑性変形との相関性についての調査を進めた。

また、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、結晶粒構造を考慮した三次元弾塑性き裂進展シミュレータを開発した。そして、配線金属材料の結晶組織の塑性変形挙動が、局所的な低強度箇所の形成の要因であることを明らかにした。また、製造プロセスと界面強度とを関連づけるために、典型的なプロセスモデルを考え、TCAD (HyENEXSS) のプロセスシミュレータにより、プロセス中に発生する熱応力を求めた。今後は、このプロセスシミュレータと評価用き裂進展シミュレータとの連携を進め、実際のデバイス設計・製造における破壊リスクの定量化手法の構築を進める。

2.2 局所強度と配線結晶組織の相関調査 これまでの評価結果において、局所強度が配線上の位置によらず不規則に変化していたことから、同じく不規則に変化する銅結晶粒構造が局所強度に関与していると推察される。そこで、配線中の結晶粒サイズに応じた試験片を作製し、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1に界面エネルギー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¹⁾。また、試験片をより小型化し、単一結

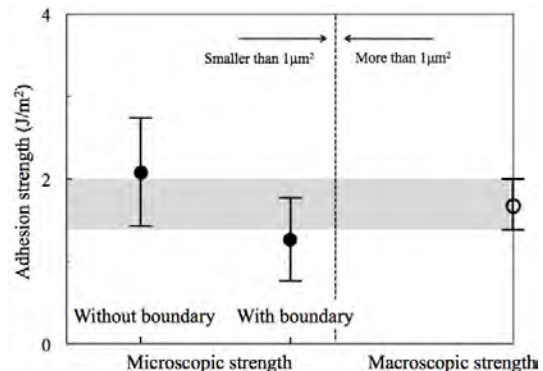


図1 局所界面強度における粒界の影響

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に成功した。図1に示すように、単一粒試験片が粒界を含むものに比して高強度であったことから、複雑な結晶粒構造、特に粒界の存在が局所強度を低下させていることが明らかとなった。

2.3 局所強度の寸法効果 慶應グループ

の開発した弾塑性き裂進展シミュレーションを援用することで、破壊試験時に界面の剥離に要したエネルギーから塑性変形による散逸エネルギーを分離することが可能となった。そこでこの二つを独立に評価した結果、図2に示すように、1~10マイクロスケールの試験片では寸法の減少に伴って塑性散逸エネルギーの相対的なばらつきが大きくなる傾向が得られた²⁾。多数の結晶粒を含む10マイクロスケール

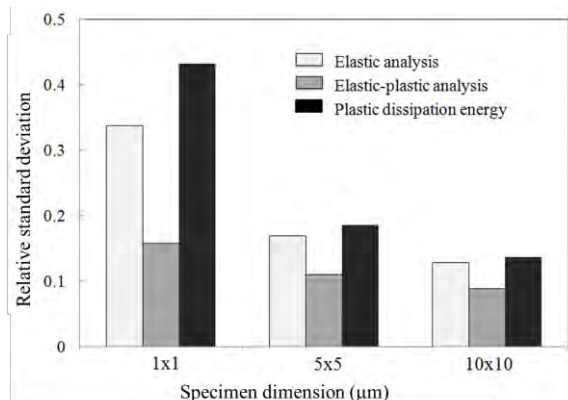


図2 界面強度と塑性エネルギーの寸法依存

ールでは銅が均質な塑性変形特性と見なせる一方で、配線を構成する銅の結晶粒寸法に近い1マイクロスケールではその結晶組織に応じて塑性散逸エネルギーが著しく変動し、結果として見かけの界面強度が大きくばらついたと推察される。これは、界面強度と配線結晶粒構造との相関性を解析するにあたり、局所的な塑性変形挙動の把握が重要であることを示唆している。

2.4 剥離試験中の局所変形評価

前年度に開発を完了した、第二世代インデンタ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3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。今後は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。

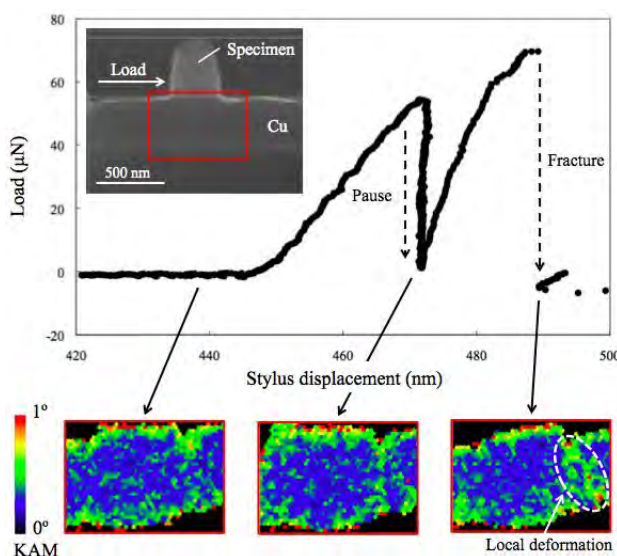


図3 剥離試験中の局所変形その場観察

2.5 寿命予測と設計スキーム確立

半導体デバイスにおいて機械不良発生の統計的な予測を行うために、1μm 角の試験片に対して、

JEDEC- JESD22 -A104 (Condition C) に準拠した温度サイクル試験 (-70°C ~ +150°C) を行い、その後、評価ステーションによる実験における局所強度試験を行った。図4に示す局所強度の評価結果は、マクロな構造でよく知られる劣化挙動とは少し異なり、低下と上昇の双方の変化がみられる。1000 サイクルにおける若干の強度低下については、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り、当初予想通りの変化である。しかし、その劣化の割合は計画当初の予想に比べて小さい。一方、その後の 3000 サイクルでは逆に上昇の傾向が見られ、測定結果のばらつきが小さくなった。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る。平成 25 年度は、この結果をも踏まえて、長期信頼性に対する機械工学的設計に対する指針の検討を行っていく。

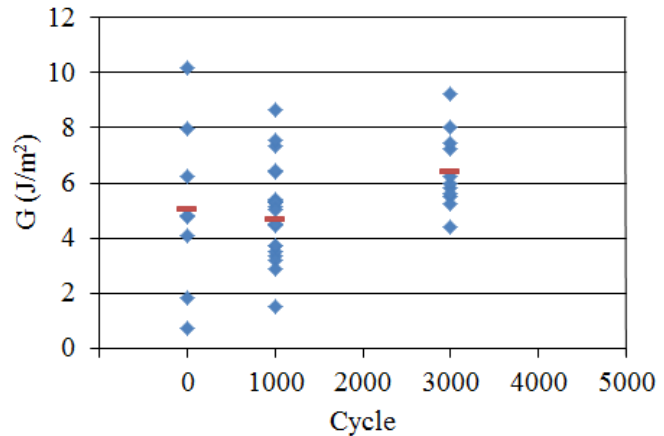


図4 温度サイクルによる強度の変化

2.6 結晶粒構造を考慮したき裂進展シミュレーション手法の開発 平成 24 年度は、塑性変形の影響を考慮した三次元弾塑性き裂進展シミュレーション手法を構築し、実際の実験状況をコンピュータ上で再現できるようになった。一方で、実験により結晶構造が界面強度に強く影響していることが明らかとなったため、さらに結晶方位を考慮した弾塑性き裂進展解析手法を構築した。新たに開発したこれらの手法を用いて銅の結晶方位を考慮したき裂進展シミュレーションを行うことで、図5および図6に状況を示すごとく、粒界等を含む結晶粒構造だけではなく、銅の結晶方位そのものも界面の局所強度に大きく影響し、評価結果のばらつきを引き起していることを突き止めた。

また、局所強度マッピングにより得られた情報を実際の設計に生かすためには、シミュレーションベースの強度設計手法を構築する必要がある。本研究では、TCAD (HyENEXSS) のプロセスシミュレータを採用し、典型的なプロセスモデルを考えて、図7に一例を示すようなプロセス

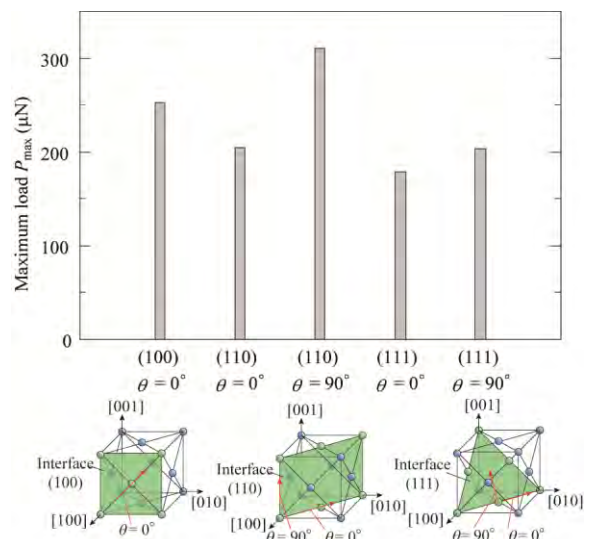


図5 界面の Cu 結晶方位と最大荷重の関係

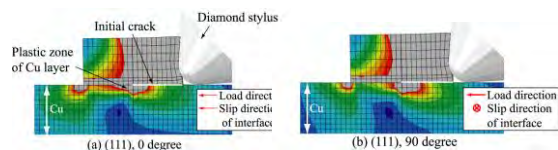


図6 Cu の結晶方位と塑性変形挙動

中に発生する熱応力を求めた。今後は、このプロセスシミュレータと評価用き裂進展シミュレータとの連携を進めることにより、製造プロセスと界面強度とを関連づけ、実際のデバイス設計・製造の破壊リスクの評価に有用なシミュレータの構築を進める。

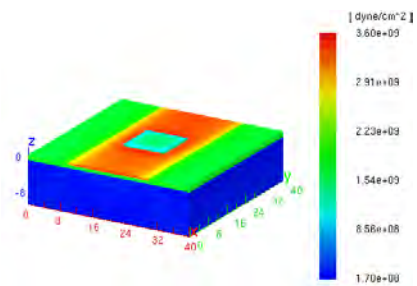


図7 成膜プロセス中の熱応力解析

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. 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 (DOI:10.1016/j.surfcoat.2012.07.100).
2. 陳伝彤、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.
3. 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 (DOI:10.1016/j.mircorel.2012.12.009).
4. 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*, (accepted).

(3-2) 知財出願

- ① 平成 24 年度特許出願件数(国内 1件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 2件)