

2026年6月1日

報道関係者各位

慶應義塾大学

## 次世代 1nm ノード以降の半導体に向けた配線材料を開拓

～新材料配線に関する 4 アプローチでポスト Cu 配線の実現に向けた指針を提示～

### ポイント

- ▶ 半導体の微細化に伴う銅(Cu)配線の抵抗率上昇(サイズ効果)は、1nm ノード以降の高速・低消費電力化を阻む最大のボトルネックである。
- ▶ ルテニウム(Ru)配線の高配向化、ニッケル(Ni)配線の酸化抑制、異方性伝導体 CoSn 単結晶薄膜、擬一次元導体 PtCoO<sub>2</sub> の粒界散乱の原子論的モデル化、という 4 つの多面的アプローチを開発し、次世代配線材料の有望性を実証・予測した。
- ▶ 材料・プロセス・計算を横断する統合的な研究基盤により、Cu 配線の限界を突破する次世代 BEOL 配線技術の道筋を示した。

国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の次世代エッジ AI 半導体研究開発事業において、慶應義塾大学理工学部の多田宗弘教授、田中貴久准教授らのグループ、および国立研究開発法人物質・材料研究機構(NIMS)の中谷友也主幹研究員らのグループは、次世代半導体における配線材料に関する 4 件の新技術・新知見を開発しました。

従来、半導体集積回路の配線には銅(Cu)が用いられています。しかし、配線寸法が電子の平均自由行程(約 39nm)に近づくと、電子散乱により抵抗率が急上昇するサイズ効果<sup>注 1)</sup>が顕在化し、1nm ノードおよびその先の世代の性能向上を阻む最大のボトルネックとなっていました。

本研究グループは、(1) Ru 配線の極薄 Ta ライナーによる高配向化、(2) Ni 配線の極薄 Al キャップによる酸化抑制、(3) 異方性伝導体であるカゴメ金属<sup>注 2)</sup>CoSn の単結晶薄膜の成長、(4) 擬一次元導体 PtCoO<sub>2</sub> の粒界散乱の密度汎関数強束縛法<sup>注 3)</sup>による原子論的モデル化、という 4 つの多面的アプローチを行い、いずれも Cu 配線の限界を突破する高いポテンシャルを有することを明らかにしました。

本成果は、1nm 世代以降の半導体集積回路における配線抵抗の大幅な低減と、それに伴う高速動作・低消費電力化への貢献が期待されます。

本研究成果は、2026年6月1日から4日(現地時間)に米国・サンノゼで開催される半導体配線技術の国際会議「IEEE International Interconnect Technology Conference 2026 (IITC2026)」において発表されます。

本成果の一部は、以下の支援によって得られました。

#### 次世代エッジ AI 半導体研究開発事業

テーマ:「次世代トランジスタ技術」

PO:川崎雅司(東京大学 大学院工学系研究科 教授/理化学研究所 理事)

研究開発課題:「新構造・新材料トランジスタと低抵抗配線の研究開発」(グラント番号:JPMJES2531)

研究開発代表者:多田 宗弘(慶應義塾大学 教授)

研究開発期間:2025 年 12 月～

上記研究課題では、半導体の微細化・高性能化を支える次世代トランジスタと低抵抗配線の研究開発を通じ、エッジ AI 半導体の高速化・低消費電力化を実現することを目的としています。

### <研究の背景と経緯>

スマートフォン、自動車、AI データセンターなど、現代社会を支える半導体デバイスの性能向上は、プロセスの微細化によって実現されてきました。半導体チップ内では、膨大な数のトランジスタを接続する極めて細かい金属配線(BEOL 配線)が信号や電力を伝達しており、現在は Cu を主材料としています。

しかし Cu は、配線幅が電子の平均自由行程(約 39nm)と同程度以下になると、表面や結晶粒界での電子散乱が急増し、抵抗率が飛躍的に上昇するサイズ効果が顕在化します。加えて、Cu の拡散を防ぐために必須となるバリア層が相対的に厚くなり、実際に導電を担う実効金属断面積が減少します。結果として配線の電気抵抗が大きくなり、信号遅延・消費電力・発熱の増大を招いて、1nm ノードおよびその先の世代の性能向上を制約します。

この「配線抵抗問題」を打破するためには、(i) Cu を凌駕する新材料の探索、(ii) Ru などの既存候補材料におけるプロセス技術の極限制御、(iii) 材料・界面の微視的理解に基づく設計指針の提示、を一体的に推進することが不可欠です。本研究グループはこの統合的戦略のもと、材料合成・薄膜プロセス・理論計算を有機的に結合した研究を進めました。

### <研究の内容>

本研究グループは次世代新配線材料の開発を異なる方向から推進し、ポスト Cu 配線を実現するための多面的な研究を進めてきました。以下の4つの成果を得たため、今回 IITC2026 において発表されます。

#### (1) 極薄 Ta ライナーによる高配向 PVD Ru 薄膜 (慶應義塾大学)

発表者:溝端 悠介、釘尾 健正、辺見 龍瑞、浜野 翔、田畑 海登、田中 貴久、多田 宗弘(慶應義塾大学)

Ru は電子の平均自由行程が約 6.6nm と Cu の 1/6 と短く、微細配線でのサイズ効果が小さいため、1nm 世代以降の最有力配線材料として注目されています。しかし、層間絶縁膜 SiO<sub>2</sub>との化学的結合が弱く密着性に乏しく、これまでは密着層(ライナー)の挿入が必須でした。従来、このライナーは配線の実効体積を減らし、抵抗率を悪化させる「必要悪」とされてきました。本研究では、Ru/SiO<sub>2</sub>界面にタンタル(Ta)を 0.1~1.0nm の極薄レンジで精密挿入する手法を開発しました。その結果、Ta 0.2~0.3nm の挿入により、hcp Ru(002)の結晶配向強度比が 0.78 から最大 1.0 まで向上することを見出しました。これにより、膜厚 20nm において 13.0 μΩ・cm の低抵抗率を達成すると同時に、テープ剥離試験による密着性も完全に確保しました。従来の常識を覆し、密着層の挿入が逆に Ru の結晶配向を改善し抵抗率低下に寄与する、1nm ノード配線の実装に向けた大きな進展です。

#### (2) 1nm Al キャップ付き Ni 薄膜による低抵抗配線 (慶應義塾大学)

発表者:釘尾 健正、佐々木 綾香、溝端 悠介、田畑 海登、辺見 龍瑞、浜野 翔、田中 貴久、多田 宗弘(慶應義塾大学)

Ni は Cu に比べて「バルク抵抗率×平均自由行程」の積が小さく、極細配線での抵抗上昇が抑えられる有望材料です。しかし、極薄膜化すると大気中で容易に酸化し、抵抗率が劣化する課題がありました。本研究では、マグネトロ

ンスパッタで Ni 薄膜を成膜した直後、真空を破らず厚さ 1nm の Al(アルミニウム)キャップ層を連続堆積する手法を開発しました。この Al キャップは大気暴露により一部が自的に Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>不動態層を形成し、下地となる Ni の酸化を効果的に抑制します。加えて、400°C・30 分のアニールにより Ni 粒径が約 7nm から 11nm へ成長し、電子の粒界による散乱の減少に成功しました。これにより、膜厚 7.9nm において 23  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$  という、同等膜厚の Cu 薄膜を下回る抵抗率を達成し、BEOL 工程の熱負荷(400°C以下)の要件も満たしました。「酸化抑制」と「結晶成長」を極薄 Al キャップ一つで同時に実現し、sub-10nm 厚 Ni 配線の低抵抗化に向けた有力な手法です。

### (3) カゴメ金属 CoSn 単結晶薄膜の擬一次元伝導 (NIMS)

**発表者:** 中谷 友也、Rohit Dahule、Nattamon Suwannaharn、佐々木 泰祐、佐原 亮二 (NIMS)

カゴメ格子を持つ金属 CoSn は、結晶の c 軸方向のみ低抵抗率(バルクで 3~7  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ )、面内では 100  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$  超という強い擬一次元的伝導異方性を示します。c 軸を配線方向に揃えることができれば、表面散乱を原理的に回避し、サイズ効果を劇的に抑制できると期待される新コンセプトです。本研究では、MgO(110)基板上に bcc-CoFe(211)/hcp-Co/hcp-Ru のバッファ層を介した独自のエピタキシャル成長手法を確立し、c 軸が面内方向を向いた CoSn(10-10)単結晶薄膜の作製に成功しました。得られた薄膜は、c 軸方向で約 13  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 、a 軸方向で約 120  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$  と、バルク単結晶に匹敵する約 10 倍の抵抗率異方性を再現しました。異方性伝導体を配線に用いるコンセプトを単結晶薄膜で実証し、300mm ウェハスケールのエピタキシャル成長・ウェハ転写といった量産プロセスへの道筋を示しました。

### (4) PtCoO<sub>2</sub> の双晶粒界散乱の原子論的モデル化 (慶應義塾大学)

**発表者:** 田中 貴久 (慶應義塾大学)

PtCoO<sub>2</sub> はデラフォサイト構造を持つ異方性伝導体で、面内方向に極めて低い抵抗率(ナノスケール膜で 10  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$  未満)を示す、CoSn と並ぶ次世代配線の有力候補材料です。一方で、粒界における電子散乱の寄与については定量的評価が困難でした。本研究では、計算コストの高い第一原理計算(DFT)に代わり、大規模な原子系にも適用可能な密度汎関数強束縛法(DFTB)を活用しました。バイズ最適化を用いて PtCoO<sub>2</sub> 専用の DFTB パラメータを独自に開発し、これを用いた非平衡グリーン関数(NEGF)計算により、180° 回転双晶粒界における反射係数  $R=0.48$  を抽出し、従来経験的に用いられてきた値( $R=0.5$ )との一致を初めて原子論レベルで検証しました。開発パラメータは公開リポジトリで提供され、PtCoO<sub>2</sub> および関連異方性材料の高スループット原子論的設計の基盤を構築しました。

### <今後の展開>

今回発表する 4 件の成果は、次世代配線材料研究を多方向から同時に推進する重層的アプローチです。短期的には Ru・Ni のプロセス最適化が実用化に直結し、中長期的には異方性伝導体(CoSn・PtCoO<sub>2</sub>)が新世代配線を担う可能性を示しています。

今後は、ライナー挿入 Ru および極薄キャップ付き Ni 技術の実配線構造への適用と、エレクトロマイグレーションなどの信頼性検証を進めます。また、PtCoO<sub>2</sub> の DFTB パラメータを活用した粒界・表面構造の大規模原子論的スクリーニングを実施し、他のデラフォサイト材料への展開を推進します。CoSn 薄膜については、A 面(0001 面)利用による表面平坦化、および 300mm ウェハ対応プロセスとウェハ転写技術の開発を進めます。

これらの成果を統合することで、1nm 世代以降、さらには埋め込み電源配線(BPR)や CFET 世代を見据えた半導体配線技術の基盤を、国内の産学官連携体制のもとで確立し、日本発の次世代半導体技術の国際競争力強化に貢献していきます。

### <用語解説>

注 1) [サイズ効果]

金属配線の断面寸法が、電子の平均自由行程(Cu で約 39nm)と同程度またはそれ以下になった際に、表面散

乱や粒界散乱の寄与が増大して抵抗率が急上昇する現象。半導体微細化に伴う配線抵抗増大の主要因となっている。

#### 注2) [カゴメ金属]

原子が「カゴ目」と呼ばれる三角形を基調とした幾何学的格子を形成する金属の総称。特異な電子状態を持ち、CoSnはその代表例として擬一次元的な伝導異方性を示す。

#### 注3) [密度汎関数強束縛法 (DFTB) ]

第一原理密度汎関数理論(DFT)を近似化した半経験的な電子状態計算手法。DFTと比べ計算コストが2~3桁低く、数千原子規模の系の電子状態・電気伝導を扱える。

### <発表論文>

本プレスリリースの対象となる4件の発表は、下記の国際会議 IITC2026 (<https://iitc-conference.org/>)にて行われます。

- (1) Y. Mizobata, K. Kugio, R. Hemmi, S. Hamano, K. Tabata, T. Tanaka, M. Tada, *"Highly Oriented PVD Ru (002) Thin Films Enabled by an Ultra-Thin Ta Liner for Sub-2 nm Node Interconnects"*, IEEE International Interconnect Technology Conference 2026 (IITC2026).
- (2) K. Kugio, A. Sasaki, Y. Mizobata, K. Tabata, R. Henmi, S. Hamano, T. Tanaka, M. Tada, *"Low Resistive Ni thin film with ultra-thin Al capping layer for Advanced Interconnects"*, IEEE International Interconnect Technology Conference 2026 (IITC2026).
- (3) T. Nakatani, R. Dahule, N. Suwannaharn, T. Sasaki, R. Sahara, *"CoSn Pseudo-one-dimensional Conductor: Potential and Challenges for Interconnect Applications"*, IEEE International Interconnect Technology Conference 2026 (IITC2026).
- (4) T. Tanaka, *"Atomistic Modeling of Twin Boundary Scattering in PtCoO<sub>2</sub>"*, IEEE International Interconnect Technology Conference 2026 (IITC2026).

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

### <お問い合わせ>

#### <研究に関すること>

多田 宗弘(ただ むねひろ)  
慶應義塾大学 理工学部 教授  
〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1  
Tel:045-566-1776  
E-mail:[tada@sd.keio.ac.jp](mailto:tada@sd.keio.ac.jp)

#### <報道に関すること>

慶應義塾 広報室  
〒108-8345 東京都港区三田 2-15-45  
Tel:03-5427-1541 Fax:03-5441-7640  
E-mail:[m-pr@adst.keio.ac.jp](mailto:m-pr@adst.keio.ac.jp)