

電子材料と共に歩んだ30年間*

村上正紀**

1. はじめに

この度は、日本金属学会賞を受賞するという栄誉を受け、身に余る光栄に存じます。日本金属学会の関係者の皆様に心より感謝申し上げます。

1975年にIBMワトソン研究所に就職して以来、電子材料に興味を持ちはじめ、30年間にわたり電子材料の研究を続けてきました。30余年間携わってきたといえども、1960年代から本格的に始まった電子材料開発を駅伝に例えると、私は、ジョセフソン駅伝、コンタクト駅伝、配線駅伝のそれぞれの駅伝で、前のランナーから襷を受け取り、一区間走っただけです。本稿で紹介させて頂く成果は、私だけの貢献ではなく、先人からの恩恵と多くの共同研究者の貢献の賜ですが、紙面の制限上、共同研究者の名前を省略させて頂く事をお許し頂きたい。

本稿では、電子材料での研究成果の紹介と共に、高性能の電子デバイス実現に向けて、材料屋の本領はどこで発揮出来るかを、30年間の経験を踏まえて述べさせて戴きます。

2. 電子材料へのかかわり

1971年に博士課程を修了後、すぐさま渡米。カリフォルニア大学(ロスアンゼルス校)で釘一本もない理論屋の研究室から米国での研究生生活を始めた。やっとな手作りの実験装置が順調に動きだした時点で渡航ビザが切れ、カリフォルニア大学での研究は中断せねばならなかった。当時(1974年)は、ベトナム戦争が終結し、国内の景気は急激に悪化、アメリカの若者の失業率が増加した為、外国人に永住権を保証してくれる米国企業での職探しは困難を極めた。

たまたまニューヨーク州の郊外にあるIBM T. J. ワトソ

ン研究所で国際真空会議が開催されたのが縁で、IBMでの就職が叶った。電子材料との拘わりの出発点である。IBMでは、電気屋、物理屋、化学屋に囲まれた環境での電子材料開発であったが、物理屋、電気屋は、大胆に素材を組み合わせ、兎に角、デバイスが作動する程度の材料開発を短時間で達成する。材料屋の出番は、「デバイスの信頼性」が問題になってからの場面が多い。重要だが目立たない仕事である。材料屋に囲まれて研究生生活をしてきた私には、物理屋、電気屋が主役で材料屋は黒子役である事を容認するには月日を要した。

電子材料は多種多様な元素が用いられている。高性能・高信頼化には、縦横爆撃で偶然の発見を期待するか、或いは、地道に長年培った材料の基礎研究を基盤にして開発するかの二通りである。自分でコース戦略を練らねばならない「電子材料駅伝」の始まりである。京都大学、カリフォルニア大学での基礎研究は電子材料駅伝に出場する前の基礎体力づくりであったかもしれない。

3. ジョセフソン素子での材料開発

(1) ジョセフソン駅伝～第一走者からの襷

1970年代、IBM研究所ではSi半導体コンピューターより演算速度が数倍速く、消費電力が千分の一の可能性のある超伝導コンピューターの開発プロジェクトが進行していた。世界で始めて超伝導現象を利用して高速コンピューターを作製しようとするものであり、ジョセフソンプロジェクトと呼ばれていた。最も多い時は160人の参画である。

ジョセフソン素子は液体ヘリウムで超伝導特性を示すPb合金薄膜材料で形成されていた⁽¹⁾。当時は下部電極材には200 nm厚のPb-In-Au合金膜、上部電極材には400 nm厚のPb-Bi合金膜、そして上部と下部電極の間には5 nm厚の

* 2011年3月25日に予定していた東京都市大学世田谷キャンパスにおける第146回本会春期大会での口頭講演は、東日本大震災の影響により中止したが、本概要掲載により、第146回本会春期大会で発表したものとみなす。

** 学校法人立命館副総長(〒525-8577 草津市野路東1-1-1)

Development of Electrode Materials Used in Electronic Devices; Masanori Murakami (Ritsumeikan University, Kusatsu)

Keywords: thin films, ohmic contact materials, semiconductor materials, wiring materials, mechanical properties, electron transportation mechanism

2010年11月16日受理

酸化膜が絶縁体として用いられていたが、この合金の組成は「ジョセフソン駅伝」の第一走者である電気屋が開発した。しかし、元素選択理由は不明。電気特性には優れている(スイッチング速度が速い)が、信頼性に乏しい欠点があり、第二走者の材料屋に襷が渡された。

Pb 合金電極材は、液体ヘリウムに冷却時に熱収縮が生じる。基板には熱収縮の小さい Si が用いられていたため、Si 基板に密着している(熱収縮の大きな)Pb 合金薄膜には冷却時に(引っ張り)熱歪が導入され、室温と液体ヘリウムの熱サイクルを繰り返すと、下部電極表面に変形が生じる。その結果、極薄の酸化膜(絶縁膜)が破壊され、上部の Pb-Bi 電極と短絡し、ジョセフソン素子は破壊する。この Pb 合金ジョセフソン素子の信頼性の課題を二年間で解決する事が私一人の責務となった。解決法は、簡単には見出されない。研究装置を100%完備している環境下での研究の失敗は“no excuse”である。

(2) 第二区間コースの攻略法

第一走者が開発した Pb-In-Au 合金膜の表面形状は冷却前から粗く、冷却後の表面変化は微小で、観測不可能である。開発指針無しに、偶然の発見で、新材料を短期間で開発するにはリスクが大き過ぎる。材料の基礎研究に立ち返り、Pb-In-Au 合金を改良する方法しかない。これが第二区間コースの攻略法である。基礎に立ち戻り、薄膜の強化機構を解明するため、In, Au を含まない“純 Pb”薄膜材料を用いて研究を開始した。

まず、弾性限界内の歪により誘起される薄膜表面での変形についての研究を開始。実際のデバイスを構成している薄膜には、平面歪が導入される。且つ、Pb の弾性率の異方性のため、表面に平行な結晶面の相違により、基板に垂直方向の歪量は異なる。平面歪モデルで計算された垂直歪を図 1 (a) に示す。この図には液体ヘリウムで(0.01%の精度で歪の測定ができる)X線回折で測定された実測歪値も示す。図 1 (a)に示す様に Pb 膜の垂直歪は、理論で予測された結晶面による方位依存性がある事が実証された⁽²⁾。その結果、弾性限界内でも(b)図に示す様に結晶方位が異なる結晶粒の境界には、微小の表面の凹凸が生じる事が明らかになった。

Pb 薄膜内での塑性変形観察には、Pb 薄膜を Si 基板から剥離せずに極低温で透過電子顕微鏡を用いて、その場観察で行なった⁽³⁾。粒径が大きな Pb 結晶粒には、ほんの少しの歪が Si 基板から加えられるだけで、転位がどんどん導入される事が観察された(図 2)。しかも室温と液体ヘリウムの繰り返しサイクルで、結晶粒が回転し、粒界に大きな変形(ヒロック)が生じた⁽⁴⁾。しかし、200 nm 以下の粒径の微細な結晶粒には転位が導入されず、塑性変形による歪緩和が無く、表面変形は微小である。

X線回折、TEM 観察、SEM 分析で冷却時に観測された薄膜内での転位挙動からヒントを得て、新しい薄膜の強化機構モデル(Strain Energy Criterion Model)が提唱できた⁽²⁾。歪が付加された膜が弾性的に変形するか? 塑性的に変形す

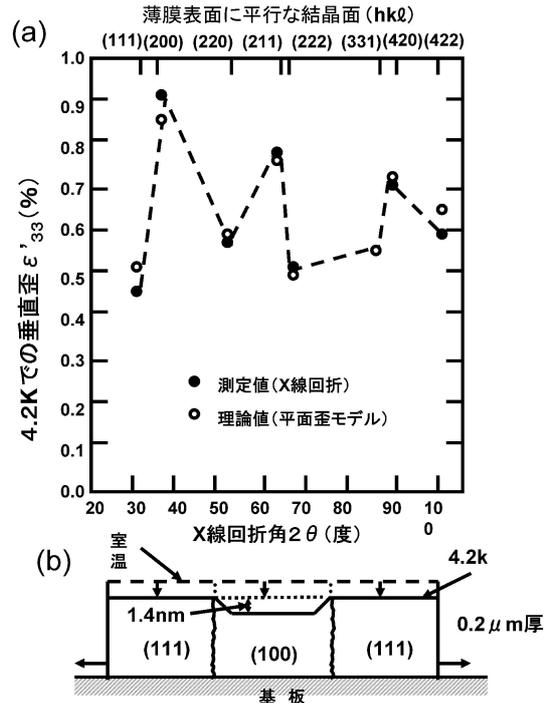


図 1 200 nm 厚さの Pb 薄膜を液体ヘリウム温度に冷却時に導入された垂直弾性歪(a)と Pb 膜の断面形状(b)。

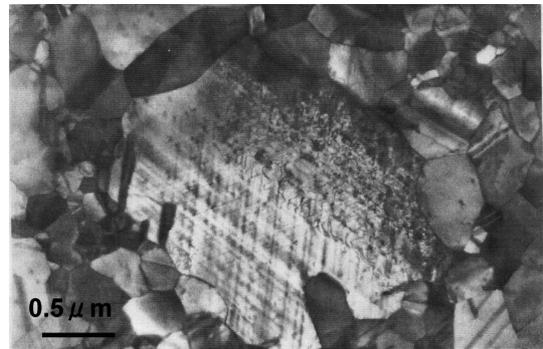


図 2 液体窒素温度での Pb 薄膜の透過電子顕微鏡像。

るか? は、薄膜に導入された歪エネルギーの大小により決定され、薄膜の厚さ、結晶粒径、基板・表面膜の硬さなどに依存する事が明らかになった。このモデルは実測と良く一致し、それまで説明出来なかった薄膜の高強度が解明出来、今でも幅広くこのモデルが用いられている。

Pb 薄膜材料の低温での変形機構が解明出来た事により、200 nm 以下の結晶粒を有する Pb 合金薄膜を形成すれば薄膜表面の変形は最小限に抑制出来る事が実証できた。このような微細結晶粒の Pb 合金電極は、従来から用いられていた Pb-In-Au 膜を液体窒素温度で蒸着する事により作製でき、デバイスの(室温と液体ヘリウム間の)繰り返し熱サイクル寿命も4000倍増加した⁽⁵⁾。高信頼ジョセフソン素子の開発は、材料の基礎に立ち戻った事で成功し、その結果、ジョセフソンプロジェクトの2年間後の消滅は逃れられた。

(3) 第三走者への襪は渡せず

プロジェクト延長後も Pb 合金薄膜材の表面の変形を完全に無くす努力を続けた。塑性変形は微細結晶粒の薄膜を作成する事により、ほぼ皆無に出来た。しかし、液体ヘリウム冷却時に導入される熱歪を100%弾性的に緩和させても、多結晶の Pb 合金膜の表面の変形は、弾性率異方性のため、図1の下図に示す如く、わずかな表面の変形(1.4 nm)が生じる⁽²⁾。室温と液体ヘリウムの繰り返し熱サイクルにより、この僅かな表面変形は5 nmの酸化膜を破壊し、ジョセフソン素子は、いずれは短絡する事を突き止めた。コンピューターの長時間信頼性の保証は不可能であり、このプロジェクトは終止符を打たねばならなかった。残念ながら第三走者への襪は渡せなかったが、材料屋の使命は、新材料の開発と同時に、デバイスの限界を見極めることが重要である事を学ばして頂いたプロジェクトでもあった。

4. 化合物半導体デバイスでの材料開発

(1) コンタクト駆伝の歴史

1980年代、携帯電話等の通信機器に用いられている高周波トランジスタを GaAs 化合物半導体で作製しようとするプロジェクトが展開し始め、ジョセフソンプロジェクト終了後、このプロジェクトに参画した。

GaAs 化合物半導体の電子易動度は Si 半導体に比べ速いが、金属配線から電気が GaAs 半導体内部に容易に流れず、GaAs トランジスタも遅々として実現しなかった。何故、金属から半導体に電流が流れにくいのか？ 理由は、金属と半導体接触界面には(後で図4に示す)エネルギー障壁(一般的にショットキー障壁と呼ばれている)が存在し、金属から電子が半導体内部に流れる場合、この障壁を電子(または正孔)が容易に乗り越えられないためである。化合物半導体プロジェクトでの使命は「3年以内に従来より一桁、電気を流れ易くさせるオーミック・コンタクト材料の開発をせよ」である。材料屋にとってオーミック・コンタクト材は、馴染みない言葉かもしれない。簡単に言えば、金属配線と化合物半導体の界面に200~400 nm厚さの薄膜材を付着させて電流を流れ易くする材料のことである。IBM から要請された特性を持つコンタクト材の開発には、まず、金属から半導体への電気輸送機構を解明せねばならない。

(2) 第一走者からの襪

GaAs デバイス用のコンタクト材は、1970年代に“ガンダイオード”で有名な J. ガンが Ni-Ge-Au 合金膜を真空蒸着で GaAs 半導体に蒸着させ形成できる事を見出した。このコンタクト材は、高温焼鈍により金属と半導体を反応させて、金属と半導体の接触界面での(接触)抵抗を低下させ、外部金属から GaAs 半導体に電気を良く流す役割を果たす。しかし、トランジスタを集積するには実装プロセスが必要であり400°Cに加熱される。その際、図3(a)に示すように、表

面形状が粗くなるだけでなく、接触抵抗が高くなり、電気は、金属から半導体内部に流れなくなる。Ni-Ge-Au コンタクト材を改良するため、多くの研究者が挑戦したが成功せず、当時(1983年)の IBM ではコンタクト材の改良は、ほぼ諦めた状態であった。

(3) 第二区間コース攻略法

新しいコンタクト材開発の不成功の原因は、コンタクト材開発の材料設計指針が不在であった為である。コンタクト材を理解すればする程、コンタクト材開発の困難さを知る。材料研究の基本である微細構造解析に立脚して「高性能のコンタクト材の開発の設計指針の構築」を主目標として開発に挑んだ。

まず既存の Ni-Ge-Au コンタクト材が、何故、熱安定性に乏しいか？ の原因究明を行った。Ni-Ge-Au-コンタクト材と GaAs 半導体の接触界面の微細構造を X 線回折法、SIMS および高分解透過電子顕微鏡を用いて解析し、界面構造と電気特性との関係を結びつける研究を二年間程続けた。図3(b)に400°C焼鈍後の Ni-Ge-Au コンタクト材と GaAs 基

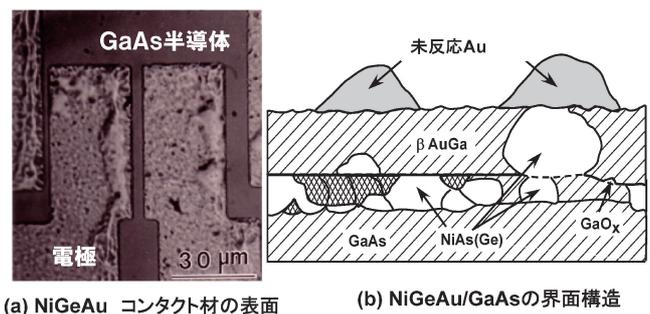


図3 400°C焼鈍後の Ni-Ge-Au コンタクト材の表面 (a)と GaAs 半導体との断面構造図 (b).

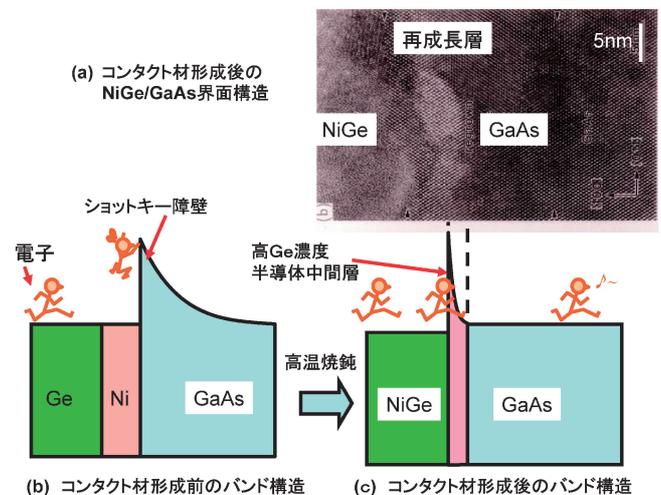


図4 Ni-Ge コンタクト材の焼鈍後の NiGe/GaAs 半導体界面の透過電子顕微鏡像 (a)およびコンタクト材形成前 (b)と形成後 (c)の(伝導帯近傍)のバンド構造。

板の断面構造図を示す。界面構造は非常に複雑であるが、熱的に不安定な構造、および金属と半導体の接触抵抗の低い(界面に電気の流れ易い)構造、および、高い(流れ難い)構造が存在する事を突き止めた⁽⁶⁾。高接触抵抗と熱不安定の原因は、低融点(360°C)の β -AuGa相が半導体界面に形成されるためである。また、接触抵抗は、Ni-As(Ge)相がGaAs表面に接触する面積が多ければ多い程、低下する事が判明した。理由は、Ni-As(Ge)相からGaAs表面にGeが拡散し、GaAs半導体表面にキャリア密度が増加するためである。この高濃度キャリア層の形成は、二元系Ni-Geコンタクト材で高分解能透過電子顕微鏡を用いて京都大学のスタッフが実証した⁽⁷⁾。コンタクト材を600°C焼鈍後に形成される再成長GaAs層(図4(a)に示す)にはGeの濃度が非常に高い事を見つけた。

コンタクト形成前と形成後の伝導帯近傍のエネルギーバンド構造を図4(b)(c)に示す。コンタクト材を半導体に蒸着した直後は、図4(b)に示すように高いショットキー障壁が形成され、この障壁を電子が越えられないために、金属配線から化合物半導体に電流が流れない。半導体表面に付着させたコンタクト材は、高温焼鈍により、半導体表面にキャリア密度を増加させ、障壁の厚さを薄くする為に、電子をトンネリングさせ、電気は流れ易くなる(図4(c))。このキャリア密度の高い半導体層を半導体中間層と命名した。

この半導体中間層が金属と半導体界面の接触抵抗を制御するならば、図4(b)に示すショットキー障壁の高さを低下させる役割を果たすコンタクト材も存在するはずである。このモデルを思いついたのは、InGaAs半導体は低いショットキー障壁を形成する事からである⁽⁶⁾。実際、Ni, In, W膜を順次に蒸着し、高温でアニールする事により、図5(a)に示すInGaAs層がGaAs表面に形成し、電流は流れ易くなった。界面のバンド構造は図5(b)と考えられる。ショットキー障壁の高さは正確には測定出来ないので、InGaAs層がGaAs表面を被覆する割合が異なる様々なコンタクト材を形成し、接触抵抗と被覆率を関連付けた⁽⁶⁾。図6に示す様に被覆率の増加と共に抵抗が低下したことから、図5(b)のバンド構造は正しいと思われる。Ni-In-Wコンタクト材は、900°C焼鈍後も図5(c)に示すように平滑な表面であり、最も耐熱性の高い低抵抗Ni-In-Wコンタクト材を開発する事に成功した。このコンタクト材を用いて高温でも安定なGaAsトランジスターが実現した⁽⁸⁾。

コンタクト材開発での材料学的成果は、接触抵抗の低下には、母体の半導体表面に新しい高濃度キャリア層または低障壁半導体層の形成が不可欠とする「半導体中間層形成モデル」がコンタクト材の開発指針として確立した事である。

(4) 第三走者への襍

化合物半導体は、元素の組み合わせで、Si半導体が持ち合わせていない色々な特性を発揮し、高速トランジスタのみならず、発光素子、受光素子、放射線検知器、パワーデバイス等、多種多様なデバイスの実現の可能性を秘める。しか

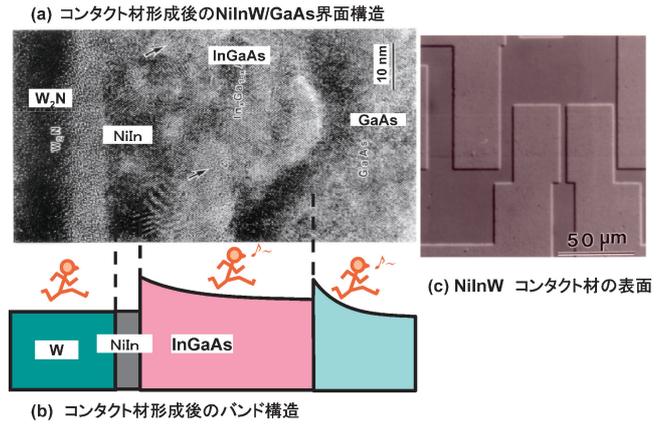


図5 Ni-In-Wコンタクト材の焼鈍後のNiIn/GaAs半導体界面の透過電子顕微鏡像(a)、コンタクト形成後の(伝導帯近傍)のバンド構造(b)、およびコンタクト表面(c)。

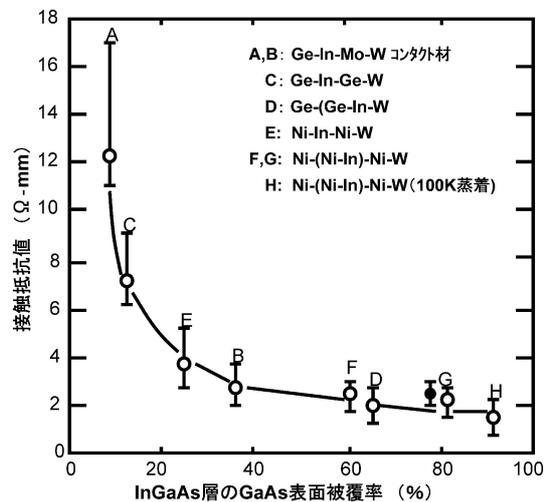


図6 In基コンタクト材のInGaAs層のGaAs表面被覆率と接触抵抗値。

し、これらデバイスの実現には、材料学的な課題が多い。特に、格子欠陥のない高品質の化合物半導体基板の成長法、キャリア密度の制御法、および低抵抗オーミック・コンタクト材料の作製法などの確立が共通課題である。実用化の見通しの立っていない化合物半導体デバイスのすべての要素技術を一企業で開発するには負担が大きい。

1990年にIBMから京都大学に戻り、産学連携を主体とした研究を進める事にした。産学連携を成功させる為には企業と大学のお互いの役割を明確にする事が重要である。半導体基板成長およびキャリア密度の制御は企業に任せ、大学では企業から提供された高品質の基板上にコンタクト材形成を主目的とした。IBM時代に構築した半導体中間層形成モデルを開発指針として、種々の化合物半導体に適したオーミック・コンタクト材を開発する事に徹した。コンタクト材開発に特化した研究室は世界に類がなく、多くの企業からの共同研究の申し込みがあった。多くの化合物半導体用のコンタク

ト材を開発したのは、第三走者であるスタッフ、学生である。

学問的には半導体中間層モデルがどれくらいの広範囲に適用出来るかが楽しみであり、毎日の結果に一喜一憂であった。各デバイスに求められるコンタクト材の要求値(接触抵抗値、表面平滑性、耐熱性等)および、開発に必要な期間も企業から明示された。真に、産と学の密接な連携の始まりである。

多くのスタッフ、学生の協力のお陰で様々なコンタクト材が開発された。同時に、バルク材では見られない金属薄膜材と半導体界面での特異な拡散現象も観察され⁽⁷⁾、材料科学的にも興味ある結果が得られた。これらのすべての科学および工学的な成果、および、開発されたコンタクト材の一部は解説⁽⁹⁾に纏めた。当研究室で半導体中間層形成モデルに基づき開発したコンタクト材料が、実用デバイスに用いられているものがあるが、まだまだ究明せねばならない課題がある。特に、金属・半導体界面の電気輸送機構を材料学的に完全に制御するには多元系の状態図、非平衡の界面反応機構、歪(応力)の影響、格子欠陥の制御法を系統的に研究し、より綿密な界面構造と電気特性の関連付けが必要である。

5. Si 半導体デバイス用の Cu 配線材料の開発

(1) 配線駆伝の歴史

コンピューター等に用いられる ULSI デバイスは、長年、Si 半導体を用いられ、コンピューター素子には優れた材料である。Si 半導体は加工性に優れ、演算速度は、デバイスサイズを縮小する事により、1965年から2000年までは向上してきた。しかし、デバイスも“超”微細になると金属配線と半導体が接触する面積が小さくなり、コンタクト抵抗が増大し、演算速度も遅くなる。超低抵抗のコンタクト材料の開発も必要だが、Si 半導体のコンタクト材料の開発は完成度が高く、大学が貢献できる研究レベルは超えた様に思える。Si 半導体デバイスで大学が貢献出来る研究は、コンタクト材開発により、むしろ低抵抗の金属配線材の開発である。

(2) 第一走者からの糧

高集積 Si デバイスに用いられているトランジスターのゲート幅は、1980年代は 1 μm 程度であったが、今やナノオーダーである。勿論、配線に用いられている金属線幅も同時に微細化され、トランジスター間の信号は、細く、長い配線を伝播せねばならない。演算速度は信号が配線を伝播する時間(遅延時間と呼ばれる)で決定される時代になった。Si 半導体デバイスがさらに微細化すると、配線の断面積もさらに微小化し、配線長さも極端に増長し、配線を電気が流れる際の電気抵抗は異常に増大する。それに比例して信号遅延も大きくなり、微細化によるコンピューター性能の向上の神話が崩壊する。

従って、配線材料としては可能な限り比抵抗率の低い金属材料を用いなければならない。超長距離の配線駆伝では、第一走者が、1960年代より1990年代まで30年間に及んで研究

対象としていた Al 合金配線材料を、第二走者に (Al 材料に比べ比抵抗率が 40% 低い) Cu 配線材料に置き換えたのは 1997 年である。Cu 配線を Si 半導体デバイスに使用すると新聞発表で Cu の地金の値段が急激に上昇した位の衝撃である。

(3) 第二区間コースの攻略法

しかし、Cu 配線材料は電気特性には優れているが、材料学的に問題が山積されている。企業での最も大きな課題は (Al 合金開発歴史で経験した事のない) 電気メッキでの配線製膜法の確立である。大学では未知の Cu 細線の物性制御である。

Cu 配線材料も 100 nm 以下の線幅になると電気抵抗は急激に増加する。これは電子が Cu 配線を移動する際に表面、界面、結晶粒界、不純物による散乱が増大するためである。低抵抗 Cu 配線材料の開発で材料学的に制御できるのは、Cu 配線内の微細構造だけであり、如何に不純物や結晶粒界を消滅させるかが研究の課題となる。研究目標は、結晶粒界での電子散乱を最小限にするため、準単結晶(巨大結晶)膜の作製である。しかし、Cu 膜にはポイドが多く存在し、ポイドによる電子散乱を最小限にするため、結晶粒内に存在するポイドの消滅が不可欠である。ポイド形成の主な要因は Cu 膜に存在する酸素である事をスタッフ、学生が突き止め、酸素の含有量を低減し、ポイドフリー Cu 配線材作製に成功した⁽¹⁰⁾。

主題である Cu 結晶粒の粗大化は、Cu 膜に歪を加えると結晶粒は容易に増大する事を見出し、粗大化に成功した(図 7)⁽¹¹⁾。膜に歪が導入される事により、膜内の歪エネルギーが増大する。このエネルギーを緩和させるために結晶粒内に転位の導入が必要だが、転位の両端は結晶粒界にピンニングされ、小さな結晶粒には転位が容易に導入されない。転位を導入させ歪エネルギーを緩和させる為には結晶粒は増大させねばならず、結果的に歪により結晶粒成長を促進することを発見した。前節で説明した Pb 薄膜強化機構の解明の際に提唱した「Strain Energy Criterion Model」が薄膜の結晶粒成長

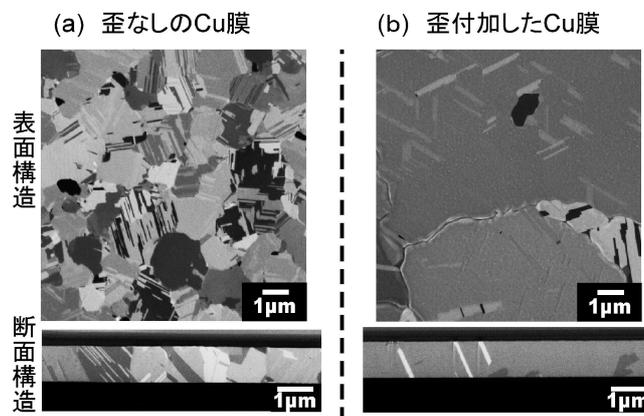


図7 歪なしの Cu 薄膜の結晶粒(a)と歪付加した Cu 膜の巨大結晶粒(b)。

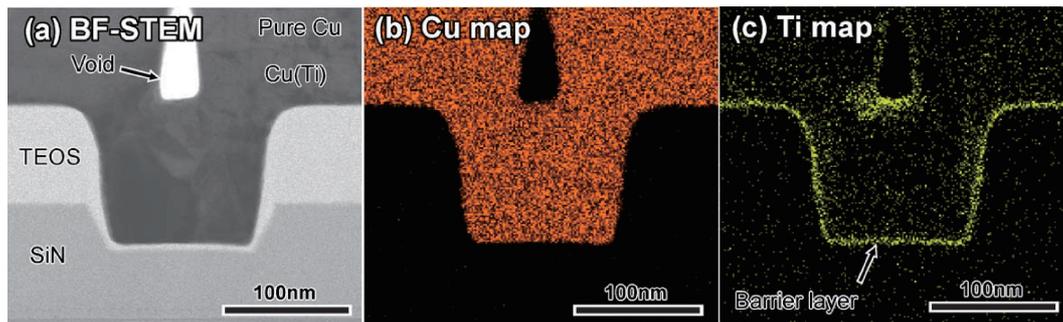


図8 高温・高圧法により形成されたCu(Ti)/Cu配線における自己形成バリア層の断面図：(a)STEM像，(b)CuのEDS元素マップ，(c)Tiの元素マップ。

機構にも当てはまる⁽¹²⁾。従来のモデルとは全く異なった薄膜の結晶粒成長モデルを提唱でき、このモデルでコース攻略に成功した。

結晶粒成長機構が解明できれば、後は如何に歪を薄膜内に均一に加えるかの技術の確立である。単に硬いSi基板とCu膜の密着性を強化し、加熱により導入された熱歪により、単結晶に近い巨大結晶粒Cu薄膜材形成に成功し、最も低い抵抗値のCu膜材の作製に成功した。

Cu配線のもう一つの物性的課題は、Cu配線と直接接触しているSi基板、SiO₂(または有機)誘電膜とが容易に反応する事である。そのため、Si基板とCu配線間に、ナノスケールの薄い拡散防止(バリア)膜が必要である。このバリア膜の開発についても、スタッフ、学生が、TaN, TiN, WN等の窒化膜を次々開発した。特に、配線の作製過程を単純化するため、相分離を利用したバリア膜の形成に努力し、Ti等の元素をCuに添加し、Cu-Ti合金を作成して、この合金膜を蒸着させ、高温焼鈍により自然に誘電膜表面に窒化物を形成させる方法を開発した(図8)⁽¹³⁾。人間が手を切った時、自然にかさぶたが傷口を覆う様な表皮現象で窒化膜が形成できたのである。

6. 最 後 に

大学入学から数え、ほぼ半世紀の間、主に材料の研究・開発に取り組んできたが、わが国の材料研究を取り巻く環境は、この半世紀で大きく様変わりした。以前は、材料資源のみならず、エネルギー、食糧など、どんどん海外から日本に輸入され、我が国での材料研究でも、元素の選択の制約は小さかった。しかし、今日の我が国の材料研究には、以前に比べ、深刻な制約がある。今世紀当初から人間が生存するために最低限必要なエネルギー、食糧ですら輸入は困難になりつつある。特に、材料開発に不可欠な希少元素は、地球上で偏在し、輸入は極めて困難になりつつある。

次世代の材料開発を担う若い研究者には「機能性の高い元素が使用出来ない」との足かせが詰められた制約下での材料開発が強いられる。この様な制約下での材料開発は、材料の本質を一から見つめ直さねばならず、基礎研究がさらに重

視される。且つ、半世紀後の地球の姿は想像できない位、地球の環境は日々刻々、大きく変化している。常に地球の変化に順応した研究を進めるためには、幅広い分野の知識を身に付けなければならない。材料で観察されるすべての現象は、自然の摂理に従った現象であり、自然の神秘に興味を持って、材料研究に邁進して頂きたいことを最後に念願する。

文 献

- (1) C. J. Kircher and M. Murakami: *Science*, **208**(1980), 944-950.
- (2) M. Murakami: *CRC Critical Reviews in Solid State and Material Sciences*, **11**(1984), 317-354.
- (3) M. Murakami, T. S. Kuan and I. A. Blech: *Treatise on Materials Science and Technology*, Ed. H. Herman, **24**(1982), 162-210.
- (4) M. Murakami, J. Angilello, H.-C. W. Huang, A. Segmuller and C. J. Kircher: *Thin Solid Films*, **60**(1979), 1-9.
- (5) M. Murakami: *Diffusion Phenomena in Thin Films and Microelectronic Materials*, Ed. D. Gupta and P. S. Ho, Noyes Publication, New Jersey (1988), 499-543.
- (6) M. Murakami: *Materials Science Reports*, **5**(1990), 273-317.
- (7) T. Oku, H. Wakimoto, A. Otsuki and M. Murakami: *J. Appl. Phys.*, **75**(1994), 2522-2529.
- (8) M. Murakami, W. H. Price, J. H. Greiner and J. D. Feder: *J. Appl. Phys.*, **65**(1989), 3546-3551.
- (9) M. Murakami and Y. Koide: *Cri. Rev. Sol. Stat. Mater. Sci.*, **23**(1998), 1-60.
- (10) S. Konishi, M. Moriyama and M. Murakami: *Mater. Trans.*, **43**(2002), 1624-1628.
- (11) M. Moriyama, K. Matsunaga, T. Morita, S. Tsukimoto and M. Murakami: *Mater. Trans.*, **45**(2004), 3033-3038.
- (12) M. Murakami, M. Moriyama, S. Tsukimoto and K. Ito: *Mater. Trans.*, **46**(2005), 1737-1740.
- (13) S. Tsukimoto, T. Kabe, K. Ito and M. Murakami: *J. Elect. Mater.*, **36**(2007), 258-265.



村上正紀

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
 1971年3月 京都大学大学院工学研究科博士課程単位修得退学
 1971年6月 カリフォルニア大学研究員
 1975年2月 米国IBMワトソン中央研究所 研究員
 1990年8月 京都大学工学部 教授
 2007年4月 京都大学名誉教授
 2007年4月 学校法人立命館 副総長 現在に至る
 専門分野: 機能薄膜材料
 ◎持続可能な社会の構築に貢献できる研究の組織化に取り組んでいる。

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★