

## 学位論文題名

高集積回路における高信頼性配線用アルミニウム合金  
材料の開発

## 学位論文内容の要旨

集積回路素子の高集積化にともないAl配線の微細化技術はますます重要になってきている。一方、Al合金配線の配線幅が $2\mu\text{m}$ 以下になると、エレクトロマイグレーションとストレスマイグレーションによる断線という極めて重大な問題が発生した。これらの故障はAl合金膜の膜質と、製造工程中にかかる熱履歴、あるいは集積回路製造プロセスそのものに強く依存して発生する。Al配線のエレクトロマイグレーションとストレスマイグレーションに対する対策は、Al-Si合金にCuを添加したAl-Si-Cu合金によって解決した。しかし、この材料は腐食しやすく、微細加工が難しいという欠点を持っている。集積回路の微細化をさらに進める上での根本的な対策は、配線用Al合金の耐マイグレーション性を高め、耐食性を改善することである。このような背景から、耐マイグレーション性が高く、微細加工性と耐食性に優れた信頼性の高い新Al合金配線材料の開発を本研究の目的とした。本論文は8章により構成されており、その概要を以下に示す。

第1章では、現状のAl配線技術の問題点について詳細に説明し開発目標と、本論文の構成について述べた。

第2章では、エレクトロマイグレーション現象、およびストレスマイグレーション現象とクリープ現象とが共にAl原子の粒界拡散に起因することに着目し、エレクトロマイグレーション寿命とバルク材のクリープ破断寿命との間に相関関係が認められることを明らかにした。これによってバルク材の高温引張試験によって耐エレクトロマイグレーション性を向上させる可能性の高い合金添加元素を選び出し、次にバルク材のクリープ破断試験で合金系を数種類に絞り込んだ。クリープ破断試験で選んだ数種類の合金系について、集積回路のAl配線として重要な電気伝導度、耐食性の評価を行ない、最終的に全ての項目で優れた特性を示したAl-Si-Pd合金系を選択した。

第3章では、テストデバイスを作製し、耐エレクトロマイグレーション性、耐ストレスマイグレーション性の比較評価をAl-Si-Pd配線と、従来のAl-Si配線とAl-Si-Cu配線との間で行なった。まず、Pdの最適添加量の検討を行ない、耐エレクトロマイグレーション性は0.3wt%Pdで優れた改善効果みられることを明らかにした。ついで、エレクトロマイグレーション寿命を累積不良率の観点から比較評価し、Al-1wt%Si-0.3wt%Pd配線の平均断線時間は現在使われているAl-1wt%Si-0.5wt%Cu配線の2倍以上であることを明らかにした。ストレスマイグレーション寿命は、集積回路製造工程における熱履歴で

Al配線にポイドが形成されるとその影響を受けて短くなること、ポイドの量が多い程ストレスマイグレーション寿命が短くなる傾向がみられること、Al-Si-Pd配線ではAl-Si-Cu配線に比べて大きなポイドが形成されにくいことなどを明らかにした。さらに、高温硬さ試験、および組織観察の結果から、Al配線を450°Cでアニールした後で冷却する際に、Al-Si-Pd合金の方がAl-Si-Cu合金よりも析出温度が高く、配線中に微細な析出物が数多く分布することを明らかにした。

第4章では、プラスチックパッケージによってモールドした集積回路素子のAl配線の腐食について検討した。Al-SiとAl-Si-Pd配線の耐湿信頼性を比較するテストデバイスを作製し、加速寿命試験によりAl配線腐食の累積不良率を調べ、Al-Si-Pd配線の腐食開始時間はAl-Si配線に比べて約2倍に長くなることを明らかにした。この結果から、Al-Si-Pd配線は従来のAl-Si配線に比べてプラスチックパッケージ内の集積回路素子においても優れた耐湿信頼性が保証されると結論した。

第5章では、集積回路作製プロセスにおけるAl-Si、Al-Si-Cu、Al-Si-Pd配線材料の耐ヒロック性、コンタクト特性、微細加工特性について検討した。アニールの際のヒロック形成については、実際の配線パターンを用いて、アニール後のヒロック密度を測定することにより評価した。Al-Si、Al-Si-Cu、Al-Si-Pdの順にヒロックの大きさが小さくなり、密度も減少することを示した。

Si基板とAl配線とのコンタクト特性の検討では、Al合金材料によるコンタクト抵抗を評価した。また、アニールを行なった時のコンタクト部分におけるSiのエピタキシャル成長を評価し、Al-Si-PdとではSiのエピタキシャル成長が起こりにくく、コンタクトの耐熱性が高いことを明らかにした。

微細加工性の検討では、ドライエッチングした時の横方向サイドエッチングによるAl配線の寸法シフト量を評価した。Cuを添加するとAl-Si配線のサイドエッチング量が増えるのに対し、Pd添加では却ってサイドエッチング量が減り、集積回路を微細化するためにはAl-Si-CuよりもAl-Si-Pdの方が作製プロセスに適合していると結論した。

第6章では、Al-Si-PdとAl-Si-Cu配線を実際の製品デバイス(1.3 $\mu$ mプロセス、2MbitマスクROM)に適用し、実装比較と信頼性評価試験を行なった。その結果、Al-Si-Pd配線を用いたデバイスの方が高い製品歩留と信頼性が得られることを実証した。

第7章では、配線幅1 $\mu$ m以下のAl配線技術で用いられているAl合金とW-Ti、TiNとの積層配線について、主に耐エレクトロマイグレーション性について検討した。まず、積層配線におけるAl合金へのPd添加、およびCu添加が、積層配線のエレクトロマイグレーション特性におよぼす影響について検討した。その結果、積層配線の耐エレクトロマイグレーション信頼性はAl-Si、Al-Si-Cu、Al-Si-Pdの順番に高くなることを確認した。積層配線の耐エレクトロマイグレーション信頼性は、Al合金材料の耐エレクトロマイグレーション性によって決まることを明らかにした。また、16M-DRAM相当の集積回路においては、従来のAl-Si-Cu配線材料と高融点導体との組み合わせによる信頼性の限界追求が課題となっている。本研究ではAl-Si-Cu/TiN積層配線の耐エレクトロマイグレーション信頼性に対するAl合金中のSi添加の影響について検討し、Si添加をなくしたAl-Cu/TiN積層配線の方がAl-Si-Cu/TiN積層配線に比べて耐エレクトロマイグレーション性が高くなることを確認した。

第8章は結言として本研究の全体の課題に対する結果と成果についてまとめた。

以上のように、本論文は半導体集積回路における、Al-Si-Pd合金配線材料の開発と集積回路素子製造プロセスへの適用、および今後の積層配線技術の展開について述べたものである。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 鈴 木 朝 夫

副 査 教 授 石 井 邦 宜

副 査 教 授 大 貫 惣 明

副 査 教 授 武 笠 幸 一

学 位 論 文 題 名

## 高集積回路における高信頼性配線用アルミニウム合金 材料の開発

集積回路素子の高集積化が進み、Al配線の配線幅を $2\mu\text{m}$ 以下に微細化するにつれて電流密度が増大し、エレクトロマイグレーションやストレスマイグレーションによる断線や短絡が顕在化してくる。この問題は従来から使われてきたAl-Si合金にCuを添加してAl合金の高温強度を上げることで解決しているが、このCu添加合金の難点は微細加工性と耐食性に劣ることである。これらの問題を解決することが、さらに回路素子の集積度を上げるためのキーテクノロジーとなっている。本論文は、電気伝導度を大きく阻害することなく耐マイグレーション性を高くし、耐湿信頼性や配線加工プロセスにおける微細加工性にも優れたより信頼性の高い新Al合金配線材料の開発と実用化について述べたものであり、8章より成っている。

第2章では、エレクトロマイグレーション現象とストレスマイグレーション現象は共にクリープ現象と同じようにAl原子の粒界拡散に起因することに注目し、エレクトロマイグレーション寿命とバルク材のクリープ破断寿命との間に相関関係が認められることを見出している。これを利用して、バルク材による高温引張試験とクリープ破断試験によって可能性の高い合金を見付け出す迅速・簡便法を開発している。次いで、この迅速法により二十数種に及ぶ添加元素の効果を調べ、これらの中から高温強度を特に高める数種の候補合金系を選び出している。さらに、その他の要求される諸特性である電気伝導度、耐食性などを検討して、最終的にPdを添加した合金が有力であることを導いている。

第3章では、テストデバイスを実際に製作し、耐エレクトロマイグレーション性と耐ストレスマイグレーション性について、Pd濃度を変えた数種のAl-Si-Pd合金配線と従来のAl-Si合金配線やAl-Si-Cu合金配線と比較して、最適なPdの添加量の検討を行っている。その結果、0.3wt.%のPd添加で優れた改善効果が発現し、累積不良率の観点から見た平均断線時間は従

来材の2倍以上であることを示している。次いで、高温硬さ試験、組織観察などから、ストレスマイグレーション寿命は集積回路製造工程における熱履歴によるボイド形成傾向に左右されること、Pd添加合金の高温強度は析出温度の高い微細析出物により支えられていること、そのことによりアニール工程でのボイド形成が抑制されることなどを明らかにしている。さらに、前章からの成果を総合して、最適化組成はAl-1wt.%Si-0.3wt.%Pd合金であることを明らかにしている。

第4章では、さらに進んで実装デバイスを想定したプラスチックパッケージによってモールドした集積回路素子の配線について、耐湿信頼性テストを前章で開発した新候補材料と従来の材料を用いて比較・検討している。この試験でもここで新しく開発したCu-Si-Pd配線材料の性能が極めて優れたものであることを明らかにしている。

第5章では、集積回路作製プロセス時に問題となる耐ヒロック性、コンタクト特性、微細加工性などについて検討している。まず、ボイド形成による断線と並んで問題となる配線間の短絡の原因がヒロック形成であることを明らかにし、アニール工程で発生するヒロック密度がPd添加合金では極めて少ないことを示している。Si基盤とAl配線間のコンタクト特性の評価では、Pd添加合金ではSiのエピタキシャル成長が起こり難く、コンタクト部分の耐熱性が高いことを明らかにしている。次いで、ドライエッチングの際に発生する横方向のサイドエッチングによるAl配線の寸法変動はPd添加合金で最も小さいことを示している。この合金はこのような微細加工性だけではなく、耐ヒロック性、およびコンタクト特性の観点からも優れており、この新材料が集積回路を微細化するために必要な各種の要件の全てを満たしていることを実証している。

第6章では、この新開発材料を製品デバイス(1.3 $\mu$ mプロセス, 2 MbitマスクROM)に適用して、総合的な実証試験を行っている。これによって、Pd添加合金配線材料による製品デバイスは極めて高い製品歩留と優れた製品信頼性を持っていることを明らかにしている。

第7章では、集積度をさらに高めて配線幅を1 $\mu$ m以下にするようなニーズに対応するための配線材料の開発を行っている。このような微細配線において耐エレクトロマイグレーション性を高めるためには、Al合金と高融点導体とを組合わせた積層配線以外にないことを論じ、Al合金とW-Ti合金、あるいは化合物TiNとの積層配線を採り上げて、各種のAl配線材料を用いた積層配線の信頼性の評価を行っている。ここでも、開発したPd添加合金の配線材料としての優位性は変わらないことを示している。

第8章では、本研究で得られた結果と成果を総括すると共に、今後のこの種の研究開発の指針についても述べている。

これを要するに、著者は、高集積半導体集積回路における配線材料を製造プロセス適合性・生産性と製品の信頼性向上の観点から総合的に検討し、高集積半導体回路に適合したAl合金配線材料の開発に成功したものであり、金属材料学の進歩だけでなく、高集積度デバイス製造技術の進展に貢献するところ極めて大である。

よって、著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。