博士（工学）　武 山 真 弓

学位論文題名

シリコン集積回路におけるオーム性接触界面の高信頼化の研究

学位論文内容の要旨

本研究は、シリコン集積回路において高い信頼性を有する高安定なオーム性接触界面を得るために、Al及びCu配線コンタクト系における拡散バリヤのあり方をそれぞれの材料固有の特質を考慮して検討を行ったものである。Al配線系ではAlとバリヤとの界面反応の抑制を界面固相反応の観点から検討し、またCu配線系では反応よりはむしろ粒界拡散の要因を低減できるバリヤ材料のあり方を検討し、それらをとりまとめて、コンタクト系を設計する上でのバリヤ材料の有効なあり方について基礎的な検討を行ったものであり、7章より構成されている。

第1章は序論であり、Si-LSIがICからULSIへと変遷を遂げ、微細化・高集積化の進展を遂げてきた背景とそれに伴う配線材料の移り変わりについて述べている。更に、集積度の向上に伴って拡散バリヤを含めた金属/半導体コンタクト界面に顕在化して来た問題点及び現状についてその概要を述べ、それらを踏まえた上で、本研究の目的について言及している。

第2章では、本研究に関連した従来の研究について現在までの進捗を記述している。まず、Al配線系のバリヤ材料についての主な研究を概観し、これらを比較検討することで、どのようなバリヤ材料を用いてもAl/バリヤ界面で生じる反応を本質的には抑制できないことを指摘している。一方、Cu配線系のバリヤ材料は、材料を変えた多くの研究の集積の中から、界面反応よりはむしろCuの速い拡散の防止が安定なコンタクトを得る上での重要な要因となっていることの理解が得られた段階であり、高安定なコンタクトを実現でき、かつより低抵抗なバリヤ材料が切望されていることを指摘している。

第3章では、本研究で用いたAl 及びCu配線コンタクト系の作製方法、熱処理方法及びオージェ電子分光、X線光電子分光、X線回折、透過型電子顕微鏡、2次イオン質量分析などを用いた、コンタクト系の構造変化と界面での拡散・反応の挙動を評価する方法を述べ、本論文中で行った実験方法をまとめている。

第4章では、現在まで配線材料の主流となっているAl配線における従来の報告を統括し、安定なAl配線コンタクトの構成のあり方として、コンタクト系の界面に擬似的な化学平衡状態を実現するという筆者の新たな提案を述べ、それに基づいた拡散バリヤ材料のあり方を検討している。すなわち、Alとバリヤとの界面で生起する反応生成物に着目し、その反応生成物である金属間化

合物をむしろ積極的にAlとバリヤとの界面に介在させることによって、Al/金属間化合物及び金属間化合物/バリヤの両界面を既に反応の終了した熱力学的に安定な界面とすることが可能となるものと考え、介在させる金属間化合物の材料選択を、物理的化学的側面から詳細に検討し、その要件を提示した。この要件を満足する材料としてW及びTaを選定し、それらを用いてコンタクトを構成した結果、Alの融点直下の600℃まで安定なコンタクト系が得られることが示され、このことから、先の提案がAl配線コンタクト系の高信頼化にとって有用であることを実験的に明らかとしている。

第5章では、Cu配線コンタクトの崩壊要因の一つであるバリヤの結晶粒界を介して起こるCuの拡散に着目し、そのような拡散を抑制できるようなバリヤをその構造の面から検討している。まず、(110)面に高配向成長を示すW膜のバリヤ特性を配向性の劣る比較的微結晶なWバリヤと比較検討することで、粒界の要因を低減できる高配向成長バリヤの有用性を明らかとしている。この系は、これまでWシリサイド形成以前にCuの粒界拡散により崩壊することが報告されていたが、バリヤを高配向膜とすることで、W/Si界面でのシリサイド反応をも均一な反応とすることができ、このことより、Wバリヤがシリサイド反応によって消費され尽くす温度まで（690℃）Cuの拡散を効果的に抑制できることを実証している。次に、2つの遷移金属からなるCu-Zrアモルファス合金膜のバリヤ特性を検討している。Siとの界面にZrN膜を付加的なバリヤとして用いることにより、Cu-Zrアモルファス合金の結晶化温度以上(600℃)まで安定なコンタクトが得られることを示し、アモルファスバリヤはその結晶化温度より低温で劣化するという従来の報告に対し、コンタクト構成上の考慮により、本来のバリヤ特性が得られることを明らかとしている。このことから、バリヤ材料をその構造の面から検討することにより、バリヤに用いた材料が本来有しているバリヤ特性を引き出すことが可能であることを指摘している。

第6章では、CuのバリヤとしてCuと化合物を形成しないW及びTaを安定な窒化物とすることで、更に高温まで安定なコンタクト系の実現を検討している。これらの窒化物は、その粒界を窒素が占有することによりCuの拡散を抑制するばかりでなく、バリヤ自身が化合物として熱的に安定で、高温熱処理に伴う構造変化を起こさないという優れた特質を有することから、750～800℃の熱処理に耐え得るコンタクトを実現できることが実証された。これら窒化物膜は、その抵抗率も金属バリヤと同程度であることから、高安定でかつより低抵抗なCu配線コンタクトの実現にとって有用であることを実験的に明らかとしている。

第7章は結論であり、本論文を総括し、本研究で明らかとされた結果をまとめている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	長谷川	英機
副査	教授	池田	正幸
副査	教授	雨宮	好仁
副査	教授	福井	孝志
副査	助教授	橋詰	保

学位論文題名

シリコン集積回路におけるオーム性接触界面の高信頼化の研究

近年の著しい技術革新を支えてきたのは、シリコン大規模集積回路（ＬＳＩ）であり、来たるべきマルチメデイア情報化社会の実現にとって、微細化技術を極限まで進めるシリコンＬＳＩの超集積化が不可欠な要素である。このような超高密度集積回路においては、要素デバイスの特性もさることながら、配線の性能と信頼性が、集積回路の性能と信頼性を決定する重要な要因となる可能性が高くなる。例えばすでに、ＬＳＩのスケールダウンに伴って、金属／シリコン界面におけるわずかな固相反応現象が、デバイスの動作不良をもたらす要因となることが知られている。したがって、金属／シリコン界面の特性を良く理解し、本質的な界面制御に基づき、高信頼度の界面を実現することが、超高密度集積回路の信頼化の鍵となる。

本論文は、このような背景のもとで、シリコンＬＳＩにおいて高い信頼性を有するオーム性接触界面を得るために、AlおよびCu配線コンタクト系を界面固相反応の観点から検討し、界面反応を抑制するための拡散バリヤ材料が満たすべき新しい構造や条件、および実際に試作された配線金属／バリヤ金属／シリコン界面の構造や化学的組成の評価に関する一連の研究結果をまとめたものである。本論文は７章から構成されている。以下に各章の概要を示す。

第１章では、研究の背景、集積度の向上に伴って金属/半導体コンタクト界面に顕在化して来た問題点及び本論文の目的について述べている。

第２章では、配線系の安定化に関連する従来の研究結果を比較し、シリコンＬＳＩ配線系の高信頼化を実現する上で未解決な点をまとめている。まず、Al配線系のバリヤ材料についての主な研究を整理し、従来の界面構造では、どのようなバリヤ材料を用いてもAl/バリヤ金属界面で生じる反応を本質的には抑制できていないことを指摘している。一方、Al配線系よりも高安定な系として期待されているCu配線系においては、界面反応よりはむしろCuの速い拡散の防止が安定なコンタクトを得る上で、重要な要因であることを示し、より低抵抗でかつ安定なCu／バリヤ構造の実現が、この系の実用化に不可欠であることを指摘している。

第３章では、本研究で用いたAl及びCu配線コンタクト試料の作製方法と熱処理方法を説明し、また、オージェ電子分光（AES）、Ｘ線光電子分光（XPS）、Ｘ線回折（XD）、透過型電子顕微鏡（TEM）、２次イオン質量分析（SIMS）等による、コンタクト系の構造変化と界面での拡散・反応の挙動を評価する方法を述べ、実験方法をまとめている。

第４章では、安定なAl配線コンタクト系の実現に対して、コンタクト界面に擬似的な化学平衡状態を実現するという新しい界面構造を提案し、それに基づいた拡散バリヤ材料の検討結果を述べている。特

に、Alとバリヤ材料界面で生起する反応生成物に着目し、その反応生成物である金属間化合物の特性を評価した結果、その金属間化合物を積極的にAlとバリヤとの界面に介在させることによって、熱力学的に安定なAl／金属間化合物／バリヤ材料／シリコン界面構造の実現が可能であることを示している。詳細な解析・評価より、介在させる金属間化合物材料の物性条件を明らかにし、具体的材料としてW及びTaを選定し、それらを用いてコンタクトを構成した結果、Alの融点直下の600℃まで安定なコンタクト構造が保存されることを示した。これらの結果から、新しい界面構造がAl配線コンタクト系の高信頼化に有用であることを実験的に明らかにしている。

第５章では、Cu配線コンタクト系におけるCu原子の拡散機構について検討を加え、この拡散現象を抑制するバリヤ材料を提案している。まず、バリヤ材料としてW膜を検討した。このW/Cu構造は、これまでWシリサイド形成以前に、Wの粒界を介したCu原子の拡散により構造崩壊が生じると報告されてきたが、(110)面に高配向成長させたW膜を用いることで、Cu原子の拡散を低減できることを明らかにした。バリヤを高配向膜とすることで、W/Si界面でのシリサイド反応をも均一化することが可能となり、高温領域（690℃）まで、Cuの拡散を効果的に抑制できることを実証した。次に、２つの遷移金属からなるCu-Zrアモルファス合金膜のバリヤ特性を検討した。シリコンとの界面にZrN膜を付加的なバリヤとして用いることにより、Cu-Zrアモルファス合金の結晶化温度以上（600℃）まで安定なコンタクト構造が得られることを示し、アモルファスバリヤ材料はその結晶化温度より低温で劣化するという従来の報告を覆す、材料本来のバリヤ特性が得られる可能性を指摘した。

第６章では、バリヤ材料としてW及びTa窒化物を利用することにより、更に高温まで安定なCuコンタクト系が実現できることを示している。これらの窒化物は、その粒界を窒素が占有することによりCuの拡散を抑制するばかりでなく、バリヤ材料自身が化合物として熱的に安定で、高温熱処理に伴う構造変化を起こさないという優れた特質を有することから、750～800℃の熱処理に耐え得るコンタクトを実現できることが実証された。また、窒化物そのものの抵抗率も金属バリヤと同程度であることから、高安定でかつ低抵抗なCu配線コンタクトの実現にとって有用なバリヤ材料であることを実験的に明らかにした。

第７章では、本研究の成果を総括している。

これを要するに、著者は、金属／シリコンオーム性接触界面の高信頼化を目的として、AlおよびCu配線コンタクト系における拡散バリヤ材料および配線金属／バリヤ金属／シリコン界面について、詳細な特性評価とそれに基づく界面制御を行い、600℃以上の高温領域まで安定な新しい配線構造を提案し、シリコンＬＳＩ配線の高信頼化に関して有益な方向性を見いだしたものであり、半導体工学の進歩に寄与するところ大である。

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。