

氏名	猪川 洋 いの かわ ひろし
学位の種類	工学博士
学位記番号	工博第902号
学位授与の日付	昭和60年7月23日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
研究科・専攻	工学研究科電子工学専攻
学位論文題目	SEMICONDUCTOR METALLIZATION BY ION BEAMS (イオンビームによる半導体メタライゼーション)
論文調査委員	(主査) 教授 高木俊宜 教授 山田 公 教授 佐々木昭夫

論文内容の要旨

本論文は、数 eV から数百 eV の運動エネルギーを有する金属単原子イオン及び運動エネルギーが数 keV の金属クラスティオン（約 1,000 個の蒸気化金属粒子がお互いに緩く結合した塊状原子集団であるため、個々の原子は平均数 eV～十数 eV のエネルギーである。）を用いて半導体メタライゼーション（配線及びコンタクト形成）を行った結果をまとめたもので、5章からなっている。

第1章では、現在の半導体メタライゼーションの課題を概説しその観点からイオンビームを用いる目的を明らかにしている。

第2章では、いくつかの特性エネルギーを用いてイオンと固体表面との相互作用における基礎現象を考察している。特に格子欠陥が生じるしきい値エネルギー付近が重要であることを述べている。すなわち、しきい値エネルギーを大きく越えない範囲では適度な量の欠陥が膜成長の核形成位置として働く。しきい値より低いエネルギーであっても吸着不純物や蒸着物自身のなかで弱く結合しているもののスパッタリングが生じる。イオンの加速が行われない場合でも、イオン化すること自体により化学反応が促進されること等が指摘される。これらのイオンと固体表面の相互作用に関する考察より、3、4章での実験条件が定まり、イオンビームによる半導体メタライゼーションの特徴が明らかになる。それらの特徴としてはプロセスの低温化、準安定相の形成、膜の内部応力の減少、膜の付着強度の増加、モルフォロジの変化、膜密度の増加、結晶性、純度、耐酸化性の向上等がある。

第3章では、従来法では不可能であった構造の半導体メタライゼーションを行う目的で、質量分離した単原子イオンビームを用いる方法を論じている。最初に、数 eV の低エネルギーから数百 keV の高エネルギーのイオンを照射する実験装置の設計、動作特性について考察した。低エネルギー Pd イオンを Si 上に付着させる実験では厚さが数 nm にもかかわらずバルクと同程度の抵抗率を有する極薄連続膜を形成した。絶縁物の帯電現象を利用して導体上への選択付着も実現した。Si への高ドーズ Pd イオン注入の実験では表面 Si の結晶性を保った状態で、シート抵抗が数 Ω cm の連続埋込導電層を形成できた。

そして低抵抗の埋込導電層を得る条件を理論的、実験的に決定した。

第4章では、従来法での問題点を解決する観点でクラスタイオンビーム (ICB) による Al メタライゼーションを論じている。ICB 蒸着ではスパッタによる基板表面の清浄化、核形成位置の増加、吸着原子の表面拡散の促進等を通じてクラスタの運動エネルギーや電荷が膜形成の基本的な過程に影響を与える。そしてこれらの効果が低基板温度でのエピタキシャル膜成長を実現する。純粋な Al 材料を用いたにもかかわらずエピタキシャル Al/Si 構造は550℃30分間の熱処理に対して組織学的にも、結晶学的にも安定で Al メタライゼーションにおける種々の問題、即ち浅い接合のつきぬけ、ヒロックの発生、エレクトロマイグレーション断線、ステップカバレッジ不良等が大幅に低減することが実験的に示された。その結果、薄膜の諸性質は材料の化学組成を変えなくとも、イオンビームの使用により膜構造を変えることにより改善できることが明らかになった。

第5章では、本論文の結果がまとめられ、半導体メタライゼーションにおける単原子イオンビームと ICB の比較が行われている。前者は、主として荷電粒子としての性質を利用して、埋込導電層形成、選択付着、極薄膜形成など従来法では不可能な新しいメタライゼーションの実現に適している。後者は、膜構造や界面状態の改善、エピタキシャル成長の実現など従来の半導体メタライゼーションにおける諸問題を実用的な見地より改善するのに適していると結論された。

論文審査の結果の要旨

昨今の半導体デバイスの微細化、多機能化に伴い、従来からのメタライゼーション (相互配線とコンタクト形成) 法における種々の問題の解決が必要となると同時に、三次元デバイス、超高速デバイス等に対応した全く新しいメタライゼーション構造の実現も求められている。本論文は、それらの課題に対して金属単原子イオンビーム及び金属クラスタイオンビーム (ICB) によるメタライゼーションを試みたもので、得られた主な成果は下記のとおりである。

1. 膜形成に利用しうる運動エネルギーとして数 eV から数百 eV の単原子イオンビームを形成する方法の検討を行い、高エネルギーで引き出し、収束し、質量分離したのち減速する方法が適当であることが結論された。高速中性粒子や2次電子の基板への流入防止を考慮した減速電極系を設計、製作し、約 $10 \mu\text{A}$ の金属イオンを 10 eV 程度まで損失なく減速することができた。

2. 上記の研究によって得られた低エネルギー Pd イオンを Si 上に照射し、Pd 薄膜を形成した。イオンの収集効率や膜・基板界面の状態より見た最適イオンエネルギーは $50\text{--}100 \text{ eV}$ であった。その結果厚さは数 nm であるにもかかわらず、バルク材料と同程度の抵抗率を有する極薄連続膜の形成が実現した。また絶縁物の帯電を利用して、導電体上に選択的に Pd を付着させうることを見出した。

3. 数十 keV から数百 keV の高エネルギー金属イオンを Si 中に高ドーズ注入し、埋込導電層形成を試みた結果、イオン注入にはスパッタリング現象が伴うため、実現しうる Si 中の金属濃度には限界があり、低抵抗の埋込導電層形成には適当なエネルギーとドーズ量を選ぶ必要があることが判明した。例えば、Pd イオン 320 keV で注入した場合には、試料のシート抵抗はドーズ量 $9 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 付近より急激に低下し、ドーズ量を更に増すことにより $6 \Omega/\square$ まで低下した。表面 Si の結晶性は $600\text{--}800^\circ\text{C}$ の熱処

理により回復し、表面上に Si 等の薄膜を更にエピタキシャル成長する可能性が出てきた。

4. 従来法による メタライゼーションの問題を解決する観点で ICB 法による Al メタライゼーションを試み、常温で Al を Si 単結晶上にエピタキシャル成長させることに成功した。エピタキシャル Al/Si 構造は組織学的にも、結晶学的にも、電気的にも極めて安定で、共晶温度直下の 550℃までの熱処理によっても接合のつきぬけやヒロック形成、コンタクトの不安定性等を生じなかった。エレクトロマイグレーション寿命は、従来法の膜より20倍以上長いことが確認された。Si 基板上以外にも GaAs (100) 面、サファイア (0001) 面、あるいは Si (111) 面基板上的エピタキシャル CaF_2 膜上でも、Al エピタキシャル膜が ICB 法により成長可能であることが見出され、上述のエピタキシャル Al 膜の特性が Si 以外の半導体、絶縁体上でも得られる見通しが立った。

以上を要するに本論文は、イオンビームを用いた物理的な手法により、従来の熱的、化学的手法による半導体メタライゼーションの諸問題を克服し、また、埋込導電層等の全く新しいメタライゼーション構造を実現しうることを示したものであって、学術上實際上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として価値あるものと認める。

また、昭和60年5月27日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。