

内97-40

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

金属/Si界面のイオン照射欠陥に関する研究

申請者

小山 正人

Masato Koyama

電子・情報通信学専攻

ナノエレクトロニクス研究

1997年12月

シリコンデバイスの高機能化や高性能化を実現するために、今までシリコン大規模集積回路の微細化技術は着実な進歩を遂げてきた。現在の素子寸法で我々が直面している技術的な微細化限界に対し、X線リソグラフィ、高誘電体材料の導入等の新しい技術の開発が行われており、シリコンデバイスの微細化は今後も進行するものと思われる。微細化の進行に伴い、デバイスの基本的性能を決定するコンタクト抵抗、接合リーク電流等に対する要求は厳しくなり、従来技術の改善を行う必要が生ずる。本論文の主題である「金属/Si界面」と「イオン照射欠陥」は、上記のようなデバイス性能に直接関わる重要な問題である。これらの問題はシリコンデバイス製造技術において古い問題でありながら、いまだに不明な部分が残されており、シリコンデバイスの微細化とともにこれら不明な点が顕在化し、新たな問題を引き起こす可能性がある。

このような背景のもと、本研究は、以下に示すような2重の目的を持って行われた。1つは、金属/Si界面の電気的特性とイオン注入技術の優れた照射個数制御性を利用して、1個のイオンがSi中に形成する欠陥を評価する新しい方法を提案し、その実現性と有用性を示すことである。もう1つの目的は、金属/Si界面のショットキー障壁高さ形成機構におけるイオン照射誘起欠陥の作用を解明することである。以上のような2重の目的で研究を進めることにより、Si中のイオン照射欠陥に関する理解と、金属/Si界面における欠陥の作用に対する一般的理解を深めることを目指す。

本論文の第2章、第3章は金属/Si界面を利用したイオン照射欠陥の評価に関するものである。第2章では、早稲田大学で開発されたシングルイオンマイクロプローブを利用して、1個のHeイオンがSi中に形成する欠陥数の計測と、欠陥とキャリアの相互作用の解明を行った。Heイオン照射により劣化したショットキーダイオードの順方向電流電圧特性から再結合電流成分を抽出し、1個のイオン照射によりSi中に形成される微量な欠陥数を計測した。照射するイオンの数をごく少数にし、1個のイオン注入による欠陥形成が互いに独立に起きるような実験条件を選ぶことにより、イオン照射量と再結合中心数の間には線形関係が生じることを確認した。線形関係の傾きは、1個のイオンがショットキーダイオードの空乏層中につくる平均的な再結合中心の数であ

り、常温のSi基板に2 MeVのHeイオンがつくる再結合中心の数は11.4個であった。我々の計測手法によって得られる欠陥数は、欠陥の捕獲断面積の値に起因する定量的なあいまいさを有する。しかし、このあいまいさを考慮しても、2 MeVのHeイオンによる欠陥形成過程はイオンとSiの原子衝突のみでは説明できず、電子阻止能による欠陥形成過程が関与していることが、実験結果とシミュレーションの比較から判明した。また、シングルイオンマイクロプローブを利用して取得した2次元電荷収集像の解析により、Si中のキャリア拡散長を計測した。キャリア拡散長はイオン照射量の増加にともない低下する。今回の実験では $10^{14}/\text{cm}^3$ オーダーの再結合中心を含む系で拡散長が低下した。拡散長の低下はキャリア寿命の低下によることが判明し、欠陥の再結合中心としての作用が重要であることが分かった。

第3章では、1個のイオンがSi中に形成する欠陥が局在した領域、いわば欠陥クラスターの空間的な広がり、金属/Si界面の電気的特性を利用して計測した。本手法は電気的計測を原理としているために、従来の欠陥クラスターの評価法よりも高い感度で欠陥を検出できる。イオン照射された金属/Siのショットキーダイオードの寄生抵抗が、イオン照射量に対して臨界的に変化することを利用して、1個のイオンによる高抵抗化領域の広がりを計測する。1個のイオンが作る欠陥クラスターは、アモルファスの核の周りに高濃度の点欠陥領域が分布する構造的特徴を有していると考えられ、我々が電気的測定手法に基づき計測した高抵抗化領域の広がり、この点欠陥領域の空間的な広がりに一致する。75 keVのArイオンが常温のSi結晶中に作る欠陥クラスターの平均的な直径は21 nmであった。1個のイオンが作る欠陥クラスターの広がりに関して、点欠陥の広がりも含めてnmの精度で計測を行った実験結果は本研究が初めてである。本手法により、イオンの加速エネルギーに対する欠陥クラスターの空間的広がりの変化を計測した。欠陥クラスターはエネルギーに依存して変化する。計測結果とシミュレーションとの比較から、欠陥クラスターの空間的な広がり、衝突カスケードが関与していることを推測した。本手法は1個のイオンが誘起する欠陥クラスターの広がりをごく簡便に計測でき、さらに欠陥形成過程に関する議論をする上での重要な知見を与える可能性を持っていることが示された。

第4章では、金属/Si界面のショットキー障壁高さ決定機構における、Si中のイオン照射誘起欠陥の作用を解明することを目的とした。本研究では、シリコンデバイス製造プロセスにおいて重要な技術である反応性イオンエッチングがSi表面に誘起する欠陥に焦点を絞った。従来の研究では見過ごされていた、欠陥をふくむ界面の電流輸送機構を、電流-電圧特性の温度依存性を利用して詳細に調査し、この界面では熱電子放出過程が支配的な電流輸送過程であることを明らかにした。これにより、古くから知られているイオン照射誘起欠陥による金属/Si界面の電気的特性の変化が、界面のフェルミレベルの移動によるショットキー障壁の変化であることを、直接的証拠に基づき明らかにした。さらに、従来詳しく知られていなかった界面近傍の欠陥の電気的性質を調査し、界面のフェルミレベルの移動はドナーライクな欠陥準位による界面電荷分布の変化が原因であることを明らかにした。

本論文の第2章および第3章では、イオン照射による金属/Si界面の電気的特性の変化を注意深く解析することにより、1個のイオンがSi中に形成する欠陥に関して、欠陥の数とその空間的広がり の平均値という、きわめて重要な情報がごく簡便に得られることを提示した。我々の評価手法はいずれも電気的計測法に基づくものなので、高い感度で、しかもシリコンデバイスの動作上興味のある電気的活性な欠陥のみの情報が得られるという利点を有する。我々の評価法においては、良く定義された界面に対する意図的な改変が鍵となっており、イオン照射という極めて制御性のよい改変手段を用いることを前提として、なおかつ欠陥の界面での役割を良く理解していることが必要である。今回の実験の場合には、欠陥は再結合中心、補償中心、散乱中心等さまざまな作用を示したが、実験条件や解析手法の工夫によってこれらの要因を分離して評価することができた。一方第4章は、第2章、第3章とは立場を入れ替えて、界面での役割が良く理解されていない欠陥に関して、その作用の解明を目的とした研究である。本研究では、金属/Si界面の電流-電圧特性の温度依存性と、表面近傍の欠陥のHall測定による評価とを組み合わせ、従来あいまいにされてきたイオン誘起欠陥によるショットキー障壁高さ変化の機構を明快に説明することができた。