

氏名	三宅 潔 み やけ きよし
学位の種類	工学博士
学位記番号	論工博第 1452 号
学位授与の日付	昭和 57 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 2 項該当
学位論文題目	STUDIES ON LOW-ENERGY, MASS-SEPARATED ION BEAM DEPOSITION AND REACTIVE ION BEAM ETCHING (質量分離された低エネルギーイオンビームによる薄膜形成およびエッチング機構に関する研究)

(主査)
論文調査委員 教授 高木俊宜 教授 川端 昭 教授 板谷良平

論文内容の要旨

シリコンを主材料とした半導体集積回路素子の開発は、IC の時代から LSI の実用化段階に入り、これらは大型計算機の演算・記憶素子ばかりでなく多種の電子装置の高度化に役立っている。さらに電子装置の高機能化のために、高密度に集積化され高速動作可能な超高集積回路素子 (VLSI) の開発が検討されている。この目的のために、従来の熱平衡条件下の化学反応ではなく、プラズマ・イオンを用いた新しい物理化学反応が注目されてきた。しかしながら、この反応は熱力学的に非平衡状態下において実現される複雑なもので、その基礎的反應過程に関する知見は皆無に等しく、新技術の開発方法は試行錯誤的要素が強かった。本論文は、これらのプラズマ・イオンを用いた薄膜形式、ならびにエッチング法で起っている現象を、著者が考案した質量分離された低エネルギーイオンビームを用いた実験法により、基礎的に解明した研究結果をまとめたもので、5章からなっている。

第1章は序論であり、将来の超高集積半導体回路素子開発において、プラズマ・イオンを用いた新らしい低温ドライプロセスが必要な背景を述べ、現在の研究状況を歴史的に概説した。次に、この低温ドライプロセスの基本的考え方を解き明かす一つの手段として、質量分離された低エネルギーイオンビームにより、制御された条件下で薄膜形成・エッチング過程を研究する重要性を述べている。

第2章では、第3章と第4章で展開される研究に供するための質量分離方式低エネルギーイオンビームデポジション (IBD) 装置の開発とその特性について述べている。まず、IBD 装置の設計概念を薄膜成長の立場より定量的に検討した。超高真空中 (10^{-8} Torr) で大電流 (100~300 μ A) の金属イオンビームと反応性イオンビームを発生させるために、フリーマン型イオン源の動作解析を行い、大電流イオンビームの輸送にあたって電子による空間電荷の中和法、直交電磁界により効率よくイオンビームのみを減速させる方法を考案し、IBD 装置を完成させた。その結果、 Ge^+ 、 Si^+ 、 F^+ 、 CF_n^+ ($n=1, 2, 3$) 等のイオンビームを

0~3000 eV の運動エネルギー領域において 100~300 μA 得ることを可能とした。

第3章では、 Ge^+ 、 Si^+ 金属イオンによる薄膜形成過程が、詳細に述べられている。まず、イオンビームデポジション (IBD) の研究の流れを歴史的に説明したのち、IBD において表面で起りうる素過程を述べた。次に、Al 基板の上に Si^+ イオンを 50~500 eV のエネルギーで照射した時に、Si 原子と Al 原子とが混合作用を受け、その結果できる遷移領域の厚みがイオンのエネルギーに応じ、100~1300 Å の範囲で変化することを示し、低温で形成した IBD 膜がきわめて付着力の大きなことに対する定量的概観を与えた。また、IBD 法による低温での単結晶エピタキシャル成長の例として、Si(100) 基板上への Ge^+ と Si^+ イオンの結晶成長を述べた。前者は、ヘテロエピタキシャルの代表例で、Si の基板温度が 300°C において、すでに IBD 膜が単結晶エピタキシャル成長することが、電子線回折・ラザフォード後方散乱法により調べられた。後者は、ホモエピタキシャル成長の代表例で、熱平衡条件下で結晶成長を行う高温気相化学反応 (CVD) 法では 1100°C 以上の基板温度が必要なのに対し、IBD 法では 740°C という低温でエピタキシャル成長することが見出された。以上のように IBD 法では、低温においても、原子のオーダーで界面と、薄膜の結晶性が制御できることを明らかにしている。

第4章では、 F^+ 、 CF_n^+ ($n=1, 2, 3$) 等の反応性イオンビームにより Si が物理的・化学的にエッチングされる過程を明らかにした。まず、プラズマエッチング研究の現状を概説し、その中で本研究のもつ意味を述べた。次に、Si が反応性イオンにより化学的にエッチングされる確率のみを求めるために開発した四重極マスフィルター (質量分析器) を用いた生成物ガスモニター法と、Si が物理・化学的にエッチングされる全体のエッチング確率を求めるための水晶振動子による高感度重量変化測定法を詳述した。これら二つの新しい測定法により次のことが明らかにされている。

イオンのエネルギーが 1KeV では、物理的スパッタリングによるエッチング作用が化学反応によるエッチング作用を越え、イオン1ヶあたりのエッチング確率が 10^{-1} のオーダーであることが確認された。低エネルギー領域 (10~1000 eV) においては、化学的なエッチングの作用が顕著となるが、 CF_n^+ ($n=1, 2, 3$) イオンの場合には、イオンの中に含まれるC原子がエッチングを抑制して、C-F系のポリマー膜を堆積させることがわかった。このように、入射するイオンの種類と、その運動エネルギーによってエッチング機構が大きく異なること、ならびにエッチングの確率が定量的に測定できたことは、極めて注目すべき研究成果といえる。複雑なドライプロセス (エッチング) 現象の解明に、本研究は十分寄与しうることが明らかにされた。

第5章は、本研究の結論であり、質量分離された低エネルギーイオンビームを用いることによる低温エピタキシャル薄膜形成、ならびに反応性イオンエッチングにおける機構解明を中心に、本研究により明らかになった成果について述べている。

論文審査の結果の要旨

薄膜形成、結晶成長、エッチングなどの表面処理技術として真空中または低ガス中でのプラズマやイオンを用いる、いわゆるイオン工学的手法が注目されはじめた。これは、イオン化して運動エネルギーやイオンの混合量を制御し、さらにはイオン化の過程で生ずるラジカルな状態での反応作用を制御するなどし

て膜形成や加工時の自由度を増加させる。それによって、蒸着膜の結晶性や諸物性を三次元的に制御し、あるいは加工精度や加工能力を向上させ、高度の機能をもった薄膜形デバイス製作への要求に応えようとするものである。しかしながら、その動作機構は複雑でイオンのもつ役割についての基礎的知見には不明確な事象が多く、この新しい技術の開発方法には試行錯誤的要素が強い。本論文は、著者の開発した質量分離形低エネルギーイオンビーム装置を用いて基礎的に解明した研究結果をまとめたもので得られた成果は次の通りである。

1. 大電流イオンビームを蒸着やエッチングに適した低エネルギーで輸送することは一般に容易ではないが、著者はフリーマン形イオン源（電子衝撃形、スロットによる半径方向引き出し方式）を用い、大電流金属イオンの発生と引き出しのための動作解析、大電流イオンビーム輸送時における空間電荷中和法、直交電磁界によるイオンビームの減速と加速電子の除去方法などに新しい方法を考察し、殆んど OeV に近い低速から 3KeV までの低運動エネルギー領域において、 Ge^+ 、 Si^+ 、 F^+ 、 CFn^+ ($n=1, 2, 3$) 等のイオンビームを 100~300 μA 得ることを可能とした。

2. 得られた Ge^+ 、 Si^+ を用いて薄膜蒸着過程を詳細に検討した。基板と蒸着物質層との間に生ずる中間層の厚みが入射イオンのエネルギーに応じて 100~1300 \AA の範囲で変化することから付着力について論じた。さらにイオンの効果によって単結晶エピタキシャル成長に必要な基板温度が大巾に逓減することを実証し、電子線回折・ラザフォード後方散乱法により膜質を検討した。その結果、イオンビームデポジションにより比較的低い基板温度 (300~750°C) において原子のオーダーで中間層の厚みと膜の結晶性が制御できることを明らかにした。

3. F^+ 、 CFn^+ ($n=1, 2, 3$) 等の反応性イオンビームにより Si が物理的・化学的にエッチングされる過程を明らかにした。すなわち、イオンのエネルギーが 1KeV 以上では物理的スパッタリングによるエッチングが主役となり、それ以下の低エネルギーでは化学的エッチング作用が顕著となること、また、 CFn^+ ($n=1, 2, 3$) イオンの場合にはイオンの中に含まれる C 原子がエッチングを抑制して、C-F 系ポリマー膜を堆積させることなど多くの知見を得た。またそれらを測定する特殊な 4 重極マスフィルターによるガスモニター法や水晶振動子による高感度重量変化測定法も考案し上述の研究を可能にした。

以上要するに、この論文は複雑なドライプロセス（蒸着とエッチング）現象の解明に多くの新しい知見を得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。よってこの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。