

氏名	の だ しゅう いち 野 田 周 一
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成17年9月14日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)機械知能工学専攻
学位論文題目	中性粒子ビームによるダメージフリー超高精度微細加工技術に関する研究
指導教員	東北大学教授 寒川 誠二
論文審査委員	主査 東北大学教授 寒川 誠二 東北大学教授 江刺 正喜 東北大学教授 羽根 一博 東北大学教授 小柳 光正

論文内容要旨

MOS-LSIの微細化、高集積化による性能向上は、留まることを知らず、当面はその歩調を緩めることではない様相である。しかし、微細化による動作限界が近付きつつある現在、MOS-FET素子の各要素では、限界を乗り越えるためのプロセス制御、新材料導入、さらには3次元構造化などの大幅な素子構造の変更が検討されている。このため、微細加工プロセスへの要求は厳しくなるばかりである。プラズマエッチングは、MOS-LSIの微細加工にとって欠くことのできない技術であるが「プラズマ」が抱える本質的な問題(荷電粒子、高エネルギーフォトン、高エネルギーイオンの照射によるダメージ等)が益々深刻になってくるため、新たな低損傷・超微細加工技術の検討は急務である。

中性粒子ビームエッチングは、プラズマエッチングが抱える問題の多くを解決できるため、理想に近い微細加工技術である。このため従来から検討がなされてきた。しかしながら、その微細加工性、エッチレート等のプロセス性能は、従来のプラズマエッチング装置に及ばず、また、従来のプラズマエッチング装置の改良やその他のプロセスの工夫による課題対処が可能であったため、中性粒子ビームエッチング装置の開発があまり進まなかったのも事実である。

以上の背景のもと本研究では、将来のMOS-LSI製造に適応可能なダメージフリー超高精度中性粒子ビームエッチング技術の開発を行い、これを用いた超微細MOS-LSIエッチングプロセスの構築と、これによるプロセスの低損傷性を明らかにした。本論文は、全6章から構成される。第1章ではMOS-LSIデバイスおよびそれを作り出すプラズマエッチング技術双方の発展の歴史と将来の課題を整理し、中性粒子ビームエッチングが必要となる背景を述べた。第2章ではその有効性が期待されつつも実用化に至らなかった従来の中性粒子ビーム装置の課題を明らかにした。第3章では当研究室で開発中の新しい動作原理に基づく中性粒子ビームエッチング装置を用い、ビーム引き出し方法とビーム特性との相関およびビームメカニズムを明らかにすることにより、従来装置の問題点を解決し実プロセスに適応可能なビーム制御方法を開発した結果を述べた。第4章ではMOS-LSIのゲート電極加工を目的に、様々なガス種、ビーム加速条件でのPoly-Siエッチング特性を明らかにし、寸法50nmのゲートエッチングプロセス

を構築した。また、このときのプロセスダメージを比較し従来のプラズマエッチングに比べチャージングダメージが格段に軽減されることを明らかにした。第5章では将来デバイスへの対応として、Fin-FETの縦型Siチャネルの形成への適用も検討し、従来のプラズマエッチングと比べ非常に非常に高い電子の実効移動度が得られることを明らかにした。第6章は結言である。以下はそれらの概要を述べる。

(1) 従来の中性粒子ビーム装置の課題 (第2章)

中性粒子ビーム源には様々な方式のものが検討されてきたが、MOS-LSIの量産に適応可能な大口径化を考慮するとプラズマを用いた方式のものが有望であり、今までにも数種類の装置が開発された。しかし、いずれの装置も量産に用いられるまでには至っていない。その理由は、通常の連続波(CW)プラズマで生成する正イオンを中性化するプラズマでは、

- ① ビームフラックスとビームエネルギーが独立に制御できずに、高いビームフラックスを得ようとするとビームエネルギーが～数keVと高くなってしまうこと。(空間電荷制限電流)
- ② 加速された正イオンの、気相でのガス原子・分子との衝突による電荷交換では中性化率が高められない(～60%)こと。(共鳴電荷交換)
- ③ 加速された正イオンが、反射板と衝突することによる電荷交換では中性化率はほぼ100%となるが、ビーム生成効率が低くなる(～10%)こと。

などの原理的な制約があり、プラズマエッチングの性能を超えられなかったためである。また、装置構造が非常に複雑であるという問題もあった。このため、中性粒子ビームの実現には、プラズマ生成およびビーム加速方式の革新的な改良が必要である。

(2) 新中性粒子ビーム源のビーム特性と制御性 (第3章)

本方式の中性粒子ビーム源では、従来より用いられてきたCW放電による正イオン-電子プラズマと異なり、パルス時間変調(TM)放電を用いて生成する正イオン-負イオンプラズマ中の負イオンを利用することにより高効率の中性粒子ビームを生成できるのが特徴である。

TMプラズマに対し負のdcバイアス電圧を印加して、負イオンを加速・中性化した場合、ビームの中性化率が90%以上と高くなると同時に、中性粒子ビームフラックスが増大することが明らかになった。このときの負イオン加速は、TMプラズマによって周期的に形成・消滅する負イオンシースによって行われるものと推測され、CW放電における正イオン加速と異なり、エネルギーが低く抑えられ、dcバイアス電圧制御では～10eV程度の低エネルギー制御が可能であることが明らかになった。

TMプラズマに対し負のdcバイアス電圧を印加しながら引き出し電極(アパーチャープレート)にrfバイアス電圧を印加して、イオンを加速・中性化した場合、90%程度の高い中性化率を維持しながら、バイアスrf電力の増加に従いビームフラックスが格段に増加することが明らかになった。また、このときのビームエネルギーは～100eV程度まで増加させることが可能であることが明らかになった。rfバイアスの場合正負両イオンが加速されると考えられるが、rfバイアス周波数(600kHz)は、TM放電周波数

(10kHz) に比べ十分に高い (すなわち TM 放電周期が rf バイアス周期に比べ十分に長い) ために、アパーチャプレート表面には負の dc バイアスによる負イオンシースが保存され、負イオンが優勢に加速されていると考えられる。

これらの結果から、本装置では、ビーム引き出し条件を選択することにより、高いフラックスの中性粒子ビームを幅広いエネルギー領域で制御することが可能となることが明らかとなった。

(3) ビーム性とエッチング特性の相関 (第4章)

ビーム特性とエッチング特性の間には、よい相関性が認められた。SF₆ TM プラズマを用いた中性粒子ビームでは、負の dc バイアス電圧の増加とともに SiO₂ のエッチレイトが増加した。また、Cl₂ TM プラズマを用いた中性粒子ビームでは、負イオン生成効率を最大にする条件で Si のエッチレイトが極大となった。このことから本方式の中性粒子ビーム源では、主に負イオンにより中性粒子ビームが発生していることが確認できた。

(4) プロセスガスと中性粒子ビーム種の関係 (第4章)

各種ガスを用いて TM 放電で生成されるイオン種は、正負のイオンでは組成が異なることが明らかとなった。ガス種として SF₆, F₂, Cl₂ の比較を行ったが、いずれの場合も正イオンは多くのフラグメントが生じるのに対し、負イオンでは、単純なイオン組成であった。SF₆ の場合は SF₅、F₂ の場合は F、Cl₂ の場合は Cl が主な負イオン組成であることを明らかにした。この結果、負イオンを利用する中性粒子ビームは、そのビーム組成が選択的であるため、プロセス制御性がより向上すると考えられる。

(5) 微細 Poly-Si ゲートエッチングプロセスの構築 (第4章)

現在半導体プロセスでよく用いられている、SF₆ と Cl₂ を用いて微細 Poly-Si パターンエッチング条件の最適化を行った。dc バイアス条件によるエッチングでは、SF₆ の場合、比較的高いエッチレイトが得られたが、大きなサイドエッチングを生じた。他方 Cl₂ では、良好な異方性加工が可能であったが、エッチレイトが非常に低いものであった。両者の混合ガスではそれらの中間の結果となった。基板に垂直入射する中性粒子ビームによるエッチングでは異方性加工が可能と考えられるが、SF₆ の場合には、プラズマ中で発生する高解離 F ラジカルの拡散が影響している。

rf バイアスによるエッチングでは中性粒子ビームのフラックスおよびエネルギーが増加するため、Poly-Si エッチレイト大きく増加した。Cl₂/SF₆ 混合ガス系では、ガスの混合比によって微小な寸法、形状制御が可能であった。

以上の結果から、高いエッチレイトの得られる Cl₂/SF₆ 混合ガスを用いた rf バイアス条件と、高い寸

法精度と対酸化膜選択比が得られる Cl_2 dc バイアス条件による 2 ステップエッチングによりゲート寸法 50 nm 以下の微細ゲートエッチングプロセスを構築した。なおこのとき、従来のプラズマエッチングでは、微細レジストの変形などの理由で困難であった単層レジストプロセスでの加工を可能としたことから、実用上の意義も大きい。

(6) チャージングダメージ評価 (第 4 章)

比較的損傷の現れやすい厚さ 5 nm の SiO_2 および、今後導入が検討されている 2 nm 厚の HfSiON をゲート絶縁膜とするアンテナ MOS キャパシタの電極エッチングを中性粒子ビームエッチングにより行い、酸化膜リーク電流を評価した。 SiO_2 膜による評価では、アンテナ面積の増大によってわずかにリーク電流の増大が認められ、微量の残留イオンの影響が現れた。但し、従来のプラズマエッチングに比べ、その値は一桁以上小さかった。

薄い HfSiON 膜の場合には、中性粒子ビームおよびプラズマエッチングサンプルのアンテナ面積依存性が小さかったが、アンテナ周辺長が著しく長いサンプルの場合、プラズマエッチングでは著しいリーク電流の増大が認められた。これに対し、中性粒子ビームでは、2 桁程低いリーク電流であった。

以上の結果より、中性粒子ビームでのチャージングダメージの低さを明らかにした。

(7) Fin-FET への適用 (第 5 章)

Fin-FET の Si-Fin の加工は MOS-FET の動作に直接影響するチャネル表面の加工であるため、きわめて低損傷のエッチングが要求される。また、チャネルのキャリア移動度を最大限に向上するためには、Si 結晶の面方位に依存しないエッチングが必要である。中性粒子ビームを Si-Fin のエッチングに適用した場合には、面方位に依存しない高精度加工が可能で、プラズマエッチングと比較して、良好なサブスレッショルド特性と高いオン電流が得られる Fin-FET の加工ができることを明らかにした。中性粒子ビームエッチングでは紫外線照射のない環境で低エネルギーの中性粒子によりエッチングが進行するために、原子レベルで平坦な Si チャネル表面の加工が実現できるからであると考えられる。中性粒子ビームエッチングでは、チャージングダメージが低いばかりでなく、物理的にも非常に低損傷なエッチングが可能であることを明らかにした。これらの結果は将来の極低損傷プロセスにおいて極めて有効であると考えられる。

以上の結果より、新しい動作原理に基づく中性粒子ビームエッチング装置では、将来デバイスまでを含めた量産に適応可能なダメージフリー、超高精度のエッチングプロセスが可能であることを明らかにした。実用上の課題として現在、大面積プラズマ源を用いたビーム源の大口径化を検討している。

論文審査結果の要旨

半導体デバイスの高集積化と高機能化を実現するために、配線パターン寸法の微細化が行われてきた。この微細化の発展は、半導体製造プロセス技術の進歩によって支えられてきた。特に、反応性プラズマを用いたエッチング技術の著しい向上により微細化が促進されてきたといっても過言ではない。しかしながら、50nm を切る超微細なデバイス製造プロセスにおいては、従来にもまして高精度な加工技術が必要不可欠となり、エッチング特性を左右する生成活性種とそのエネルギーの制御およびプラズマ照射損傷を引き起こす基板表面への蓄積電荷量やフォトン照射量の制御が大きな課題になっている。本論文では以上の問題を解決するために、プラズマからの荷電粒子やフォトンの照射を抑制し、運動エネルギーを持った中性粒子のみを引き出す中性粒子ビーム生成装置を提案するとともに、これを先端半導体デバイスに適用し、その有効性を実証したもので、全編6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景や目的を述べている。

第2章では、過去に開発された中性粒子ビーム源の生成原理やプロセス特性を議論している。中性粒子ビーム源には、ガス分子を加熱膨張させ並進エネルギーを持たせる方式とプラズマ中で発生した正イオンを加速中性化する方式の2種類に分類できる。プロセスに対応した運動エネルギーの制御や粒子フラックス、さらには、大口径化への対応という点で、プラズマを利用した方式がより実用的であることを述べている。しかしながら、プラズマ中の正イオンを電荷交換を用いて中性化する方式では、中性化率がせいぜい60%程度であり、ビームフラックスが十分高くできないこと、また、ビームエネルギーが100eV以上と高いことを指摘し、実用性は低いことを示している。

第3章では、従来の中性粒子ビーム源の問題点を解決し、実用的で超高精度な加工を実現できる中性粒子ビーム源を新たに提案している。本研究で提案した中性粒子ビーム源では、イオンを生成するプラズマとしてパルス時間変調プラズマを用い、そのプラズマ中で発生する負イオンを加速中性化することで高効率に低エネルギーの中性粒子ビームを生成できることを示している。具体的には、 Cl_2 プラズマおよび SF_6 プラズマを用いて95%以上の中性化率を有するCl原子およびF原子ビームを生成することに成功している。その時、ビームエネルギーは10eV~で可変できることを明らかにしている。これらは実用上極めて有益な成果である。

第4章では、本研究で提案した中性粒子ビーム源を用いて50nm世代のMOSトランジスタにおける多結晶シリコン・ゲート電極を加工した結果について述べている。Cl原子およびF原子の混合中性粒子ビームを用いることで、プラズマエッチングにおける加工速度と遜色のない加工速度が得られ、下地ゲート絶縁膜であるシリコン酸化膜に対しても大きな選択性が得られることを明らかにしている。さらに、下地ゲート絶縁膜であるシリコン酸化膜や HfSiON 膜に対する照射損傷に関して、プラズマエッチングと中性粒子ビームエッチングにおいて比較を行っている。その結果、プラズマエッチングプロセスに対してゲート絶縁膜のリーク電流が1桁~2桁低いことを初めて明らかにしている。この結果は本研究で提案した中性粒子ビーム源が実用的な加工特性を持ちながら、デバイスに与える損傷を大幅に低減できることを示しており、実用上極めて有益な成果である。

第5章では、30nm~20nm世代で用いられると考えられているダブルゲートMOSFET (Fin-FET) のチャンネル領域形成に中性粒子ビーム加工を適用した結果について検討している。Fin-FETではシリコン基板を加工し、チャンネルを形成するが、加工時にシリコン基板に与える損傷(欠陥)が電子の移動度を低下させる。しかし、チャンネル加工に中性粒子ビームを用いた場合には、プラズマエッチングを用いた場合に比べ損傷が減り、電子の移動度が約20%向上するという画期的な特性を示している。このことは、将来デバイスを開発する上においては、中性粒子ビームによる無損傷加工が必要不可欠であることを示しており、実用上極めて有益な成果である。

第6章は結論である。

以上、要するに本論文は、反応性プラズマにおける物理・化学現象を明らかにし、実際の半導体デバイス製造プロセスにおいて問題となる損傷の原因を明らかにするとともに、それらを解決する手段として負イオンを用いて中性粒子ビームを生成するという従来にはない手法を初めて提案し、その有効性を実際の半導体デバイス上で示したもので、その成果は、50nm以下の次世代半導体デバイス製造に適用可能であり、機械知能工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。