

氏 名	とよ だ のり あき 豊 田 紀 章
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 1823 号
学位授与の日付	平 成 11 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	工 学 研 究 科 電 子 物 性 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Nano-Processing with Gas Cluster Ion Beams (ガスクラスターイオンによるナノ構造形成プロセスの研究) (主査)
論 文 調 査 委 員	教 授 山 田 公 教 授 橘 邦 英 教 授 今 西 信 嗣

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、数千個の原子で構成された巨大粒子であるクラスターイオンの発生とプロセス応用に必要な装置の基本特性を明らかにすると共に、クラスターと固体との相互作用における非線形照射効果を明らかにし、ナノ構造形成プロセスへの応用を検討したもので、7章からなる。

第1章は序論であり、研究の背景と目的について述べると共に、単原子イオンビームでは原理的に困難な低エネルギーかつ大電流のイオンビームを実現するクラスターイオンビームプロセスの特徴と、ナノ構造形成プロセスへの応用について概説している。

第2章では、超音速ノズルを用いたガスクラスタービームの生成について述べると共に、クラスターのイオン化・輸送条件の最適化によって、表面加工プロセスに必要な数 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ の大電流クラスターイオンビームが得られる照射装置の開発について述べている。

第3章では、飛行時間 (TOF) 法を用いて種々のガスクラスターの質量分析を行い、平均クラスターサイズ2000の巨大クラスターが生成されることを示している。また、希ガスと反応性ガスの混合相から錯体クラスターが形成されることを実証している。さらに、巨大クラスターイオンではクーロン反発力が凝集エネルギーによって緩和されるため、多価クラスターイオンが存在することを示している。

第4章では、希ガスクラスターと固体との衝突時の相互作用について検討し、主として数十keVのエネルギー範囲におけるスパッタリング現象について考察を行っている。クラスターイオンは核的阻止能が大きいと、運動エネルギーを基板表面近傍に高密度に賦与し、基板原子との多体衝突を引き起こす。この結果、クレーター状の照射痕の形成、高いスパッタ率といった単原子イオン照射効果の単純和では表現できない非線形照射効果が現れることを明らかにしている。またクラスターが衝突した際、基板水平方向への粒子の放出が促進されるラテラルスパッタリング効果を実験的に初めて実証し、低エネルギーの単原子イオン照射によるスパッタリングとは全く異なるメカニズムでスパッタされていることを明らかにしている。

第5章では、 SF_6 クラスターイオンによる反応性エッチングを種々の材料で検討し、材料依存性を明らかにしている。反応性クラスターイオン照射では、衝突時のエネルギーがクラスターの崩壊と同時に反応性分子の解離を誘起し、クラスターイオンの衝突による高温・高圧領域の形成によって基板表面での化学反応が促進される。この結果、揮発性反応物の生成により、エッチング速度がArクラスターイオンの場合の二桁程度大きくなることを実証している。さらに、クラスターイオンによるエッチングは、等価的に低電荷・低エネルギープロセスであるので、チャージアップによるデバイスの破壊やノッチの発生などを回避した、低損傷・低電荷・高異方性を備えたナノレベルの微細加工技術への応用が可能であることを述べている。

第6章では、クラスターイオン特有の照射効果である表面平坦化効果を実験及びモンテカルロシミュレーションの両面から論じている。クラスターイオン照射による物理的エッチングでは、イオン照射量の増大と共に表面粗さは減少し、また表

面平坦化効果は垂直入射時が最も大きくなることを明らかにしている。一方、クラスターと固体表面原子との化学反応が顕著である反応性エッチングの場合、被スパッタ粒子の角度分布が等方的になるため表面平坦化効果は小さくなることを明らかにしている。このことはラテラルスパッタリング効果が表面平坦化に大きな影響を与えていることを示唆している。さらにクラスターイオンによるスパッタリング現象をモデル化した計算機シミュレーションによって、ラテラルスパッタリング効果が表面平坦化に大きく寄与していることを実証している。このクラスターイオンビームをダイヤモンド薄膜やSiC単結晶基板などの難加工材料表面に照射を行い、表面荒さが数Åから数十Åの超平坦面が低損傷で形成され、実用レベルに十分応用できることを明らかにしている。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、数千個の気体原子あるいは分子が結合した巨大粒子であるガスクラスターイオンが固体表面に衝突した際の非線形照射効果を明らかにし、ナノ構造形成プロセスへの応用を検討したもので、得られた成果を要約すると次の通りである。

1. 超音速ノズルを用いたガスクラスターの生成と、イオン化・輸送系の最適化を行い、実用的な表面加工プロセスに必要な大電流クラスターイオンビーム装置の開発に成功した。また、飛行時間（TOF）法による質量分布測定から、希ガスあるいは反応性ガスクラスターは、それぞれ平均クラスターサイズ2000の巨大クラスターであることを明らかにした。高分解質量分析により、希ガスと反応性ガスの混合相から錯体クラスターが生成されること、また多価クラスターイオンが存在することを明らかにした。
2. 被スパッタ粒子の角度分布測定やSTMを用いた照射痕の観察から、クレーターの形成、高いスパッタ率やラテラルスパッタリングなどのクラスターイオン特有の高密度照射効果・非線形照射効果を明らかにした。
3. 反応性ガスクラスターイオン照射では、衝突領域が高温・高圧状態になることによって化学反応が促進され、希ガスクラスターイオン照射による物理的エッチングに比べ、エッチング速度が二桁以上増大することを明らかにした。また、反応性クラスターイオンは、低電荷・低損傷・高異方性を兼ね備えたナノレベルの微細加工プロセスとしてSi等の半導体微細加工に応用できることを示した。
4. クラスターイオンビーム照射による表面平坦化は、ラテラルスパッタリング効果によるものであることを実験的に実証すると共に、表面平坦化メカニズムを計算機シミュレーションによって明らかにした。また、クラスターイオンによる表面平坦化は、従来のイオンビームでは加工困難なダイヤモンドやSiCといった材料に対しても応用できることを明らかにした。

以上要するに本論文は、クラスターイオンが固体表面に衝突した際の基板原子との相互作用を明らかにするとともに、クラスターイオンビームをナノ構造形成技術として確立したものであり、得られた成果は学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成11年2月19日、論文内容とそれに関連した試問を行った結果、合格と認めた。