

氏 名	たけ うち だい すけ 竹 内 大 輔
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 1621 号
学位授与の日付	平 成 9 年 3 月 24 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 工 学 専 攻
学位論文題目	Non-linear Processes in Cluster Ion Implantation on Solid Surfaces (クラスターイオン注入による非線形表面プロセスに関する研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 山 田 公 教 授 石 川 順 三 教 授 橘 邦 英

論 文 内 容 の 要 旨

次世代の LSI や高機能電子デバイスの作製においては 1 keV 以下の低エネルギーイオン注入技術が求められているが、従来の単原子・分子イオンビームでは、このような極低エネルギーのイオンビームを得ることは極めて困難である。本論文は、十個から数千個の原子・分子が凝縮したクラスターイオンによる極低エネルギー照射効果に着目し、装置の設計・製作、クラスターイオンビームの特徴、クラスターイオンと固体表面との衝突過程の解明および電子デバイスへの応用について論じた結果をまとめたもので、8 章からなっている。

第 1 章は序論であり、これまでのイオン注入技術の背景について述べるとともに、本研究の意義および本論文の構成について述べている。

第 2 章は室温でガス状の材料を用いた 200 keV ガスクラスターイオン注入装置、およびフラーレン (C_{60}) やデカボラン ($B_{10}H_{14}$) などの固体状の材料を用いた注入装置の設計・製作と動作特性について述べている。

第 3 章はガスクラスターイオンビームの特性についてまとめている。原料として Ar および CO_2 ガスを用い、これらのガスクラスターの生成やサイズ分布の違いについて理論的考察を行っている。また固体表面とクラスターイオンとの相互作用として、二次電子・二次イオンの収率を測定し、単原子イオンの収率に比べクラスターイオンの収率が一桁以上高い、などの結果からクラスターイオンの特異な照射効果について考察している。

第 4 章はクラスターイオンの照射痕の原子レベルの観察についてまとめている。すなわち、走査型トンネル顕微鏡 (STM)、原子間力顕微鏡 (AFM) および透過電子顕微鏡 (TEM) を用いたクラスターイオン照射痕の観察結果から、クラスターイオンと単原子イオンとの衝突過程の違いについて考察している。単原子イオンの衝突の場合、二体間の衝突カスケードの結果、照射痕は直径 20 Å、高さ数 Å の小山状となるのに対し、クラスターイオンの照射痕は直径 200 Å、高さ数 Å のクレーター状となることを示してい

る。これらクレーターの直径はクラスターイオンの入射エネルギーの三分の一乗に比例し、クラスターイオン衝突により固体表面近傍の従来の単原子イオンビーム衝突では得られない高密度のエネルギー付与が生じることを明らかにしている。また、照射痕の角度依存性およびクラスターイオンによる被スパッタ粒子の角度分布から、クラスターイオン特有のラテラルスパッタリング効果を明らかにしている。

第5章はクラスターイオン注入による照射損傷について述べ、クラスターイオン照射特有の非線形効果を明らかにしている。クラスターサイズが数百から数千の大きいクラスターイオンの注入では、損傷深さはエネルギーの三分の一乗に比例することを示している。また同じ速度の単原子イオン照射に比べてクラスターイオンを構成する原子一個当たりの変位原子数が多い非線形効果について明らかにしている。さらに、サイズが数千以上の場合、クラスター構成原子のエネルギーの一部が基板に与えられ、基板の変位原子数が減少することを明らかにしている。一方、サイズ数十の小さいクラスターイオンの場合は、固体への侵入深さは同じ速度の単原子イオンと同程度であることを明らかにしている。

第6章はデカボランによる浅い p^+/n 接合層形成について述べ、 $0.05\ \mu\text{m}$ 以下の浅い p^+/n 接合層形成に極めて有効であることを示している。デカボランイオンを $3\ \text{keV}\sim 20\ \text{keV}$ で $\text{Si}(100)$ 基板に注入し、ボロンの深さ分布や活性化率、形成した接合層のリーク特性などを評価し、浅い接合特性を明らかにしている。

第7章は分子動力学法 (MD 法) によるクラスターイオン衝突に関する理論的考察を行っている。照射エネルギーはクラスター一個当たり $7\ \text{keV}\sim 55\ \text{keV}$ 、クラスターサイズは $13\sim 688$ の範囲で行っている。クラスターイオンの侵入過程を追跡し、クラスターイオン照射における注入プロセスのサイズおよびエネルギー依存性を詳細に考察し、非線形注入プロセスが多体衝突および高密度照射の結果であることを明らかにしている。

第8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、クラスターイオン注入に関し、装置の設計・製作、クラスターイオンと固体表面との相互作用の理論と実験による解明、およびクラスターイオン注入による浅い接合形成に関して行った研究成果をまとめたもので、得られた主な成果は次の通りである。

1. 十数～数千個の塊状原子集団であるクラスターイオンビームを生成し、これを用いたイオン注入法を確立した。これにより、従来のイオンビームでは困難であった $1\ \text{keV}$ 以下の極低エネルギーイオン注入を可能にした。
2. 分子動力学法による理論的考察から、クラスターイオンの固体表面への衝突過程におけるサイズ効果を明らかにした。クラスターサイズ、すなわちクラスターを構成する原子数が十数程度の小さいクラスターの衝突領域では、クラスターイオンに与えた全エネルギーをサイズで割ったエネルギーが実効照射エネルギーであることを明らかにした。また、サイズが数百以上の大きいクラスターの衝突領域では多体衝突が顕著になり、それに伴う種々の非線形効果が存在することを明らかにした。
3. クラスターイオンの照射エネルギーやサイズを変化させ、固体表面に照射し、その時生じる照射痕を

観察した。これらの結果からクラスターイオン特有の衝突過程を明らかにし、高密度照射効果を実験的に明らかにした。

4. クラスターイオンビームの衝突においては、特に高密度損傷層（非晶質層）が形成され、従来避け難いとされているチャネリング注入効果が抑制されることを明らかにした。
5. 多原子クラスターであるデカボラン（ $B_{10}H_{14}$ ）を Si 基板に注入し、初めて $0.05\ \mu\text{m}$ 以下の p^+/n 接合層形成に成功した。また、熱処理時の注入種の異常拡散（Transient Enhanced Diffusion）が回避できることも明らかにし、次世代 LSI の応用に極めて重要な知見が得られた。

以上要するに本論文は、ガスクラスターイオン注入装置の設計・製作を行い、クラスターイオンと固体表面との相互作用について詳細な検討を行い、従来のイオンビームでは困難な極低エネルギーイオン注入を行う新しい方法を提案したもので、学術上、工学応用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 9 年 2 月 4 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。