

氏名	椎名陽子
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第 8962 号
学位授与年月日	平成 31年 3月 25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	

高速クラスターイオン照射における固体内電子応答

主査	筑波大学教授	博士(工学)	佐々木正洋
副査	筑波大学教授	博士(工学)	藤田淳一
副査	岡山理科大学教授	理学博士	金子敏明
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	富田成夫

論 文 の 要 旨

今日、高速イオンビームはRBS (Rutherford Back Scattering)やPIXE (Particle Induced X-ray Emission)に代表される物質分析のみならず、半導体に対するイオン注入、トラック形成による物質改質、粒子線がん治療、放射線育種など、広い分野において利用されている。ここで、高速イオンビームとしてクラスターイオンを使用することにより、従来のイオン照射における質量、電荷、および速度という3つのパラメーターに加えて、クラスターを構成する原子数、および原子間距離という新しいパラメーターが加わる。これにより、照射試料物質に対するエネルギー密度の付与において、より多様で精密なコントロールが可能になることが期待される。審査対象論文は高速クラスターイオン照射によって標的物質内で引き起こされる物理現象を理解する上で最も重要と思われる固体内電子の応答現象に対して、従来と異なる視点からの新たな知見を得ることを目的としている。

イオン照射による固体内電子の応答に関する物理量としては、電子的阻止能と二次電子生成が挙げられる。このうち、高速クラスターイオン照射における電子的阻止能に関しては古くから盛んに研究されており、基本的なメカニズムは既に理解されている。これに対して、高速クラスター照射における二次電子生成に関しては未だそのメカニズムは、ほとんど明らかにはなっていない。高速クラスター照射における二次電子生成は、クラスターを構成する原子数に比例しないこと、この効果が非常に強く、また、比較的厚い膜厚においても持続し続けることが知られている。

審査対象論文は、高速クラスターイオン照射における固体内電子の応答現象を解明するために、0度

電子分光法を用い、コンボイ電子と呼ばれるイオンと同じ速度で移動する電子の収量や、薄膜透過後の高励起イオンにおけるコスタークロニツヒ遷移と呼ばれる同殻内の遷移により外殻が放出される Auger 遷移における電子の収量に対するクラスター効果を実験的に明らかにしたものである。

膜厚の異なる炭素薄膜に原子当たり 3.5 MeV に加速された炭素クラスターイオンビームを照射し、0度方向に放出される電子のエネルギースペクトルを計測した。160 eV 付近に大きなピークが観測されるが、それがコンボイ電子に対応する。単原子当たりのコンボイ電子収量の膜厚依存性から、薄膜内で生成・輸送される原子当たりの電子の数、及び薄膜中の輸送過程での電子の減衰長が、入射イオンのクラスターサイズにより大幅に増加することがわかった。また、コンボイ電子ピークの裾には、コスタークロニツヒ遷移に対応した、多数の Auger 電子によるピークが観測される。これから、Auger 電子放出に関わる Rydberg 状態の生成確率は、クラスターサイズが大きくなると減少し、主量子数大きくなるとクラスターサイズによる差が無くなることを見いだした。これは固体中の電子輸送過程において、入射イオンと同速な電子であるコンボイ電子は、入射クラスターイオンを構成する複数のイオンによる影響を同時に受けていることを意味しており、固体中を輸送する電子とクラスターイオンとの相互作用が電子の輸送における重要なメカニズムであることが明らかになった。これは入射イオンと同速の薄膜中の散乱電子は複数イオンによる束縛状態への捕獲とイオン化を繰り返しながら薄膜中を輸送されることに起因しており、複数イオンによる効果の重要性が示された。今後、クラスター効果に関する詳細な実験を進めることにより、固体内電子の輸送過程における、より詳細な実験的研究が可能であることが示された。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

審査対象論文は、高速クラスターイオン照射における固体内電子の応答現象を解明するために、0度電子分光法を用い、コンボイ電子収量やコスタークロニツヒ遷移による Auger 電子収量におけるクラスター効果の実験的研究を行い。実験結果から、薄膜透過中の複数イオンによる効果の重要性、さらには、二次電子放出過程における散乱電子の輸送過程の重要性を示唆するものである。

高速クラスターイオン照射は単原子イオンでは実現できなかった高密度エネルギー付与を可能にするだけでなく、電荷と入射速度の従来照射パラメーターに、入射原子の核間距離という新しい実験パラメーターが加わり、単原子イオンビームでは実現不可能であったイオン照射効果を可能とする。これにより、新しい技術開発に繋がるのが期待されるが、そのためにはクラスター照射時に起きる物理現象の理解は不可欠である。本研究は高速イオン照射の際の重要な物理過程である、固体内電子の応答に注目し、クラスター照射における物理の解明を試みたものである。

本論文により、コンボイ電子収量の膜厚依存性から明らかになった。固体内での散乱電子の輸送過程における複数原子による影響の存在は、従来研究では指摘されていない新しい視点であり、この観点から見ると、二次電子収量におけるクラスター効果についても大きな寄与があることが示唆されたことは特筆すべき功績である。また、コスタークロニツヒ遷移による Auger 電子の収量におけるクラスター効果は、薄膜出射後に形成される Rydberg 原子の生成におけるクラスター効果を観測するものとして、本研究によって新しく存在が確認されたものである。Rydberg 原子の軌道半径はその主量子数に依存することから、今後、Rydberg 原子の生成におけるクラスター効果の主量子数依存性についての研究を行うことによって、

固体内散乱電子や、入射イオンの電子状態についてより詳細な研究が期待される。

〔最終試験結果〕

平成31年2月13日、数理物質科学研究科学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。