

(論文内容の要旨)

本論文は、表面分析法の1つである高分解能ラザフォード後方散乱分光法 (RBS法) の優れた深さ分解能を維持しながら、10 msr 以上の大きな立体角で測定が可能な新しい分析方法を提案し、その性能に関して理論的検討を行うとともに、装置の設計と製作を行い、新手法の検証実験を通してその有用性を明らかにしたものであり、6章からなっている。

第1章は序論であり、エレクトロニクス分野や素材分野における分析対象の極薄膜化および複雑化の動向と、それらを評価するための高い分解能を持ちかつ高速な分析が可能な手法への要求について記述し、現状の各種表面分析法と RBS 法の特徴について概観した上で、イオンのサイクロトロン運動を利用したあたらしい分析法の可能性と目指す方向を説明している。

第2章では、RBS 法の基本原理と特徴について述べた後に、実用に供されている各種の装置、特に中エネルギー (数百 keV) のプローブイオンと分解能の高いエネルギー分析器を用いた装置に関していくつかの例を示し、その長短について論じている。

第3章では、イオンのサイクロトロン運動を利用した新しい分析法の原理について詳述している。このサイクロトロン RBS 法 (CRBS 法) では、一様強磁場 (最高 2 T) 中に設置した試料に磁場に平行に数百 keV の He^+ イオンを入射して、散乱したイオンを一様磁場中のサイクロトロン運動を利用して分析し、2次元の位置検出器により検出する。この CRBS スペクトロメーターのエネルギー分解能、立体角、質量分解能、深さ分解能を解析的に評価する公式を導いている。得られた公式をもとに、装置を適切に設計すれば 10 msr 以上の大きな立体角と、高分解能 RBS と同等のサブ nm の深さ分解能を持った分析が実現可能であることを明らかにしている。

さらに、散乱イオンのスペクトルを計算するための基礎公式を導出し、スペクトル・シミュレーターの開発を行っている。シミュレーターで得られた CRBS スペクトルは、通常の RBS スペクトルと類似していることを示し、スペクトルの直感的な解釈が可能であることを明らかにするとともに、試料内の軽元素に対する感度が通常の RBS よりも高いという優れた特長を有することを示している。

第4章では、小型の加速器と超電導磁石を用いたスペクトロメーターから成るCRBSシステムの機器開発について述べている。イオン源、ウイーンフィルター、高圧電源、加速管など、加速器の各部分の小型化に成功し、スペクトロメーターの上部に搭載することにより、装置全体で幅1.8 m、奥行き1.4 m、高さ2.5 mという非常にコンパクトなCRBSシステムを完成させている。また、製作した加速器の特性評価を行い、中エネルギーHe⁺ビームが安定に十分な電流量を持って得られることを確認している。さらにスペクトロメーターに関しては、均一度の高い一様磁場が得られることなど、分光に必要な性能を有することを確認している。磁場均一度については、3次元で精密に測定した磁場分布を用いて入射イオンおよび散乱イオンの軌道計算を行って分析への影響を評価している。その結果、サイクロトロン運動が理想に近い状態で実現できることを確認するとともに、入射ビームとして試料上で収束ビームを得るためにはスペクトロメーター内に最適な試料位置が存在することを示し、50 μm以下の大きさのビームが得られることを確認している。

第5章では、第4章で開発したCRBS分析装置を用いて、昨今薄膜化が進んでいるMOSFETのHigh-kゲート絶縁膜を想定した、HfO₂試料(膜厚約2 nm)を測定した結果について述べている。検出面に設置した半導体検出器でエネルギースペクトルを測定し、測定したエネルギースペクトルがHfのスペクトルであることの確認として、入射ビームのエネルギーに応じてHfからの散乱イオンの信号がスペクトル上でシフトすることを示している。また、Hfスペクトルの信号量の解析からは、10 msr以上の大きな立体角を示唆する結果が得られている。

第6章は結論であり、本研究により得られた結論をまとめるとともに、CRBSの実用化への課題と展望を述べている。

氏名	一原 主税
----	-------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、表面分析法の1つである高分解能ラザフォード後方散乱分光法(RBS法)の優れた深さ分解能を維持しながら、10 msr以上の大きな立体角で測定が可能な新しい分析方法を提案し、その性能に関して理論的検討を行うとともに、装置の設計と製作を行い、新手法の検証実験を通してその有用性を明らかにしたものであり、得られた主な成果は以下のとおりである。

1. 散乱イオンの一様磁場中におけるサイクロトロン運動を利用した新しいエネルギー分析器の提案を行い、エネルギー分解能、質量分解能、立体角、深さ分解能を解析的に評価する公式を導出した。得られた公式から、10 msr以上の大きな立体角とサブ nm の深さ分解能とを併せ持つ分析器が実現可能であることを示した。
2. 新しい分析器で測定されるスペクトルを計算するための基礎公式を導出し、それを用いてスペクトル・シミュレーターの開発を行った。ついで、シミュレーターで得られたスペクトルは、通常のRBSスペクトルと類似していることを明らかにし、スペクトルの直観的な解釈が可能であることを示した。
3. 小型の加速器と超電導磁石を用いた分析器から成る分析装置の設計と製作を行い、分析器中の磁場の均一度を精密に測定し、高い均一度をもった一様磁場が得られることを確認した。さらに、測定した磁場分布中のイオンの軌道計算を行い、ほぼ理想的な軌道が得られることを示した。
4. 開発した分析装置を用いて、極薄のHfO₂試料(膜厚約2 nm)を測定し、10 msr以上の立体角を持って、nmレベルの深さ分解能で分析が可能であることを示した。

以上のように、本論文は新しい高分解能ラザフォード後方散乱分光法の提案と、その実現可能性について理論的および実験的研究を行い、その優れた特徴を明らかにしたものであり、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20年8月27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。