

学位論文題名

2次電子スピン計測技術の開発

—RHEEDの回折電子場で励起した2次電子のスピン計測—

学位論文内容の要旨

科学技術の進歩と共に製品を構成する部品の微細化・薄膜化が急速に進行する中、バルク原子に対して表面原子が占める割合が飛躍的に大きくなることにより、表面固有の物性が無視できなくなる事態が出現しつつある。これまでの表面科学分野における電子プローブを利用した実験的研究のほとんどは、電子の電荷・質量に基づく表面物性の観測が対象であり、電子物性のもう一つの側面であるスピンに関しては測定技術の難しさから報告例は極めて少ない。電子のスピンは強磁性・反強磁性等の主要原因であり、固体表面における電子スピン偏極状態の分析手法を開発することは、表面化学分野の知見を広めることに止まらず、高密度化が進む物質情報工学の分野における技術の発展に不可欠である。

このような背景のもと、本研究では、反射高速電子回折電子場で励起した2次電子スピン計測技術を確立し、表面の結晶構造のみならず2次電子のスピン偏極度も同時に測定しうる新しい表面分析装置・技術の開発を行ったものである。以下に各章の概要と主な成果について述べる。

第1章では、電子スピン計測技術研究の背景および目的、研究推進のために技術開発した要素技術、すなわち2次電子スピン計測技術・反射高速電子回折法の観測技術・遷移金属成長表面の作製技術等の位置づけと、本論文の構成について詳述した。

第2章では、スピン計測の歴史的背景、本研究において開発した2次電子スピン計測法、Mott散乱理論によるスピン計測原理等、理論的基礎についてまとめた。

第3章では、開発した+100kVMott散乱型電子スピン検出器(以後Mott検出器)の構造と、検出器を構成する要素の技術仕様を示し、検出器を立ち上げるために行った校正実験とその成果、および計測精度について述べた。まず、計算機シミュレーションによって、検出器の電子光学系の最適化をも行った。次に非スピン偏極電子線を放射する白黒TV用電子銃を使用して、電子光学系多段電極に印加する電圧の最適化を行い、測定系での信号処理する際の各パラメータの最適化を図って、最終的に非偏極電子線に対して、測定誤差を±1%精度以下に収まるように校正した。通常のスピン計測では、測定時間との関係から統計誤差2~5%程度で使用するため、本校正実験によりMott検出器を実用段階に投入することができた。

第4章では、第3章で述べたMott検出器を反射高速電子回折(RHEED)装置に搭載したRHEED+Mott検出器複合型実験装置の開発内容、この実験系で得た多結晶ニッケル表面から放出される2次電子スピン偏極度と、その外部印加磁場依存性と、ケイ素鉄単結晶表面から放出される2次電子スピン偏極度と、その試料温度依存性について述べた。ニッケル試料から放出された2次電子のスピン外部印加磁場依存性から、強磁性体特有のヒステリシス曲線が、ケイ素鉄試料から放出された2次電子のスピン試料温度依存性から、キュリー点近傍でスピン偏極度が激減する結果がそれぞれ得られた。このことから立ち上げたMott検出器が計測している対象が確実に2次電

子スピンであることを確かめ、RHEED の回折電子場で 2 次電子を励起してスピン計測する手法の妥当性を確認できた。

第 5 章では、第 4 章で述べた RHEED+Mott 検出器複合型実験装置の改良型として、電子銃をプローブ電子線の収束性を高度化した走査電子顕微鏡 (SEM) 用に改造し、空間分解能を向上させた実験装置の技術内容を述べ、この実験装置を用いて得たケイ素鉄・マグネタイト研磨表面のスピン SEM 像を示す。ケイ素鉄単結晶試料のスピン SEM 実験においては、ビッター法による光学顕微鏡観察で見られる磁区構造と類似したドメインパターンを有するスピン SEM 像を取得することができ、RHEED の回折電子場励起 2 次電子によるスピン SEM 法において、試料の磁化状態を反映したスピンを計測している証拠を得ることができた。またケイ素鉄とマグネタイトについて取得したスピン SEM 像におけるスピンの方向は、それぞれの試料におけるバルクの磁化容易方向に一致する結果を得た。

第 6 章では、本計測法の最終目的である RHEED 表面波共鳴現象を用いた固体表面第 1 原子層のスピン計測について述べた。表面第 1 原子層で回折電子場強度が異常に強くなる表面波共鳴現象に関する実験を示し、これを発現させる諸条件を考察した。また、表面波共鳴を発現させるための良質な強磁性体試料として本研究が採用したニッケル球状単結晶の作製法と RHEED による評価実験を示し、この試料で取得したスピン SEM 像を示した。

本研究では、電子スピン検出器を開発して、RHEED 装置と複合化して、回折電子場励起 2 次電子のスピン計測を可能にした。磁性と結晶性は密接な関係にあるにもかかわらず、これらを同時に計測する表面分析手段は、現在のところ本手法以外に存在しない。本実験法が、薄膜化が進む磁気記録分野をはじめ、多くの表面磁性研究に進展に役立つ可能性が高いと考えられる。また、RHEED 表面波共鳴を利用した表面第 1 原子層のスピン計測に関する可能性が見えてきた。表面の結晶性、磁性、そして再表面第 1 原子層に限定した測定が可能になると期待できる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 澤 村 貞 史
副 査 教 授 成 田 正 邦
副 査 教 授 武 笠 幸 一
副 査 教 授 鬼 柳 善 明

学 位 論 文 題 名

2 次電子スピン計測技術の開発

—RHEED の回折電子場で励起した 2 次電子のスピン計測—

表面科学分野における電子プローブを利用した実験的研究のほとんどは、電子の電荷・質量に基づく表面物性の観測が対象であり、電子物性のもう一つの側面であるスピンに関しては測定技術の難しさから報告例は極めて少ない。固体表面における電子スピン偏極状態の分析手法を開発することは、表面科学分野の知見を広めることに止まらず、高密度化が進む磁気メディア工学の分野における技術の発展に不可欠である。

本論文は、このような状況のもと、反射高速電子回折電子場で励起した 2 次電子スピン計測技術を確立し、表面の結晶構造のみならず 2 次電子のスピン偏極度も同時に測定しうる新しい表面分析装置・技術の開発を行ったものであり、主な成果は以下の点に要約される。

(1) 結晶構造とスピン偏極度を同時の測定するために必要な 2 次電子スピン計測技術・反射高速電子回折法の観測技術・遷移金属成長表面の作製技術等を明らかにした。

(2) 開発した 100kVMott 散乱型電子スピン検出器 (以後 Mott 検出器) の構造と、検出器を構成する要素の技術仕様を示し、計算機シミュレーションによって、検出器の電子光学系の最適化を行った。次に非スピン偏極電子線を放射する白黒 TV 用電子銃を使用して、電子光学系多段電極に印加する電圧の最適化を行い、測定系で信号処理する際の各パラメータの最適化をも図って、最終的に非偏極電子線に対する偏極度を測定誤差 $\pm 1\%$ 以下の精度で測定することに成功した。

(3) Mott 検出器を反射高速電子回折 (RHEED) 装置に搭載した複合型実験装置を開発した。この実験系で得た多結晶ニッケル表面から放出される 2 次電子スピン偏極度とその外部印加磁場依存性およびケイ素鉄単結晶表面から放出される 2 次電子スピン偏極度とその試料温度依存性を明らかにした。ニッケル試料か

ら放出された2次電子のスピン外部印加磁場依存性から、強磁性体特有のヒステリシス曲線が、ケイ素鉄試料から放出された2次電子のスピン試料温度依存性から、キュリー点近傍でスピン偏極度が激減する結果がそれぞれ得られた。このことから、立ち上げた Mott 検出器が計測している対象が2次電子スピンであることを確かめ、RHEED の回折電子場で2次電子を励起してスピン計測する手法の妥当性を示した。

(4) RHEED+Mott 検出器複合型実験装置の改良型として、電子銃をプローブ電子線の収束性を高度化した走査電子顕微鏡 (SEM) 用に改造し、空間分解能を向上させた。この装置を用いて得たケイ素鉄単結晶試料のスピン SEM 実験においては、ビッター法による光学顕微鏡観察で見られる磁区構造と類似した、ドメインパターンを有するスピン SEM 像を取得することができ、RHEED の回折電子場励起2次電子によるスピン SEM 法において、試料の磁化状態を反映したスピンを計測している証拠を得ることができた。またケイ素鉄とマグネタイトについて取得したスピン SEM 像におけるスピンの方向は、それぞれの試料におけるバルクの磁化容易方向に一致する結果を得た。

(5) 表面波共鳴を発現させるための良質な強磁性体試料として本研究が採用した、ニッケル球状単結晶の作製法を明らかにし、この試料でスピン SEM 像を取得することにより、RHEED 表面波共鳴現象を用いた固体表面第1原子層のスピン計測の可能性を実証した。

これを要するに、著者は、電子スピン検出器と RHEED 装置を複合化して、回折電子場励起2次電子のスピン計測を可能にし、表面の磁性と結晶性を同時に測定できる装置を、世界に先駆けて、開発したものであり、表面科学、物質情報工学、原子工学に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。