

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656035

研究課題名（和文）強磁性共鳴を用いた磁気交換力顕微鏡の超高感度化・超高分解能化

研究課題名（英文）High Sensitive and High Resolution Imaging of Magnetic Exchange Force Microscopy Using Ferromagnetic Resonance

研究代表者

菅原 康弘（SUGAWARA, YASUHIRO）

大阪大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：40206404

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000 円、（間接経費） 930,000 円

研究成果の概要（和文）：これまでの磁気交換力顕微鏡では、表面の結晶構造と磁気情報を分離して測定することは困難である。そこで、本研究では、物質表面の結晶構造と磁気交換力を分離測定するため、強磁性共鳴を用いる磁気交換力顕微鏡を新たに提案した。具体的には、強磁性共鳴により磁気探針の磁化状態を変調し、磁気交換力だけを抽出しようとするものである。ここでは、この磁気交換力顕微鏡の様々な要素技術の高性能化を実現した。

研究成果の概要（英文）：In the magnetic exchange force microscopy, separate measurement of the structural information and the magnetic one on the surface has not been realized. In the present study, we have proposed a new magnetic exchange force microscopy using the ferromagnetic resonance, which can measure the structural information and the magnetic one on the surface separately. We have improved the performance of various technical elements used in the magnetic exchange force microscopy.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 薄膜・表面界面物性

キーワード：磁気交換力顕微鏡 磁気交換力 強磁性共鳴 スピン

## 1. 研究開始当初の背景

革新的なスピントロニクスデバイスの実現は、原子スケールの磁氣的性質を解析し、思い通りに作り上げる能力に大きく依存する。個々の原子によって構築されたナノ構造体の磁氣的性質を理解するために最も重要なものは、原子の磁気モーメント(スピン)間の交換相互作用である。交換相互作用を直接測定できる革新的な手法として、磁気交換力顕微鏡が注目されている。この手法は、原子分解能が達成可能な原子間力顕微鏡の探針として磁性体を用い、磁性体探針・磁性体試料間に働く交換力を検出する。しかし、得られた画像は、表面の結晶構造と磁気信号の混じったものであり、また、装置のノイズレベルをわずかに上回る程度のものである。

申請者は、磁気交換力顕微鏡において、交換力だけを分離測定する方法として強磁性共鳴を利用するという着想に至った。すなわち、強磁性体をコートした探針に変調されたマイクロ波を照射し、探針の磁化状態を強磁性共鳴により変調し、探針・試料間相互作用力の変調成分を抽出することにより交換力だけを分離測定するというアイデアである。

## 2. 研究の目的

本研究は、強磁性共鳴を用いて、物質表面の結晶構造と磁気交換力を原子分解能で分離測定できる磁気交換力顕微鏡を開発することを目的とする。具体的には、強磁性共鳴を用いて、顕微鏡探針の磁化状態を効率よく変調できるように、現有の顕微鏡を改良する。また、探針・試料間相互作用力から交換力を分離測定する様々な技術の高性能化を実現する。

強磁性共鳴を用いた磁気交換力顕微鏡を開発することにより、これまで知ることのできなかつた原子スケールの交換相互作用を直接測定できるようになる。このような革新的な研究手法の出現は、磁性研究の仕方を質的に変える可能性がある。また、得られる知見は、磁性材料の原子スケールの機能発現機構を解明することを容易にすると期待され、特に、物性科学において極めて重要な学問領域である『表面磁性科学』を大きく進歩させると期待させる。さらに、スピンの制御を利用する新規なエレクトロニクス(スピントロニクス)の発展にも大きく寄与すると期待される。

## 3. 研究の方法

平成24年度は、まず、磁気交換力を高分解能に検出するため、先鋭で清浄な磁性体探針を実現する。次に、磁性共鳴を利用して探針の磁化状態を変調するため、現有の超高真空原子間力顕微鏡にマイクロ波を探針先端に高効率に照射する機構を構築する。また、磁性体探針によるマイクロ波吸収の周波数特性を測定し、磁性体探針の強磁性共鳴の条

件を明らかにする。さらに、磁気交換力を最も高感度に測定するための変位検出計の低ノイズ化を実現する。

平成25年度以降は、まず、磁性体カンチレバーを磁場中に設置し、それに振幅変調されたマイクロ波を照射し、探針の磁化状態を強磁性共鳴により変調できることを実証する。また、周波数シフト曲線に対する信号対雑音比を求め、磁気交換力を最も高感度に測定できる条件を実験的に明らかにする。最後に、原子分解能で磁気交換力を測定できることを実証する。

## 4. 研究成果

### (1)先鋭で清浄な磁性体探針の実現

交換力を高分解能に検出するためには、先鋭で清浄な磁性体探針を実現する必要がある。そこで、現有の超高真空原子間力顕微鏡に装備している Ar スパッタ銃を用いて、シリコン(Si)探針に磁性体を先鋭にコートできるようにした。なお、磁性体としては、Fe,Co,Mn などを取り上げた。

### (2)マイクロ波を探針先端に効率的に照射する機構の構築

強磁性共鳴を利用して探針の磁化状態を高効率で変調するためには、マイクロ波を照射する探針アンテナを磁性体探針にできるだけ接近させることが重要である。そこで、現有の超高真空・非接触原子間力顕微鏡に XY ステージと直線導入機とからなる3軸移動機構を取り付け、探針アンテナを磁性体探針の極近傍に接近できるようにした。なお、マイクロ波信号発生器としては現有のものを使用した。

### (3)磁性体探針の強磁性共鳴条件の解明

強磁性共鳴を利用して探針の磁化状態を変調するためには、照射するマイクロ波の周波数を強磁性共鳴が生じさせる周波数に設定する必要がある。そこで、磁性体探針によるマイクロ波吸収の周波数特性を測定し、磁性体探針の強磁性共鳴の条件を明らかにした。なお、マイクロ波吸収の周波数特性の測定には、現有のネットワークアナライザを使用した。

### (4)交換力を高感度に測定するための変位検出計の低ノイズ化

微弱な交換力を測定するためには、探針に働く力を高感度に測定する必要がある。現有のカンチレバーの変位検出計のノイズは、半導体レーザのモードホップノイズが大きな原因となっている。そこで、半導体レーザを高周波変調しモードホップノイズを低減し、変位検出計の低ノイズ化を実現した。また、レーザ光出力を最適化し、ほぼレーザ光のショットノイズが支配するレベルまでノイズを低減し、約  $30\text{fm}/\sqrt{\text{Hz}}$  の高い検出感度を実

現した。

(5)強磁性共鳴を用いて磁性体探針を磁気変調できることを実証

磁性体カンチレバーを磁場中に設置し、それに振幅変調されたマイクロ波を照射し、探針の磁化状態を強磁性共鳴により変調できることを実証した。具体的には、カンチレバーの周波数シフトに現れる変調成分をロックインアンプで検出することにより、磁気変調できることを実証した。なお、漏洩磁場の大きな試料として、SmCo 磁石を用いた。

(6)原子分解能で交換力を測定できる磁気交換力顕微鏡の実証

反強磁性体のイオン結晶である酸化ニッケル(NiO)の(001)表面は、隣接原子のスピンが反平行に配列する。このNiO(001)表面を試料表面として取り上げ、表面の個々の原子の結晶構造と交換力(スピン配列)を原子分解能で分離観察できることを実証した。なお、この観察には原子レベルで清浄で平坦なNiO(001)表面を用いる必要があるが、バルクの酸化ニッケルを超高真空中でへき開することにより準備した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 7 件)

- 1)“The stray capacitance effect in Kelvin probe force microscopy using FM, AM and heterodyne AM modes”, Z. Ma, L. Kou, Y. Naitoh, Y. J. Li and Y. Sugawara, Nanotechnol., 査読有, **24**, 225701(1-8), 2013. DOI:10.1088/0957-4484/24/22/225701.
- 2)“Complex Design of Dissipation Signals in Non-Contact Atomic Force Microscopy”, J. Bamidele, Y. J. Li, S. Jarvis, Y. Naitoh, Y. Sugawara, and L. Kantorovich, Phys. Chem. Chem. Phys., 査読有, **14**, 16250-16257, 2012. DOI: 10.1039/c2cp43121.
- 3)“Quantification of atomic-scale elasticity on Ge(001)-c(4×2) surfaces via noncontact atomic force microscopy with a tungsten-coated tip”, Y. Naitoh, T. Kamijo, Y. J. Li and Y. Sugawara, Phys. Rev. Lett., 査読有, **109**, 215501(1-5), 2012. DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.215501.
- 4)“Chemical tip fingerprinting in scanning probe microscopy of an oxidized Cu(110) surface”, J. Bamidele, Y. Kinoshita, R. Turanský, S. H. Lee, Y. Naitoh, Y. J. Li, Y. Sugawara, I. Štich, and L. Kantorovich, Phys. Rev. B, 査読有, **86**, 155422(1-8), 2012. DOI: 10.1103/PhysRevB.86.155422.
- 5)“High potential sensitivity in heterodyne

amplitude modulation Kelvin probe force microscopy”, Y. Sugawara, L. Kou, Z. Ma, T. Kamijo, Y. Naitoh, and Y. J. Li, Appl. Phys. Lett., 査読有, **100**, 223104(1-4), 2012.

DOI: 10.1063/1.4723697.

- 6)“Force Mapping on NaCl(100)/Cu(111) Surface by Atomic Force Microscopy at 78 K”, Y. J. Li, K. Tenjin, Y. Kinoshita, Z. Ma, L. Kou, Y. Naitoh, M. Kageshima and Y. Sugawara, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, **51**, 035201(1-5), 2012. DOI: 10.1143/JJAP.51.035201.
- 7)“ケルビンプローブフォース顕微鏡とその薄膜成長評価への応用”, 菅原康弘, 野村光, 内藤賀公, 李艶君, 顕微鏡, 査読有, **41**, 18-21, 2012.

[学会発表](計 7 件)

招待講演(国際会議)

- 1)“Magnetic Force Microscopy Using Ferromagnetic Resonance”, Y. Sugawara, 7th International Conference on Materials Engineering for Resources, November 20– 22, 2013, Akita, Japan.
- 2)“Atom Manipulation and Force Spectroscopy on Cu(110)-O Surface with Low Temperature FM-AFM”, Y. Sugawara, Y. Kinoshita, S. H. Lee, Y. Naitoh and Y. J. Li, 4<sup>th</sup> European Nanomanipulation Workshop, June 12-14, 2013, Kraków, Poland.
- 3)“Atom Manipulation and Force Spectroscopy on Cu(110)-O Surface with Low-Temperature AFM”, Y. Sugawara and Y. J. Li, Annual Meeting of The Chinese Vacuum Society (CVS-2012), September 21-24, 2012, Lanzhou, China.
- 4)“Investigation of TiO<sub>2</sub> Surface by Using Atomic Force Microscopy/Spectroscopy”, Y. Sugawara, The 3rd Annual World Congress of Catalytic Asymmetric Synthesis (WCCAS-2012), May 12-14, 2012, Beijing, China.

招待講演(国内会議)

- 1) “走査型プローブ顕微鏡(SPM)”, 菅原康弘, 第56回表面科学基礎講座 表面・界面分析の基礎と応用, 2013年10月16日, 大阪大学.
- 2) “光誘起物質間力による単原子分解能顕微鏡”, 菅原康弘, 徳山貴士, 李艶君, 日本物理学会第67回年次大会, 領域5シンポジウム 輻射力によるマイクロ-マクロ転写の学理と応用への展開, 2013年9月25日, 徳島大学.
- 3) 走査型プローブ顕微鏡(SPM)”, 菅原康弘, 第54回表面科学基礎講座 表面・界面分

析の基礎と応用、2012年10月16日、大阪大学.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://nanophysics.ap.eng.osaka-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

菅原 康弘 (SUGAWARA YASUHIRO)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：40206404