

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02779

研究課題名(和文) 時間分解スピン偏極STMによる強磁性ナノ構造におけるスピンドYNAMIKSの研究

研究課題名(英文) Time-resolved SP-STM study of spin dynamics in ferromagnetic nanostructures

研究代表者

岡 博文(Oka, Hirofumi)

東北大学・材料科学高等研究所・助教

研究者番号：70374600

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：強磁性ナノ構造におけるスピン緩和過程を調べるために、単純なスピン偏極電子状態を示すモデルケースの確立と時間分解スピン偏極走査トンネル顕微鏡の立ち上げを行った。Cu(111)基板上に形成したCoナノ構造に、FeまたはNi、Agを連続蒸着することにより、Coナノ構造の周りを他の材料で囲んだコア-シェル型ナノ構造を作製した。スピン偏極STMを用いてCoナノ構造の電子状態を調べ、2つの自由電子的な表面状態があることを発見し、一方がマジョリティースピンで他方がマイノリティースピンバンドであることを明らかにした。FeまたはNiで囲んだナノ構造では、スピン緩和時間が長くなることを示唆する結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

強磁性ナノ構造における電子スピンの緩和過程を明らかにすることは、電子のスピン状態の保持・伝達につながり、スピン状態の制御を可能にするため、新規スピントロニクスデバイスの創出に向けて重要な課題である。単純なスピン偏極電子状態を示す強磁性Coナノ構造はその測定対象のモデルケースとなり得、他の材料で囲むことによりスピン間時間を変調できる可能性を示した。今後、時間分解測定のコア-シェル型ナノ構造内での局所測定につなげていく。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate spin relaxation processes in ferromagnetic nanostructures, we established nanostructures with simple spin-dependent electronic states and spin-polarized scanning tunneling microscopy (STM) with temporal resolution. Co nanostructures with triangular shape were formed on Cu(111) substrate, followed by sequential deposition of Fe, Ni, or Ag. This procedure resulted in the formation of a core-shell type of nanostructures that Co was surrounded by other materials. Spin-polarized STM measurements revealed that Co nanostructures exhibited two free-electron like spin-polarized surface states. Analyses on the energy width of discrete free-electron like states implied that the spin relaxation time was longer for core-shell type nanostructures than for pure Co nanostructures.

研究分野：表面電子物性

キーワード：強磁性ナノ構造 スピン偏極STM スピン緩和時間 時間分解測定

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

固体中の励起された電子は、主に電子-電子散乱によりエネルギーを失い、基底状態に緩和する。その際、励起されたエネルギーからフェルミレベルの間にある非占有準位を経由し緩和することから、このプロセスはフェルミレベル近傍の電子状態に強く支配される。強磁性体においては、交換分裂により電子状態がスピンの依存するので、励起された電子が基底状態に緩和する経路はそのスピン状態によって異なる。この結果、励起状態から基底状態へ緩和する時間が励起電子のスピンの強に強く依存する。このような電子スピンの緩和過程を明らかにすることは、電子のスピン状態の保持・伝達につながり、スピン状態の制御を可能にするため、新規スピントロニクスデバイスの創出に向けて重要な課題である。

電子スピンの緩和過程を理解するためには、スピン緩和の経路となるフェルミレベル近傍の電子状態をスピン分解で知る必要がある。これまで、バルク試料に対して、スピン緩和の研究は多くなされており、実験・理論ともにマイノリティースピンがマジョリティースピンに比べ短い時間で緩和すると報告している。この結果は、強磁性体ではフェルミレベル近傍で、マイノリティースピン電子の状態密度がマジョリティースピンよりも大きいため、マイノリティースピンの方が緩和する経路が多いからだと言われた。一方、強磁性ナノ構造に対するスピン緩和の実験結果は、ほとんど見あたらない。その理由として、ナノ構造の電子状態をスピン分解で明らかにすることの困難さと、単純なスピン偏極電子状態を示すモデルケースがなかったことが考えられる。

2. 研究の目的

(1) Cu(111)基板上に形成した強磁性 Co ナノ構造を、単純なスピン偏極電子状態を示すモデルケースとして確立する。

Cu(111)基板上に形成した強磁性 Co ナノ構造は自由電子的な表面状態を2つもち、それぞれマジョリティースピンバンドとマイノリティースピンバンドに対応することを明らかにした。スピンそれぞれの方向に対して1つの表面状態しか存在しないため、スピンの緩和過程を特定することが容易であることが予想され、強磁性ナノ構造におけるスピン緩和過程を調べるモデルケースと成りうる。また、Co ナノ構造の周りを他の材料で囲むことにより、スピンの緩和過程や緩和時間を制御する可能性を探る。

(2) 時間分解スピン偏極走査トンネル顕微鏡 (STM) により、強磁性 Co ナノ構造のスピン緩和過程を明らかにする。

高い空間分解能とスピン分解能を有する STM に時間分解能を付与し、強磁性 Co ナノ構造個々のスピン緩和時間やナノ構造内でのスピン緩和時間の空間分布を調べる。時間分解測定は、STM トンネルジャンクションにポンプ電圧とプローブ電圧の2種類の電圧パルスを印加し、ポンプ電圧とプローブ電圧間の遅延時間を掃引することにより達成する。

3. 研究の方法

(1) Ar⁺イオンスパッタリングとアニーリングにより Cu(111)基板表面を清浄化し、電子線蒸着により Co を Cu(111)基板に蒸着する。Co は自己形成的に三角形状のナノ構造を形成する。続けて他の材料 (Fe または Ni、Ag) を同様に蒸着し、Co ナノ構造の周りを囲む。ナノ構造の大きさは、蒸着レートを一定にし、蒸着時間を変えることにより調整する。作製したナノ構造の形状を調べるために、STM 観察を行う。

(2) 強磁性 Co ナノ構造の表面状態をスピン分解で調べるために、磁場中スピン偏極 STM 測定を行う。外部磁場を変化させて微分コンダクタンス (dI/dV) スペクトルを測定し、対象とする Co ナノ構造の磁気ヒステリシス曲線を測定する。得られた磁気ヒステリシス曲線から、Co ナノ構造の磁化とスピン偏極 STM 探針の磁化が平行または反平行の状態に制御し、Co ナノ構造の dI/dV 像を様々なエネルギーで測定する。 dI/dV 像に現れる電子定在波の干渉パターンから表面状態のバンド分散を調べるために、高速フーリエ変換解析を行う。

4. 研究成果

(1) Cu(111)基板上に形成した Co ナノ構造を他の材料で囲み、コア-シェル構造を作製した。先行研究から、Co と Fe の連続蒸着により Co-Fe コア-シェル構造を作製できることがわかっている。そこで、強磁性体である Ni と非磁性体である Ag によるコア-シェル構造の作製を試みた。室温で Co と Ni を連続蒸着することにより、Co ナノ構造の縁を Ni で囲んだ Co-Ni コア-シェル構造の作製に成功した[図 1(a)]。同様に強磁性体-非磁性体のコア-シェル構造を作製するため Co と Ag を連続蒸着した。2原子層成長する Co に対して Ag は1原子層成長するため Co と Ag の界面がうまく接合せず、ラフな界面をもつ Co-Ag コア-シェル構造しか得られなかった[図 1(b)]。

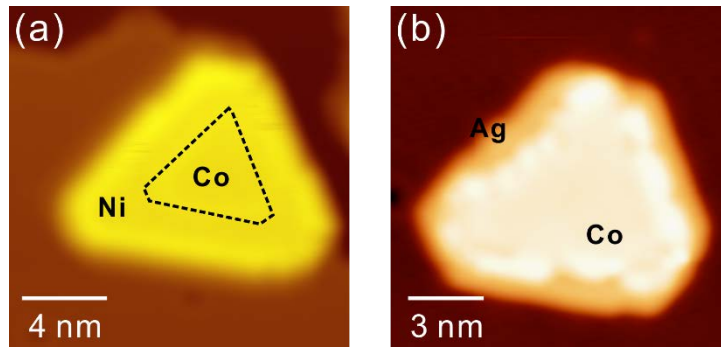


図 1: コアシェル構造の STM (形状) 像。(a) Co-Ni コアシェル構造、(b) Co-Ag コアシェル構造。

(2) 強磁性 Co ナノ構造[図 2(a)]の表面状態をスピン偏極 STM により明らかにした。Co ナノ構造の中心位置で、異なる外部磁場のもと微分コンダクタンススペクトルを測定した。図 2(b)に見られるように、微分コンダクタンスの値が大きく変化した。この変化がどのように外部磁場に依存しているのか明らかにするために、 $V_s = -0.3$ V 付近にあるピークの微分コンダクタンス値を磁場に対してプロットした結果が図 2(c)である。微分コンダクタンスの変化は、いわゆる“バタフライカーブ”を描き、強磁性 Co ナノ構造の磁気ヒステリシス曲線を示している。この結果を基に平行または反平行状態で dI/dV 像を取得し、高速フーリエ変換解析からスピン分解バンド分散測定に成功した。

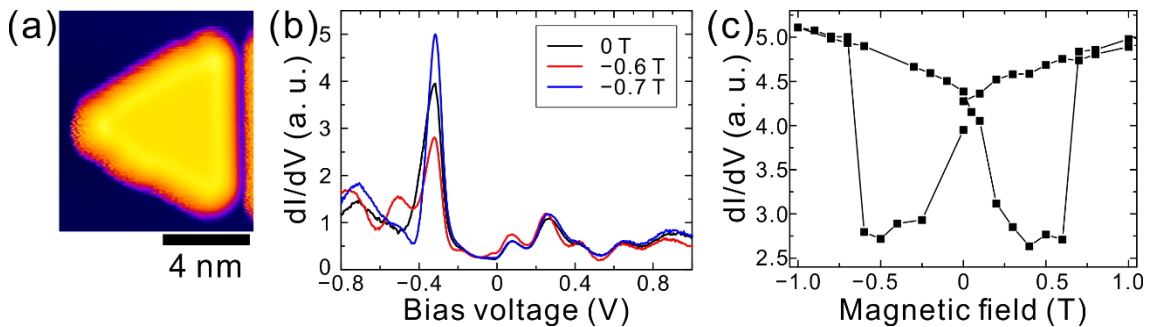


図 2: 強磁性 Co ナノ構造の磁気ヒステリシス曲線。(a) Co ナノ構造の STM 像。(b) 微分コンダクタンススペクトルの磁場依存性。(c) $V_s = -0.3$ V 付近にあるピークの微分コンダクタンス値の外部磁場依存性。

(3) Co-Ni コアシェル構造[図 3(a)]において、電子定在波[図 3(b)と 3(c)]が形成されることを明らかにした。電子定在波の波数ベクトルを高速フーリエ変換解析により導出し、そのエネルギー依存性から Co-Ni コアシェル構造の表面状態のバンド分散を求めた。Co ナノ構造の表面状態がナノ構造への閉じ込め効果から量子化されていることを確認した。量子化された準位それぞれのエネルギー半値幅は、準位のエネルギーが大きくなるにつれて大きくなることがわかった。この結果は準位のエネルギーが大きいと緩和時間が短くなることに対応し、緩和時間は数十フェムト秒のオーダーであることがわかった。また、Co ナノ構造と Co-Ni コアシェル構造の結果の比較から、Co の表面状態の緩和時間は Ni で囲むことにより長くなる傾向が示唆された。

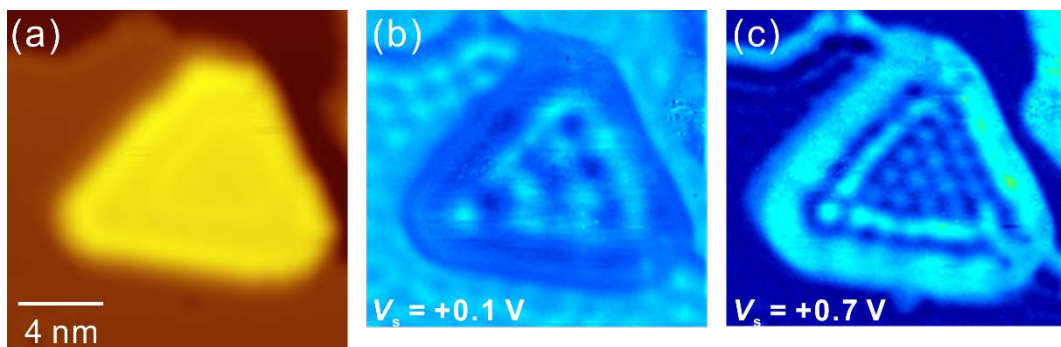


図 3: Co-Ni コアシェル構造における電子定在波の観測。(a) Co-Ni コアシェル構造の STM 像。(b)と(c) Co-Ni コアシェル構造の dI/dV 像。それぞれ $V_s = +0.1$ V、 $V_s = +0.7$ V で取得した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Oka Hirofumi, Okada Yoshinori, Hitosugi Taro, Fukumura Tomoteru	4. 巻 113
2. 論文標題 Two distinct surface terminations of SrVO ₃ (001) ultrathin films as an influential factor on metallicity	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 171601 ~ 171601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5051434	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mishra Puneet, Qi Zhi Kun, Oka Hirofumi, Nakamura Kohji, Komeda Tadahiro	4. 巻 17
2. 論文標題 Spatially Resolved Magnetic Anisotropy of Cobalt Nanostructures on the Au(111) Surface	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 5843 ~ 5847
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.7b03114	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Hirofumi Oka, Puneet Mishra, Zhi-Kun Qi, Komeda Tadahiro
2. 発表標題 Spatially resolved magnetic anisotropy of Co islands on Au(111)
3. 学会等名 2018 International Conference on Nanoscience + Technology (ICN+T) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hirofumi Oka, Puneet Mishra, Zhi-Kun Qi, Komeda Tadahiro
2. 発表標題 Spatially resolved magnetic anisotropy of Co islands on Au(111)
3. 学会等名 SPSTM-7 & LTSPM-1 International Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡 博文、Mishra Puneet、Qi Zhi-Kun、米田忠弘
2. 発表標題 Coアイランドの磁気異方性エネルギーの膜厚依存性
3. 学会等名 2018年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡 博文
2. 発表標題 Coナノ磁石の磁気特性：スピン偏極STMによる研究
3. 学会等名 顕微鏡学会研究会「超高空間分解能SPMの最前線」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hirofumi Oka
2. 発表標題 Spin-dependent electron scattering in a single Co island
3. 学会等名 Advanced Scanning Probe Microscopy 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡 博文、米田忠弘
2. 発表標題 Coナノ構造におけるスピン依存散乱
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡 博文
2. 発表標題 強磁性Coナノ構造の磁気異方性エネルギー：スピン偏極STMによる局所測定
3. 学会等名 物質・デバイス領域共同研究拠点 展開共同研究B研究会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hirofumi Oka, Tadahiro Komeda
2. 発表標題 Spin-resolved dispersion relation of a single Co island
3. 学会等名 DPG Spring Meeting（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡 博文
2. 発表標題 スピン偏極STMによるナノスケール磁気特性の開拓
3. 学会等名 日本磁気学会研究会「走査型トンネル顕微鏡/分光法を活用した物性研究の新展開」（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡 博文、米田忠弘
2. 発表標題 コア-シェル型Co-Niナノ構造における電子定在波の形成
3. 学会等名 2019年日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirofumi Oka, Keiichi Katoh, Masahiro Yamashita, and Tomoteru Fukumura
2. 発表標題 STM/STS study of single molecule magnets TbPc2 on SrVO3(001)
3. 学会等名 IBS Conference on Quantum Nanoscience (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirofumi Oka, Keiichi Katoh, Masahiro Yamashita, and Tomoteru Fukumura
2. 発表標題 Local structures and electronic properties of single molecule magnets TbPc2 on SrVO3(001)
3. 学会等名 12th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '19 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirofumi Oka
2. 発表標題 Spatially resolved magnetic anisotropy of Co nanostructures
3. 学会等名 Tohoku University GP-Spin seminar 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	米田 忠弘 (Komeda Tadahiro) (30312234)	東北大学・多元物質科学研究所・教授 (11301)	