

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K20878

研究課題名(和文) スピン偏極STMによる強磁性ナノ構造におけるスピン依存散乱の研究

研究課題名(英文) Spin-polarized STM study of spin-dependent scattering in ferromagnetic nanostructures

研究代表者

岡 博文(Oka, Hirofumi)

東北大学・多元物質科学研究所・研究支援者

研究者番号：70374600

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：強磁性金属へ電子が進入する際に、その界面での散乱確率は進入する電子のスピン方向と強磁性体の磁化方向に依存する。本研究は、ローカルプローブであるスピン偏極走査型トンネル顕微鏡を用いて、このスピン依存散乱現象を電子状態レベルかつナノメートルスケールで明らかにすることを目的とした。Cu(111)基板上に形成したCoナノ構造は中心部分と縁部分で異なる電子状態をもつことがわかり、中心部分の電子状態は縁部分の電子状態に散乱され電子定在波を形成することがわかった。その結果、Coの中心部分から縁部分へ進入する電子のスピン方向と縁部分のスピン方向に依存して、縁での反射率が変化することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：At the interface of ferromagnet and non-magnetic materials, the scattering probability of electrons strongly depends on their spin directions and magnetization directions of the ferromagnet. In this study, using spin-polarized scanning tunneling microscopy, we investigate the spin-dependent scattering phenomenon at electronic level and nano-meter scale. Co nanostructures on Cu(111) exhibit different electronic states at the center part and the rim area. We find that electrons of electronic states at the center scatter off not at the border of the nanostructure but at the "electronic" border between the center and rim areas, and form electronic standing waves within the center area. We reveal that the reflectivity of center-part electrons at the electronic border changes with the spin configuration of the electrons against the rim.

研究分野：表面電子物性

キーワード：スピン偏極STM 強磁性ナノ構造 スピン依存散乱 電子定在波

1. 研究開始当初の背景

非磁性金属から強磁性金属へ電子が進入する際に、その界面における散乱確率は、進入する電子のスピンの向きにより異なる。スピントロニクスデバイスにおいて重要な磁気抵抗効果は、このスピン依存散乱現象を起源にしている。この現象の電子状態レベルかつナノメートルスケールでの理解は、デバイスの高性能化と微細化に向けて、重要な課題である。

これまでスピンの散乱現象は、強磁性金属と非磁性金属を交互に積み重ねた多層膜に電流を流し、強磁性層の磁化の向きによる電流の変化から議論されてきた。また、スピンの散乱現象は強磁性層と非磁性層との界面でおこるため、積層した多層膜により隠れてしまい、スピン散乱に寄与する電子状態を明らかにすることは困難であった。

2. 研究の目的

そこで、本研究「スピン偏極 STM による強磁性ナノ構造におけるスピン依存散乱の研究」は、

- (1) 強磁性 Co ナノ構造の周りを他の材料で取り囲み、“見える”界面を作製する
- (2) ローカルプローブであるスピン偏極 STM を用いて、強磁性 Co ナノ構造内のスピン偏極電子状態が、ナノ構造周囲の物性（非磁性や強磁性）の違いにより、どのような変化を示すのかを明らかにする
- (3) 上記結果を基に、界面におけるスピン依存散乱を電子状態レベルかつナノメートルスケールで明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

Cu(111)基板に0.4原子層程度のCoを室温で蒸着し、Coナノ構造を作製した。CuとCoの合金化を防ぐため、Coを蒸着した後1分以内に、2K以下に冷却されたSTMヘッドにサンプルを移動した。測定は約4Kで、磁場を面直方向に印加し行った。

先行研究により、Coナノ構造は強磁性を示すこと、面直方向に磁化容易軸をもち単磁区構造をもつことが明らかにされている。

また、Coナノ構造はスピン偏極した2次元表面電子状態を示すことも報告されている[1]。この電子状態がナノ構造内に閉じこめられると、量子干渉効果により電子定在波が形成される。STMを用いて微分トンネルコンダクタンス(dI/dV)をマッピングすると、図1に示すように、Coナノ構造内に形成された電子定在波を画像化することができる。また、得られた dI/dV 像のフーリエ変換解析から、電子定在波を形成する電子状態の波長（波数ベクトル）と振幅強度を求めることができ、エネルギーと波数ベクトルの関係からバンド分散を得ることもできる。さらに、ス

ピン偏極 STM を用いると（図1）振幅強度の解析から、その電子状態のスピンの向きを特定することも可能となる。

本研究では、Coナノ構造内に形成された電子定在波の波長や振幅強度が、Coナノ構造を取り囲む物性の変化に対してどのように変化するのかを詳細に調べ、スピン依存散乱について議論する。

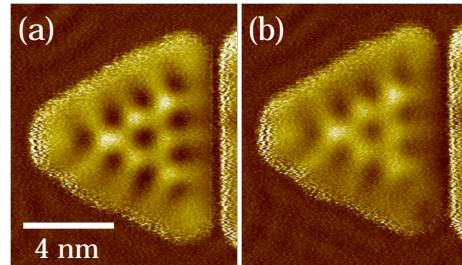


図1 Coナノ構造の微分トンネルコンダクタンス像。Coナノ構造とSTM探針の磁化が、(a)反平行配置 (b)平行配置で同一のCoナノ構造を測定。

4. 研究成果

- (1) スピン偏極 STM によるスピン分解バンド分散測定とスピン偏極2次元電子状態の発見

Coナノ構造の2次元表面電子状態のバンド分散を詳細に調べるため、図1に示した微分トンネルコンダクタンス測定を、 -0.3 V から $+1.5\text{ V}$ まで行った。得られた電子定在波をフーリエ変換解析し、バンド分散を求めた。その結果を図2に示す。スピン偏極 STM 探針とCoナノ構造の磁化が反平行状態の結果を上段に、平行状態での結果を下段に示す。

両方の結果において、2つの自由電子的な電子状態が得られた。低いエネルギーから分散する電子状態は、先行研究によりすでに報告されているマジョリティスピン sp バンドである[1]。一方、高いエネルギーから分散するもう一つの電子状態は、これまでに報告がなく、本研究が初めて明らかにしたものである。

図2の上段と下段を比較すると、強度に違いがあることがわかる。低いエネルギーから分散する電子状態では、上段つまり反平行状態での測定結果において強い強度が得られているが、高いエネルギーから分散する電子状態では、下段つまり平行状態で得られた結果で強度が強くなっている。この結果は、電子状態のスピンの向きが互いに反対方向を向いていることを示している。詳細な解析から、低いエネルギーから分散する電子状態はマジョリティスピンの性質をもち、高いエネルギーから分散するものはマイノリティスピンをもつことがわかった。低いエネルギーから分散する電子状態については、先行研究[1]の結果と一致する。

また、この結果は、スピン偏極 STM を用

いと、ナノ構造のバンド分散をスピン分解で求めることができることを実証しており、スピン偏極した電子状態を持つ他の材料（例えばトポロジカル絶縁体など）への応用が期待される。

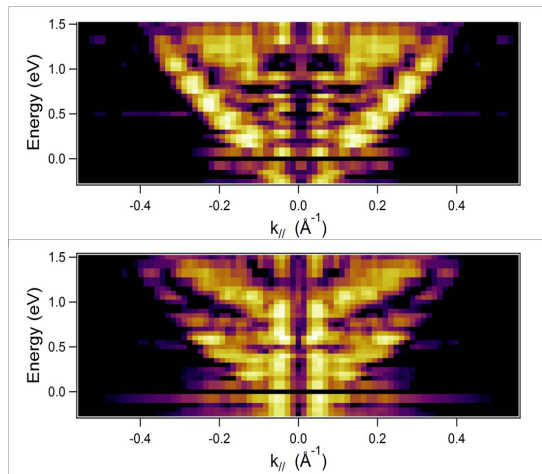


図 2 Co ナノ構造のスピン分解バンド分散。(上段)反平行配置 (下段)平行配置 で同一の Co ナノ構造の測定から得られた。

(2) スピン偏極ポテンシャルバリアの発見

図 2 の結果から、得られた電子状態は連続的な値を取らず、ナノ構造に閉じこめられたことに起因して量子化されていることがわかった。1 次元量子井戸モデルに基づき、量子化された各エネルギー準位の波数ベクトルを量子数 n に対してプロットした結果を、図 3 に示す。波数ベクトル k は、量子数 n と量子井戸の幅 d を用いて、 $k = n\pi/d$ と表されるので、図 3 のデータ点に対する線形フィットから、スピン偏極した 2 次元表面電子状態の電子が閉じ込められている量子井戸の幅 d を見積もることができる。

線形フィットの結果から、マジョリティースピンとマイノリティースピン電子状態に対する量子井戸の幅は、それぞれ、 6.1 ± 0.2 nm、 5.8 ± 0.1 nm と得られた。しかしながら、STM 像（形状像）から得られた Co ナノ構造の物理的な幅は約 7.5 nm となり、上記解析から得られた量子井戸の幅とは大きく異なることがわかった。

Co ナノ構造の縁には、ナノ構造の中央部分とは異なる電子状態が局在している[2]。2 次元表面電子状態の電子は、Co ナノ構造の物理的な端に到達する前に、電子状態の境界で散乱され電子定在波を形成していると考え、上述のような違いが得られることをうまく説明できる。この考察から、Co ナノ構造の縁に局在する電子状態が量子井戸のポテンシャルバリアの役目を果たしていると言える。その電子状態もスピン偏極している[2]ため、Co ナノ構造内部の 2 次元表面電子状態はスピン偏極したポテンシャルバリアにより閉じこめられているとみなすことができる。

当初の計画では、Co ナノ構造の周りを他の材料で囲むことにより、スピン依存散乱を研究する界面を形成する予定であった。しかし、上記結果より、Co ナノ構造単体でもその目的が達成できることがわかった。

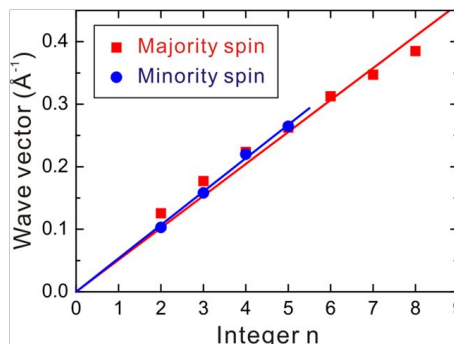


図 3 Co ナノ構造内で量子化された各エネルギー準位の波数ベクトルを量子数に対してプロットしたグラフ。線形フィットから量子井戸の幅を見積もった。

(3) スピン偏極ポテンシャルバリアによるスピン依存散乱

Co ナノ構造の縁に局在するスピン偏極した電子状態は、フェルミレベル (0 V) 近傍で、その符号を変化させることが先行研究により報告されている[2]。そこで、0 V から +0.13 V まで 5 mV ステップで、Co ナノ構造の微分トンネルコンダクタンス測定を行い、得られた電子定在波のフーリエ変換解析を行った。図 4 の挿入図は、電子定在波のフーリエ変換から得られた結果である。白丸で示す輝点に注目し、その強度をエネルギーの関数としてプロットした結果を図 4 に示す。

エネルギーの増加に伴って輝点の強度も増加しているが、+0.05 eV 付近でその増加が不連続になることがわかった。輝点の強度は電子定在波の振幅に相当するため、+0.05 eV を境に、定在波の振幅が変化したと考えられる。その理由として、2 次元表面電子状態の電子のポテンシャルバリアによる反射率が変化したことが考えられる。

測定したエネルギーの範囲では、図 2 の結果より、Co ナノ構造内部はマジョリティースピン電子状態により電子定在波が形成されている。一方、Co ナノ構造の縁では、上述したようにスピン偏極度の符号が変化する。先行研究の結果[2]より、+0.05 eV 以下ではマイノリティースピンが、+0.05 eV 以上ではマジョリティースピンが優勢であるとわかる。つまり、Co ナノ構造では、マジョリティースピン電子が、+0.05 eV 以下ではマイノリティースピンポテンシャルバリアに、+0.05 eV 以上ではマジョリティースピンポテンシャルバリアに散乱される状況にあると考えられる。この状況を考慮すると、マジョリティースピン電子は、同じスピンの向きをもつマジョリティースピンポテンシャルバリアに比べて、反対向きのスピンをもつマ

イノリティースピンポテンシャルバリアにより強く反射されると言える。または、マジョリティースピン電子は、同じスピンの向きをもつマジョリティースピンポテンシャルバリア中へ透過する確率が高いということもできる。この結果は、「同じスピンをもつ界面での散乱が反対スピンをもつ界面での散乱より小さいため、磁化配置に依存して電気抵抗が変化する」という磁気抵抗効果の現象論的描像を、電子状態レベルで直接観察できていることを示している。

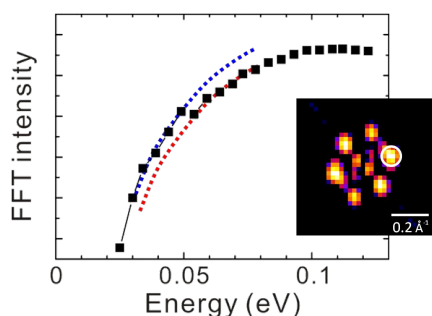


図 4 Co ナノ構造の微分トンネルコンダクタンス像から計算したフーリエ変換像（挿入図）の輝点（挿入図中の白丸）の強度をエネルギーに対してプロットしたグラフ。

<引用文献>

- [1] L. Diekhöner, et al., PRL 90, 236801 (2003).
 [2] O. Pietzsch, et al., PRL 96, 237203 (2006).

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 0 件)

現在、執筆中で、1 件投稿中である。

〔学会発表〕(計 14 件)

- (1) 岡 博文、米田忠弘 “Co ナノ構造におけるスピン偏極ポテンシャル障壁による量子閉じ込め効果” 日本物理学会 第 72 回年次大会(2017 年)、2017 年 3 月 17 日～20 日、大阪大学(大阪府・豊中市)
- (2) Hirofumi Oka, Tadahiro Komeda “Spin-resolved dispersion relation of a single Co island”, Symposium on Surface and Nano Science 2017, Jan. 11-15, 2017, Furano (Hokkaido)
- (3) 岡 博文、米田忠弘 “単一 Co アイランドのスピン分解バンド分散” 2016 年 11 月 25 日～26 日、表面・界面スペクトロスコピー-2016、岩沼屋(宮城県・仙台市)

(4) 岡 博文 “スピン偏極 STM による強磁性 Co ナノアイランドのスピン分解バンド構造の測定” 物性研短期研究会「走査トンネル顕微鏡による物性研究の現状と展望」、2016 年 10 月 31 日～11 月 1 日、東大物性研(千葉県・柏市)(招待講演)

(5) 岡 博文、米田忠弘 “スピン偏極 STM による強磁性 Co ナノアイランドのスピン分解バンド構造の測定” 2016 年 9 月 13 日～16 日、日本物学会秋季大会、金沢大学(石川県・金沢市)

(6) 岡 博文、Puneet Mishra、齊志坤、米田忠弘 “Au(111)基板上 Co の磁気異方性エネルギーの被覆率依存性：スピン偏極 STM による研究” 2016 年 9 月 13 日～16 日、日本物学会秋季大会、金沢大学(石川県・金沢市)

(7) Hirofumi Oka, Puneet Mishra, Zhikun Qi, Tadahiro Komeda, “Coverage dependent magnetic anisotropy in Co islands on Au(111)” 6th Spin-polarized scanning tunneling microscopy international conference, Aug. 29-31, 2016, Chiba University (Chiba)

(8) Hirofumi Oka, Tadahiro Komeda, “Spin-resolved dispersion relation of a single Co island”, 6th Spin-polarized scanning tunneling microscopy international conference, Aug. 29-31, 2016, Chiba University (Chiba)

(9) 岡 博文 “強磁性ナノ構造におけるスピン依存量子干渉” 第 63 回応用物理学会春季学術講演会、2016 年 3 月 19 日～22 日、東工大(東京都・目黒区)(招待講演)

(10) 岡 博文、米田忠弘 “強磁性 Co ナノ構造のスピン依存量子干渉” 日本表面科学会東北・北海道支部学術講演会、2016 年 3 月 9 日～10 日、東北大学(宮城県・仙台市)

他共著 4 件

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡 博文 (OKA, Hirofumi)

東北大学・多元物質科学研究所・研究支援者

研究者番号：70374600