

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：17401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25870548

研究課題名(和文) バリスティック伝導を用いた超高感度局所磁気センサーの開発と応用

研究課題名(英文) Development and application of extremely sensitive local magnetic sensor by using ballistic transport properties

研究代表者

原 正大 (HARA, Masahiro)

熊本大学・大学院先端科学研究部(理)・准教授

研究者番号：50392080

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：バリスティック特性を持つ二次元電子ガスの曲がり抵抗を測定することで、長方形型磁性体のエッジ部分の磁化状態を高感度に検出できることを示した。半古典的なシミュレーションにより、磁気センサーの構造と局所磁場の空間分布を最適化することで、感度が向上することが分かった。その結果、100 nm サイズの磁性体の磁化過程を観測することに成功した。X線磁気円二色性測定により、Mnドープ酸化チタンナノシートの磁気的な挙動を調べることも行った。単層ナノシートでMn原子がわずかに強磁性を示した。また、上に積層したFeとMnドープナノシートが反強磁性的に結合することが明瞭に観測された。

研究成果の概要(英文)：We have demonstrated a highly sensitive detection of magnetic states in the edge of a rectangular ferromagnet by measuring a bend resistance of a ballistic two-dimensional gas. A semiclassical simulation reveals that the sensitivity increases when the geometry of the sensor and the spatial distribution of the local field are optimized. We have successfully observed a magnetization process in a ferromagnetic dot with the size of 100 nm. We have also investigated the magnetic behaviors of chemically exfoliated Mn-doped titania nanosheets by X-ray magnetic circular dichroism. Mn atoms in the single-layer nanosheets showed a weak ferromagnetic order. We clearly observed an anti-ferromagnetic coupling between Fe overlayers and the Mn-doped nanosheets.

研究分野：ナノ構造物理

キーワード：バリスティック伝導 二次元電子系 グラフェン 微小磁性体 ナノシート XMCD

1. 研究開始当初の背景

ナノテクノロジーの飛躍的な進歩により、トップダウン・ボトムアップの両方のアプローチからナノメートルスケールの超微細構造が作製できるようになってきている。それらが生じる磁場は局所的で微弱であるため、新しい検出原理に基づく磁気センサーの開発が期待される。

2. 研究の目的

半導体二次元電子系やグラフェンのバルスティック伝導特性を用いて、超高感度の局所磁気センサーを開発する。シミュレーションと実験の両面から、高感度化のための素子構造の最適化を行う。開発した磁気センサーを、磁気ナノ粒子や磁気ナノシートの高感度検出などの多方面の研究に応用する。

3. 研究の方法

平均自由行程が1ミクロンを超える素子では電子が弾道的（バルスティック）に伝播し、負の曲がり抵抗等の特徴的な現象が観測されることが知られている。本研究では、数値シミュレーションによる予測や結果の吟味を行いながら、バルスティック伝導特性を活かした磁気センサーの高感度化と応用研究を進める。

4. 研究成果

(1) 曲がり抵抗測定による磁性体端の磁化状態の高感度検出 (発表論文③)

1ミクロン程度の微細ホール素子をGaAs/AlGaAs半導体二次元電子系基板を用いて作製し、長方形の磁性体（パーマロイ）の端から生じる漏れ磁場を検出する実験を行った。図1は作製素子の電子顕微鏡画像である。

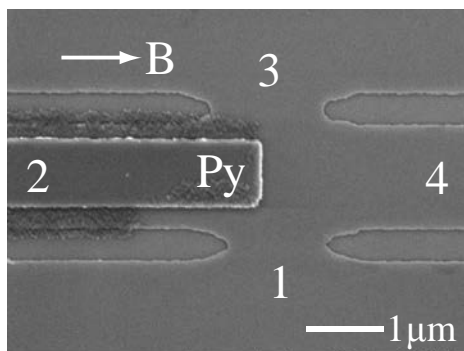


図1：作製素子の電子顕微鏡画像

長方形の長辺方向に沿って面内磁場を印加すると、磁性体端からの漏れ磁場がホール素子を貫くため、ホール抵抗を測定した場合、図2(a)に示すような磁性体全体の磁化に対応したシグナル変化が得られる。一方、曲がり抵抗（端子1・4間に電流を流し、端子2・3間の電圧を測定）では、図2(b)のように高磁場側で抵抗のとびが見られるなど、特異的なシグナル変化を示した。

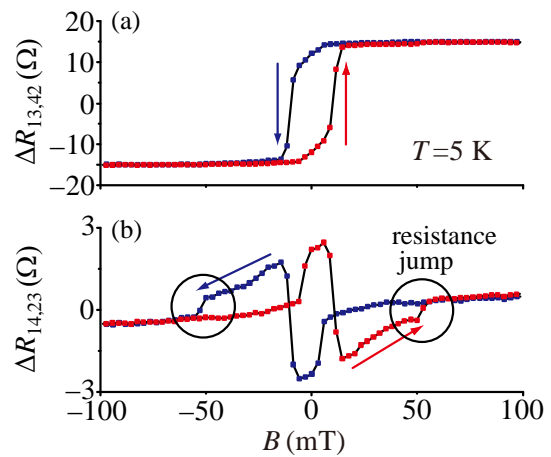


図2：面内磁場印加に対する(a)ホール抵抗変化と(b)曲がり抵抗変化

高磁場側の曲がり抵抗変化を理解するために、長方形磁性体の磁気シミュレーションを行った。その結果、磁性体内部の磁化が外部磁場の向きに揃っている場合でも、端付近では磁化が傾いており、その挙動が曲がり抵抗で検出されていることが分かった。

ビリヤードモデルにより曲がり抵抗変化の数値シミュレーションを行い、実験と比較を行ったところ、図3(a)のように高磁場側の振る舞いを再現することが出来た。50 mT付近の抵抗のとびは、Flower stateと呼ばれる磁化状態への不連続な磁化の変化を反映したものであり、磁性体端付近のわずかな磁化変化を高感度に検出できていることが分かった。

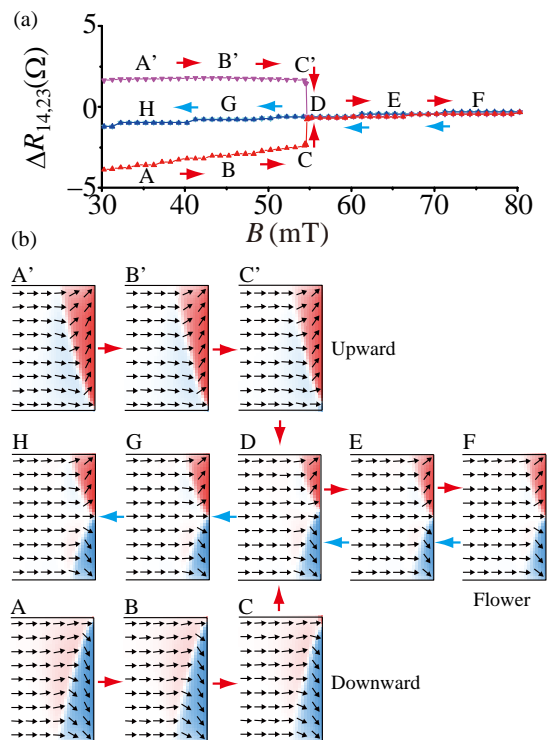


図3：(a)曲がり抵抗変化のシミュレーション結果 (b)対応する各磁化状態

(2) 高感度検出のための素子構造最適化 (発表論文②)

曲がり抵抗を用いた局所磁場検出のさらなる高感度化を実現するために、素子構造や検出する磁性体の位置の違いによるシグナル変化のシミュレーションを行った。

図4(c)に示すように、向かい合う2端子を狭窄した素子で磁性体を中心に配置した場合、最もシグナル変化が大きくなることが分かった。

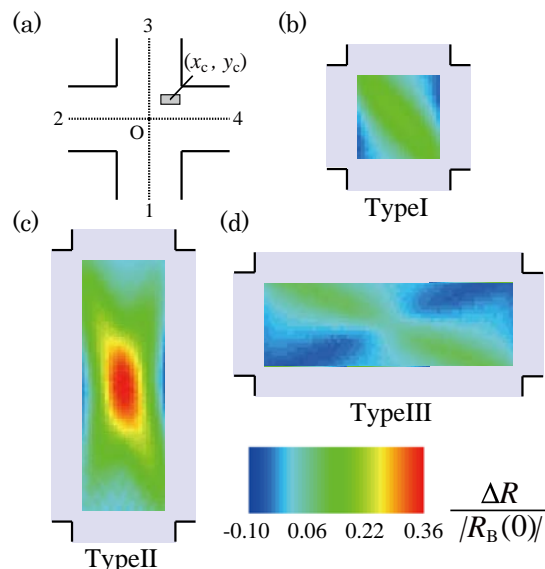


図4：素子構造と磁性体位置による曲がり抵抗変化率のシミュレーション

シミュレーション結果をふまえて、図5に電子顕微鏡画像を示す素子を作製し、素子中心に配置した微小パーマロイドドットからの漏れ磁場検出を試みた。ここで、パーマロイドドットのサイズは100 nm×200 nm×30 nmであり、飽和磁化の大きさは 5×10^{-13} emu程度である。

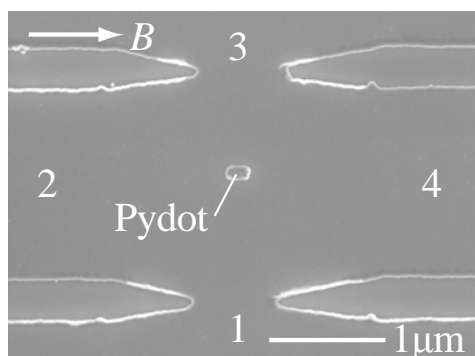


図5：作製素子の電子顕微鏡画像

図6は面内磁場を印加した際の曲がり抵抗(端子1・4間に電流を流し、端子2・3間の電圧を測定)の変化である。パーマロイドドットの磁化過程に応じたシグナルの変化を明瞭に観察することができた。

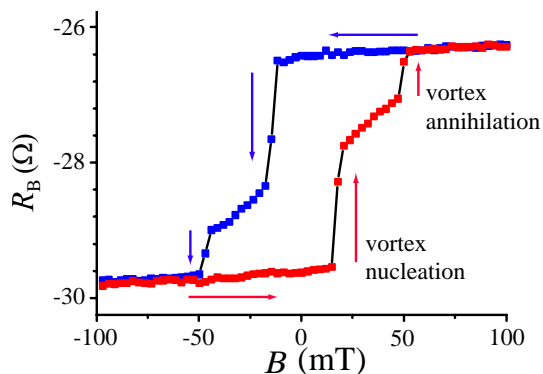


図6：面内磁場印加に対する曲がり抵抗変化

(3) Mnドーパ酸化チタンナノシートの磁気特性 (発表論文①)

開発した磁気センサーの応用例の一つとして強磁性を示すナノシートの磁化検出を目標とした。その準備段階として、Mnドーパ酸化チタンナノシートの磁気特性を調べるため、広島大学放射光科学研究センターのビームラインでX線磁気円二色性(XMCD)測定を行った。

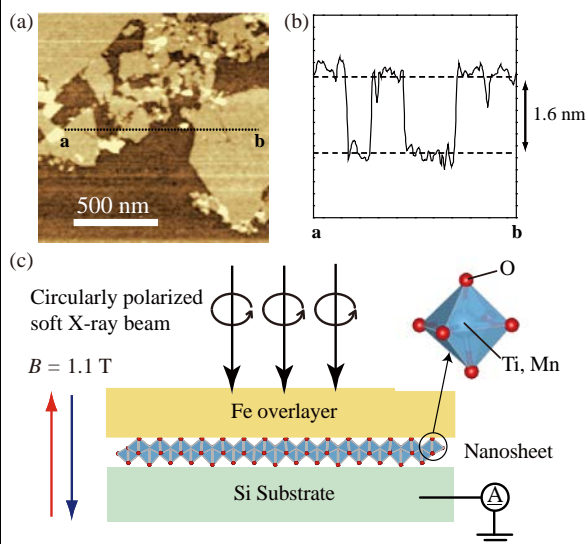


図7：(a) Mnドーパ酸化チタンナノシートの原子間力顕微鏡画像 (b) a-b間の断面図 (c) XMCD測定と試料の概念図

Mnドーパ酸化チタンナノシートはMnドーパされた層状チタン酸化物を溶液中で化学的に剥離することにより得られる。Langmuir-Blodgett法を用いて、導電性シリコン基板上にナノシートが単層の状態に密集した試料を作製した。図7(a)(b)は試料の原子間力顕微鏡画像及び断面図であり、平面方向のサイズは数100ナノメートル、厚さは1.6ナノメートル程度のナノシートが存在していることが確認できる。図7(c)のように、試料に対して垂直に軟X線偏光放射光を照射し、垂直磁場の向きを変化させながら、光電流を検出する方法でXMCD測定を行った。

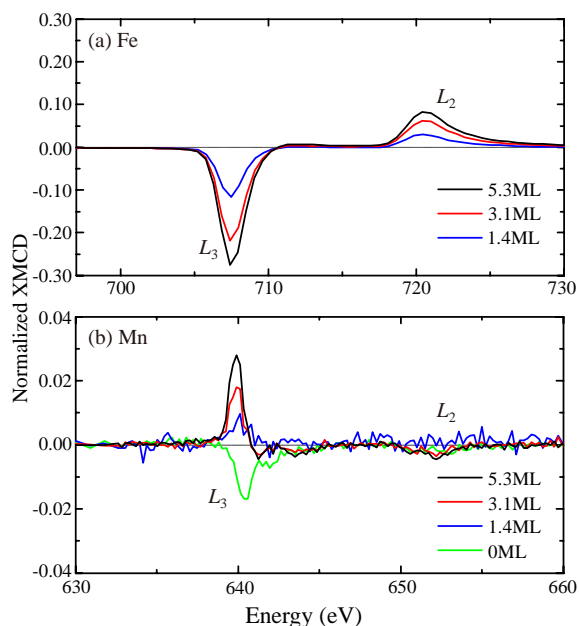


図8 : (a) ナノシート上に蒸着した Fe の XMCD スペクトル (b) ナノシートにドーピングされた Mn の XMCD スペクトル

本実験ではナノシート上に強磁性体である Fe を蒸着することで、ナノシート中の Mn と Fe の磁気的相互作用を調べる実験も行った。図8 (a) は Fe の XMCD スペクトルであり、Fe の膜厚に応じてシグナルが大きくなっていることが分かる。

図8 (b) は Mn の XMCD スペクトルであり、Fe が存在しない時に有意なシグナルが見えていることから、Mn に強磁性の秩序が生じていることが示唆される。また、Fe を蒸着することで、シグナルの反転が見られることから、Mn と Fe は反強磁性的に相互作用していることが分かった。

【研究成果のまとめと今後の展望】

半導体二次元電子系を用いた磁気センサーにおいては、実験結果とシミュレーションが良い一致を示しており、高感度化へ向けた研究を着実に進めることが出来た。グラファイトの単原子層であるグラフェンを用いることで、さらに高感度化が期待できると予想していたが、平均自由行程が長いグラフェン素子の作製が技術的に難しく、現時点では明確な実験結果を得るところまでは至っていない。本研究を進める中で、グラフェンや酸化物ナノシートの伝導や磁性に関する知見が得られたことから、研究計画最終年度より基盤研究 (C) 「二次元シート複合素子におけるスピン制御と検出」という新規課題で計画を再構築して研究を継続している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計3件)

- ① N. Saitou, Y. Hirano, M. Sawada, H. Namatame, M. Taniguchi, T. Taniguchi, Y. Matsumoto, M. Hara,
“Magnetic proximity effects between

single-layer Mn-doped titania nanosheets and Fe overlayers”,
Journal of the Physical Society of Japan,

査読有, Vol. 85, 2016, 035002-1~2.

DOI: 10.7566/JPSJ.85.035002

- ② Y. Kanda, T. Nomura, T. Kimura, M. Hara,
“Geometrical optimization of a local ballistic magnetic sensor”,
Applied Physics Letters,
査読有, Vol. 104, 2014, 142408-1~4.
DOI: 10.1063/1.4871002
- ③ T. Matsunaga, K. Furukawa, Y. Kanda, M. Hara, T. Nomura, T. Kimura,
“Detection of edge magnetic state by a ballistic bend resistance measurement”,
Applied Physics Letters,
査読有, Vol. 102, 2013, 252405-1~4.
DOI: 10.1063/1.4812729

〔学会発表〕 (計4件)

- ① M. Hara,
“Photoresponse and magnetism in single-layer titanium oxide nanosheets”, 21st International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems, 2015年7月28日, Sendai International Center (宮城県仙台市)
- ② M. Hara,
“UV Photoresponse and magnetic control of single-layer titania nanosheets”, Graphene 2015, 2015年3月12日, Bilbao (Spain)
- ③ 原 正大,
「化学剥離酸化チタンナノシートの伝導と磁性」, 日本物理学会第70回年次大会, 2015年3月24日, 早稲田大学 (東京都新宿区)
- ④ M. Hara,
“Local magnetic sensor for a single ferromagnetic dot by using a ballistic two-dimensional electron gas”, International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology, 2013年12月11日, Kauai (USA)

〔その他〕

ホームページ等

<http://crocus.sci.kumamoto-u.ac.jp/physics/meso/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原 正大 (HARA, Masahiro)

熊本大学・大学院先端科学研究部・准教授
研究者番号: 50392080