

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：14301
 研究種目：若手研究(A)
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21681021
 研究課題名（和文）電気的な磁化操作に関する研究

研究課題名（英文）Electrical control of magnetization

研究代表者
 千葉 大地（CHIBA DAICHI）
 京都大学・化学研究所・准教授
 研究者番号：10505241

研究成果の概要（和文）：磁石の磁力や磁極の向きを電氣的に操ることを目的とし、研究を進めてきた。磁石と半導体の性質を併せ持つ材料において、電界を加えることで磁石の性質を失う温度を変えたり、磁極の向きをスイッチすることに成功した。また、電界による効果のメカニズムに深く迫ることができた。金属の磁石であるコバルトにおいても、磁力のオン・オフを電界で引き起こすことに世界で初めて成功した。同現象は室温で観測でき、応用上重要なステップとなった。

研究成果の概要（英文）：To control magnetism and magnetization direction by electrical means is main purpose of this research. By using ferromagnetic semiconductors, an electric-field induced ferromagnetic phase transition and magnetization switching have been achieved. Furthermore, we observed ferromagnetic phase transition by applying an electric field even in a ferromagnetic metal for the first time at room temperature.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	12,600,000	3,780,000	16,380,000
2010年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2011年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
総計	20,200,000	6,060,000	2,626,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学、マイクロ・ナノデバイス

キーワード：スピンドバイス、磁化制御、磁気メモリ、磁気異方性、電界効果

1. 研究開始当初の背景

ハードディスクや磁気メモリなどの磁気記録装置では、磁化方向をスイッチさせることで情報の書き込みを行っている。外部から磁界を印加することで、磁化方向をスイッチすることができるが、スピン偏極した電流を磁石に直接印加してこれを行う方法が次世代の書き込み手法として大きな注目を集めていた。一方で、著者らは強磁性半導体に絶縁膜を介して電圧を印加することで、電界を

加え、磁性を制御する研究を行ってきた。強磁性半導体は文字通り磁石と半導体の性質を併せ持つ材料であり、キャリア濃度はその磁性を決める一つの大きな要素である。著者らは、電界を印加することで等温で磁気相転移を誘起できることを世界で初めて示した。また、電界で反転磁界を一時的に下げること、電界誘起の磁化スイッチングが引き起こせることを報告した。また、磁化方向が電界で変化していることも見出した。このように、

磁化を制御する手法として、電界という新しい手段が活用できる可能性を示してきた。

2. 研究の目的

電界による磁化操作は、絶縁膜を介してゲート電極と磁性層の間に電圧を印加することで行う。したがって、電流や外部磁界を用いない新しい磁化操作方法が実現できる可能性がある。これは、極めて省エネな磁化反転手法となりうる。本研究では主に、電界で磁化をスイッチする手法を開拓することを目的とした。著者らが研究に用いてきた代表的な強磁性半導体である(Ga,Mn)Asは強磁性転移温度が年々向上しているとはいえ、依然として室温に至っていない(最高で190 K)。本研究では室温での動作を実現するために、強磁性金属も含め様々な強磁性体において電界で磁化が反転できないかどうかの調査も並行して行うこととした。また、電界を印加することで磁性が変化するメカニズムの解明も目指した。

3. 研究の方法

強磁性半導体である(Ga, Mn)Asにおいて、電界誘起磁化スイッチングを引き起こすことを最大の目的とし、試料成膜、素子加工、測定を行った。試料は東北大学電気通信研究所の大野英男教授所有の分子線エピタキシー装置で製膜を行った。室温での動作を目指した実験にはコバルトの超薄膜を用いた。試料はNECの深見俊輔氏・石綿延行氏より提供いただいた。電界を印加するためのキャパシタンス構造を持つ素子はフォトリソグラフィ・原子層堆積装置(当資金にて購入)・金属蒸着装置(当資金にて購入)を用いて作製した。冷凍機やクライオスタットを用いた磁気輸送測定、SQUIDによる磁化測定を行って特性を評価した。

詳しい内容は4で述べるが、電気二重層(EDL)キャパシタを構成し、より多くのキャリア濃度を制御する試みも行った。(Ga, Mn)As素子においてEDLを形成するために用いた電解質溶液は東北大学金属材料研究所岩佐義宏教授より提供いただき、共同で実験を行った。また、コバルト超薄膜素子においてEDLを形成するために用いたイオン液体は電力中央研究所小野新平氏から提供いただいた。

4. 研究成果

(1) 電気二重層を用いたGaMnAsのキュリー温度の制御

ホールバー形状の(Ga, Mn)As上に電解質液体を塗布し、液体中に置いたゲート電極と(Ga, Mn)Asの間に電圧を加えることで、(Ga, Mn)As表面にイオンを密集させることができる。これにより、(Ga, Mn)As表面に電気

的に異符号のキャリアを注入することができる。イオンと注入されたキャリアの二層の電荷層を電気二重層と呼ぶ。これによりわずか数Vの電圧で(Ga, Mn)Asの磁気転移温度を10 K以上変調することに成功した。この成果はApplied Physics Lettersに掲載された。

(2) 異常ホール効果の電界効果

強磁性体においてホール測定を行うと、材料の磁化の大きさに比例したホール抵抗が観測される。これを異常ホール効果という。ゲート電極/絶縁膜/(Ga, Mn)Asキャパシタンス構造において、ゲート電界によりキャリア濃度を変調すると、多くの試料において、伝導率と異常ホール伝導率が一つのスケールンクカーブに乗ることが分かった。一部の試料では異常ホール係数の符号が逆転することも分かった。これらの結果は異常ホール効果の物理を理解する上で重要な知見を与えるものと考えられる。この成果はPhysical Review Lettersに掲載された。

(3) 電界誘起磁化スイッチングのシミュレーション

電界のみにより磁化をスイッチできる条件をシミュレーションによって報告した。GaAs(001)基板に製膜した(Ga, Mn)Asは面内に一つの二軸の異方性と二つの一軸異方性をもつ。二つの一軸異方性の符号が電界で反転できれば、磁化スイッチングを引き起こせることを示した。また、磁化のダイナミクスを利用しても磁化スイッチングが引き起こせることが分かった。本成果はApplied Physics Lettersに掲載された。

(4) 電界による強磁性ナノドットの形成

(Ga, Mn)As上に絶縁膜を介して形成したゲート電極をメッシュ状にすることで、ゲート電極の真下だけ常磁性状態にし、残された部分に強磁性ナノドットの集合体を形成することに成功した(図1)。これは、半導体での量子現象を観察するために広く用いられてきた手法である次元制御(例えば二次元的な膜を一次元的なドットにするなど)を、磁性体について初めて行ったものであり、磁性体構造をdefineする新手法となりうる。本成果はNano Lettersに掲載された。

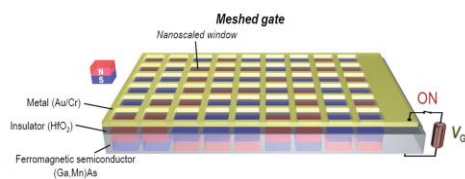


図1 強磁性ナノドットを電界でdefineする概念図。

(5) GaMnAs における電界による磁化スイッチの観測

ゲート電極/絶縁膜/(Ga, Mn)As キャパシタンス構造において、ある特定の方向に (Ga, Mn)As の磁化方向を初期化してから電界を掃引すると、無磁場で磁化スイッチングを引き起こせることを見つけた。しかし、磁化をもとの磁化方向に戻すには磁場のサポートを要する。詳しい解析により、磁化スイッチの際に乗り越えるエネルギー障壁高さが電界により変化していることが分かった。また、観測された反転は準安定状態から安定状態への磁化スイッチングである可能性がある。本成果は The 6th International Conference on the Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors (PASPS 6)にて報告した。

(6) 電界によるコバルトの磁気相転移の観測

強磁性半導体での実験は 100 K 以下で行っており、室温での動作が応用上は重要である。そこで、代表的な遷移金属強磁性体を用いて実験を進めることとした。Co/Pt 系は垂直磁気異方性を持つ系として知られており、広く研究されている系である。ゲート電極/絶縁膜/Co/Pt キャパシタンス構造において実験を行ったところ、ゲート電界により強磁性相転移が引き起こせることを示すことに成功した(図2)。強磁性転移温度は±10 V のゲート電圧で約 12 K 程度変化していることが分かった。強磁性金属において電界で強磁性相転移を誘起したことはこれが初めてのことであり、室温付近で観測できることから応用上の価値も高いと考えられる。本成果は Nature Materials に掲載された。

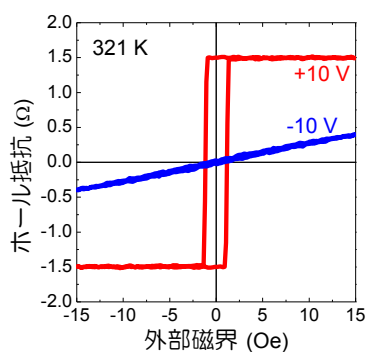


図2 ゲート電極/絶縁膜/Co/Ptキャパシタンス構造において観測した磁化曲線。+10 V, -10 Vはゲート電圧を示す。正のゲート電圧では強磁性的なヒステリシスを示しているのに対し、負の電圧では直線的な応答を示していることが分かる。これはゲート電界によって等温で磁気相転移が制御できていることを示す。

(7) 電気二重層を利用したコバルトのキュリー温度の巨大制御の実現

イオン液体を用いてコバルト表面に電気二重層を形成し、磁化測定を用いて磁化の変化、強磁性相転移温度の変化を観測した。その結果、固体絶縁膜素子の1/5の動作電圧で室温をまたいで100 K程度強磁性相転移温度を変化させることに成功した(図3)。この成果は Applied Physics Letters に掲載された。

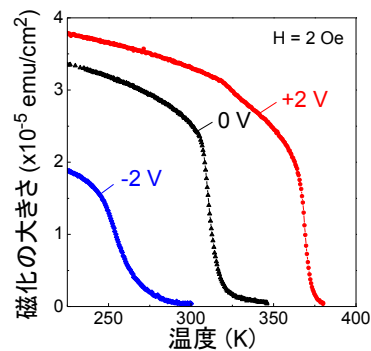


図3 各ゲート電圧印加時の磁化の温度依存性。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計13件)

- ① K. Shimamura, D. Chiba, S. Ono, S. Fukami, N. Ishiwata, M. Kawaguchi, K. Kobayashi, and T. Ono, "Electrical control of Curie temperature in cobalt using an ionic liquid film", Applied Physics Letters, 査読有, 100巻, 2012, 122402(1)-(3), DOI: 10.1063/1.3695160.
- ② D. Chiba, S. Fukami, K. Shimamura, N. Ishiwata, K. Kobayashi, T. Ono, "Electrical control of the ferromagnetic phase transition in cobalt at room temperature", Nature Materials, 査読有, 10巻, 2011, 853-856, DOI: 10.1038/NMAT3130.
- ③ D. Chiba, F. Matsukura, and H. Ohno, "Electrically defined ferromagnetic nanodots", Nano Letters, 査読有, 10巻, 2010, 4505-4508, DOI: 10.1021/nl102379h.
- ④ D. Chiba, Y. Nakatani, F. Matsukura, and H. Ohno, "Simulation of magnetization switching by electric-field manipulation of magnetic anisotropy", Applied Physics Letters, 査読有, 96巻, 2010, 192506(1)-(3), DOI:10.1063/1.3428959.
- ⑤ D. Chiba, A. Werpachowska, M. Endo, Y.

Nishitani, F. Matsukura, T. Dietl, and H. Ohno, "Anomalous Hall Effect in Field-Effect Structures of (Ga,Mn)As", Physical Review Letters, 査読有, 104 巻, 2010, 106601(1)-(4), DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.106601.

- ⑥ Y. Nishitani, D. Chiba, M. Endo, M. Sawicki, F. Matsukura, T. Dietl, and H. Ohno, "Curie temperature versus hole concentration in field-effect structures of $Ga_{1-x}Mn_xAs$ ", Physical Review B, 査読有, 81 巻, 2010, 045208(1)-(8), DOI: 10.1103/PhysRevB.81.045208.
- ⑦ M. Endo, D. Chiba, H. Shimotani, F. Matsukura, Y. Iwasa, and H. Ohno, "", Applied Physics Letters, 査読有, 96 巻, 2010, 022515(1)-(3), DOI: 10.1063/1.3277146.

[学会発表] (計 26 件)

- ① D. Chiba, K. Kobayashi, T. Ono, F. Matsukura, H. Ohno, "Electric field control of ferromagnetism in III-V ferromagnetic semiconductor structures", Moscow International Symposium on Magnetism, 2011/8/23, モスクワ・ロシア
- ② D. Chiba, S. Fukami, K. Shimamura, N. Ishiwata, K. Kobayashi, T. Ono, "Modulation of coercivity by electric fields in Co/Pt ultra-thin films", 5th International Workshop on Spin Currents, 2011/7/25, 仙台国際センター
- ③ D. Chiba, K. Kobayashi, T. Ono, F. Matsukura, and H. Ohno, "Magnetization switching and nano-dot formation by electric field in (Ga,Mn)As structure", Super-PIRE / Reimei /MWN Joint Kickoff Meeting, 2010/10/30, ノックスビル・米国
- ④ D. Chiba, M. Sawicki, Y. Nishitani, Y. Nakatani, T. Ono, F. Matsukura, and H. Ohno, "Electric-field manipulation of magnetic anisotropy in (Ga,Mn)As", Advances in Magnetic Nanostructures, 2009/10/8, ヴェイル・米国
- ⑤ D. Chiba, M. Sawicki, Y. Nishitani, Y. Nakatani, T. Ono, F. Matsukura, and H. Ohno, "Electric-field manipulation of magnetization vector in (Ga,Mn)As", The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, 2009/7/21, 神戸国際会議場
- ⑥ D. Chiba, M. Sawicki, Y. Nishitani, Y.

Nakatani, T. Ono, F. Matsukura, and H. Ohno, "Electric field manipulation of magnetic anisotropy in ferromagnetic semiconductors", International Magnetism Conference, 2009/5/5, サクラメント・米国

[産業財産権]
○出願状況 (計 件)

名称: 電圧駆動型電磁石
発明者: 千葉大地、小野輝男
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2011-196860
出願年月日: 2011/9/9
国内外の別: 国内

[その他]
報道関連情報

- ①2011年10月3日, 京都新聞朝刊 22 面, "永久磁石の磁力 完全オフ"
②2011年10月3日, 朝日新聞朝刊 34 面, "薄い磁石に電圧 磁力消えた",
③2011年10月3日, 日本経済新聞朝刊 11 面, "室温で磁力ゼロに"
④2011年10月3日, 毎日新聞朝刊 21 面, "室温で磁性をオン・オフ"
⑤2011年10月3日, 中日新聞朝刊 32 面, "コバルトに電圧 金属の磁性消す"

6. 研究組織

(1) 研究代表者

千葉 大地 (CHIBA DAICHI)
京都大学・化学研究所・准教授
研究者番号: 10505241

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし