

平成 22 年 4 月 8 日現在

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2006 ～ 2009
 課題番号：18206001
 研究課題名（和文） 磁性半導体・半導体ハイブリッド構造におけるスピン三端子デバイス
 研究課題名（英文） Spin based three terminal device using magnetic semiconductor/non-magnetic semiconductor hybrid structures
 研究代表者
 新田 淳作（NITTA JUNSAKU）
 東北大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：00393778

研究成果の概要（和文）：

半導体 InGaAs チャネルを細線化することによりスピン緩和が抑制されることを見出した。さらにゲート電圧によりスピン軌道相互作用の強さを制御することにより、二次元電子ガスの場合と比べて大幅にスピン緩和長が増加することを実験的に成功した。磁性半導体 GaMnAs 細線構造を作製し、磁気異方性定数及び磁化反転過程を評価した結果、人工的に磁気異方性を導入できることを確認した。3層 GaMnAs ダブルバリアトンネルトランジスタ構造の作製条件を最適化し、電流増幅率= コレクタ電流/ベース電流が適当なバイアス条件化で1以上となり増幅機能を得ることに成功した。

研究成果の概要（英文）：

We have found that spin relaxation is suppressed in narrow InGaAs wires. Furthermore, the spin relaxation length is much enhanced by controlling spin-orbit interaction through gate voltage on top of the InGaAs wires. We have confirmed that magnetic anisotropy of magnetic semiconductor GaMnAs can be artificially introduced by making its wire-width narrower. A fabricated GaMnAs double-tunnel-barrier transistor has shown a current gain (= collector current/ base current) under particular bias condition.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	23,400,000	7,020,000	30,420,000
2007年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2008年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2009年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
年度			
総計	38,400,000	11,520,000	49,920,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目： 応用物理学・工学基礎・応用物性・結晶工学

キーワード：半導体

1. 研究開始当初の背景

近年注目されているスピントロニクスは、1988年に A. Fert と P. Gruenberg により発見された GMR (Giant Magneto-Resistance) に端

を発する。磁性体金属をベースとしたスピントロニクスの研究は、センサー及び MRAM (Magnetic Random Access Memory) の開発は企業を含めて多くの大学、研究機関で活発に

研究が進められ、その一部は実用化されている。これらの功績により彼ら 2 人は 2007 年ノーベル物理学賞を受賞した。しかしながら、金属をゲート電界により制御するのは極めて困難で三端子化、トランジスタ化ができないためメモリーやセンサーなどに限られトランジスタなどの能動デバイスを実現するのは困難である。半導体の特徴は、ゲート電界によるキャリアの制御にあり、半導体を用いたスピントランジスタへ向けての実験と試みは世界中で進められているが、まだ成功した報告例はない。これは、電気的なスピン注入、スピン制御、スピン検出など個々のスピンに関する要素技術の確立と統合が大前提となるためである。また、半導体中の電気的なスピン制御やスピン緩和機構などの伝導機構に関する研究は、世界中で多くの研究者が取り組んでいるものの未知の部分が多く未開拓の分野である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、次世代のエレクトロニクスの開拓を目指して、半導体中で電気的にスピン生成・制御・検出する要素技術を確認することにより新たなスピン機能を創出しようとするところにある。さらに、半導体ヘテロ界面や細線構造におけるスピン緩和、スピン伝導機構の解明によりスピン物性物理における学術的基礎を提供することを目指して研究を行った。

3. 研究の方法

スピン機能化三端子デバイスを目指すには、半導体中でのスピン伝導機構の解明と電気的なスピン制御、スピン注入・検出源となる磁性半導体の磁化反転機構の解明が不可欠である。そこで、半導体中のスピン軌道相互作用を用いた電気的なスピン制御と磁性半導体のスピン注入に着目し、(1) スピン依存伝導機構を解明、(2) 微小磁性半導体の磁化反転機構の解明、(3) 磁性半導体を用いたスピン三端子デバイスにおける磁気伝導特性の評価を行った。

4. 研究成果

(1) スピン軌道相互作用によるスピン依存伝導特性の解明

スピン軌道相互作用によって生じる有効磁場は電子スピンの運動する方向に依存するため電子散乱により有効磁場の向きが変化しスピン緩和をもたらす。スピン軌道相互作用の電界制御性を保ちつつスピン緩和を抑制することがスピントロニクスデバイスの実現にとって重要な課題となる。スピン緩和を抑制するための方策としてスピン緩和長より細い細線構造を用いることが、有効であることが理論的に検討されている。そこで、

電子の運動方向をそろえるため幅 $1\ \mu\text{m}$ 以下の細線構造を作製し、弱反局在の解析によりスピン緩和時間を評価した。

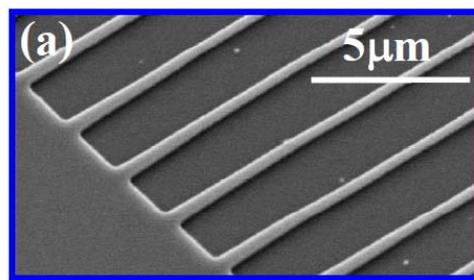


図 1. 作製した InGaAs 細線構造の SEM 写真。普遍的コンダクタンスの揺らぎ (UCF) を抑えるため 95 本の細線を同時に測定する。細線構造はスピン軌道相互作用を制御するためのゲート電極で覆われている。

図 1 に作製した InGaAs をチャンネルとする細線構造の SEM 写真を示す。細線構造はスピン軌道相互作用を制御するためゲート電極で覆われている。細線幅が $1\ \mu\text{m}$ 以下になると弱反局在のコンダクタンスのピークが徐々に抑制されスピン緩和が抑制されることを確認した。図 2 にはさまざまな細線幅の磁気コンダクタンスを弱反局在解析により求めたスピン緩和長のキャリア濃度依存性を示す。ゲート電圧を印加しキャリア濃度を増加すると同時に Rashba スピン軌道相互作用を弱めるとスピン緩和時間が大幅に増大することが確認された。二次元電子ガスの場合と比べて、スピン緩和時間が 65 倍にも増大していることがわかった。これは、細線構造による有効磁場が揃う効果に併せて Rashba スピン軌道相互作用の強さ α が Dresselhaus スピン軌道相互作用 β に近づくことにより有効磁場の向きがそろうことによりスピン緩和の抑制効果が利いているためと解釈される。

Rashba スピン軌道相互作用 α と Dresselhaus スピン軌道相互作用 β が等しくなるとスピン軌道相互作用の作る有効磁場の向きが一軸性となりスピンは良い保存量となる。この永久スピン旋回状態では散乱を受けてもスピンの歳差運動は乱されず、スピンのコヒーレンスが保たれた状態が実現する。そのためには、Rashba スピン軌道相互作用 α と Dresselhaus スピン軌道相互作用 β を実験的に評価することが不可欠である。我々は、細線構造のスピン軌道相互作用とゼーマン効果を組み合わせることで、2つのスピン軌道相互作用の強度比を伝導実験から求める手法を新たに提案した。実験的にも本提案する手法が有効であることが確認された。

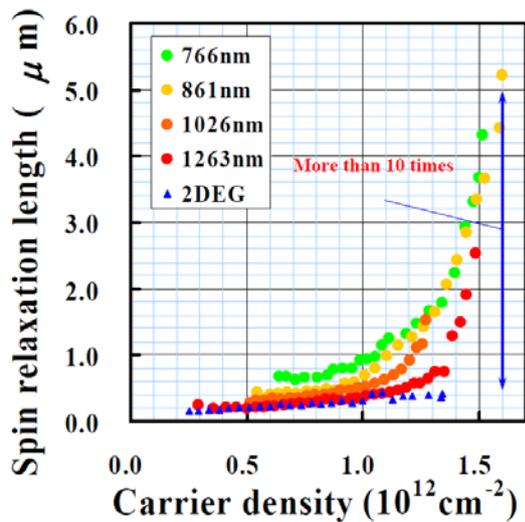


図2 InGaAs 細線のスピンの緩和長のキャリア濃度依存性。細線幅が狭くなるにつれスピンの緩和が抑制されていることが判る。一方、キャリア濃度を上げるとともにスピンの緩和長の急激な増大が観測された。

(2) 微細加工した希薄磁性半導体の磁化反転機構の解明

分子線エピタキシー法によりGaAs上に成長したGaMnAsを[010]を細線長軸方向とし長さ40μm、線幅 $w = 20\mu\text{m}$ 、 $1.0\mu\text{m}$ 、 $0.4\mu\text{m}$ にプロセスした。作製したデバイス構造を図3に示す。

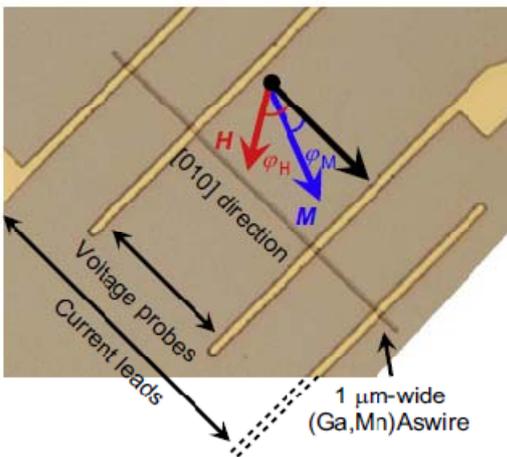


図3. 線幅1μmのGaMnAs細線構造。細線長手方向は[010]方向を示す。

$T = 5\text{K} \sim 75\text{K}$ における異方性磁気抵抗(AMR)の面内磁場依存性と面内磁場角度依存性の測定を行った。線幅 $w = 20\mu\text{m}$ 細線においては、AMRの面内磁場角度依存性に \cos 関数

からのずれが観測され、コヒーレント磁化回転モデルによるフィッティングからGaMnAsホール素子においても観測される結晶磁気異方性及び一軸磁気異方性が観測された。さらに線幅 $w = 1.0\mu\text{m}$ の場合、既存の異方性に加え細線長軸方向を容易軸とした一軸磁気異方性も観測され、微細加工による細線長軸方向への磁気異方性付加を実現した。 $T = 15\text{K}$ において $w = 1.0\mu\text{m}$ の試料に形状による一軸磁気異方性を導入した結果、フィッティングから得られた磁気異方性定数は 547J/m^3 程度になった。形状磁気異方性の寄与は反磁界係数および磁化から計算された 21J/m^3 と比較してはるかに大きく形状異方性から説明することができない。そこで他の形状効果として圧縮ひずみを受けたGaMnAsが微細加工によって格子緩和を起こしたと仮定し磁気弾性エネルギー $\lambda_{100}\sigma$ を導入した。

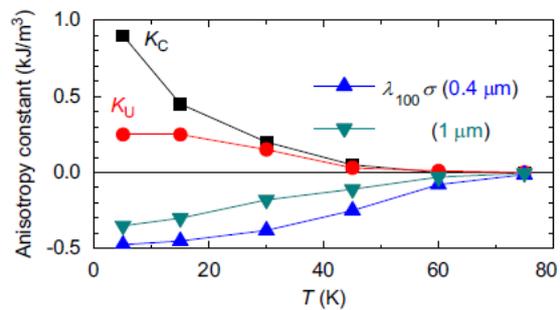


図4. 磁気異方性定数の温度依存性。 K_C は結晶磁気異方性、 K_U は一軸磁気異方性、 $\lambda_{100}\sigma$ は格子緩和に起因する一軸磁気異方性定数をしめす。

図4は磁気異方性定数の温度依存性である。 $T = 30\text{K}$ までは結晶磁気異方性および一軸磁気異方性が支配的となるが $T > 45\text{K}$ においては格子緩和に伴う細線長手方向の一軸異方性が支配的となることがわかり、温度依存性から磁化が非常に小さくなる高温領域でも形状による強い異方性を残している。図5a及び5bは $\pm 45^\circ$ 方向に磁場を印加したときのAMRの磁場依存性である。図5a及び5bが実験値、図5c及び5dがコヒーレント磁化回転モデルによる磁化方向計算結果、図5e及び5fが磁化反転を示した模式図である。 -45° 方向に磁場を印加したときには磁化回転が一軸磁気異方性および結晶磁気異方性のいずれの容易軸もない方向を通過するので $+45^\circ$ よりゼーマンエネルギーが必要となるため、細線の長軸[100]方向に磁化が止まらず、 180° 回転による磁化反転を起こしている。一方で $+45^\circ$ に磁場を印加した際には結晶磁気異方性の容易軸[-100]方向で一度磁化がピンギンされており、[-110]方向に存在する一軸磁気異方性のためより弱いゼーマンエネルギーで磁化が反転するためである。

強磁性半導体GaMnAsにおいて、結晶成長後に微細加工によって磁気異方性を導入できるこ

と示した。磁気異方性定数の温度依存性から $T > 45\text{K}$ では結晶磁気異方性や一軸磁気異方性よりも格子緩和に伴う磁気異方性の方が支配的であることが明らかとなった。また、外部磁場を印加する方向を変えることで GaMnAs 細線の磁化回転機構が制御できることを明らかにした。

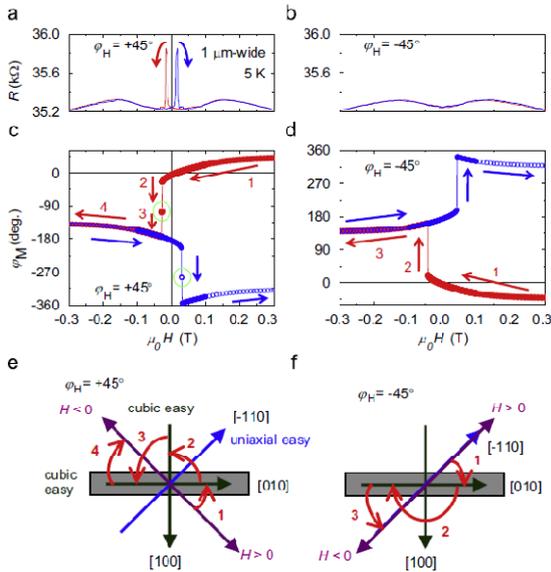


図 5. 外部磁場印加方向が 5a. +45 度及び 5b. -45 度における異方性抵抗の磁場依存性、磁場角度 5c. +45 度及び 5d. -45 度におけるコヒーレント磁化回転モデルによる磁化方向計算結果、5e. 及び 5f. は磁化反転過程を示した模式図。

(3) 磁性半導体を用いたスピン三端子デバイスにおける磁気伝導特性

磁性半導体 GaMnAs 用いたダブルバリアトンネルトランジスタのバンド図 6 を示す。

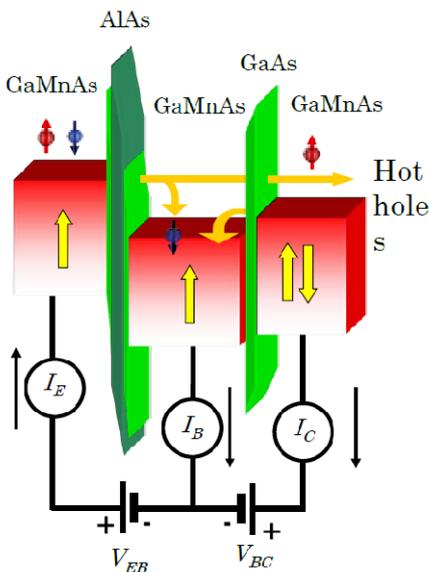


図 6. ダブルバリアトンネルトランジスタのバンド図と本研究におけるバイアス、電流方向の定義。

エミッタとベース間のバイアスによってエミッタからホットで注入されたホールはバリア界面やベース層で散乱されて運動エネルギーを失い、一部はベース層に流れ込むが、残りはバリアを通過してコレクタ層までたどり着く。エミッタバイス V_{EB} を大きくすると、ホットで注入したキャリアの運動エネルギーが大きくなり、コレクタ層にたどり着くキャリアが大きくなる。 V_{EB} を固定したとき、コレクタバイス V_{BC} を印加してコレクタ層のフェルミレベルをベース層に対して高くすると、コレクタ層からベース層へキャリアが流入するとともに、エミッタ層からホットで注入されてコレクタ層へ向かうキャリアを押し戻すことができるため、その結果 V_{BC} でコレクタ電流を変調させることが可能となる。

まず GaMnAs ダブルバリアトンネルダイオード構造 (Double Barrier Tunneling Diode : DBTD) の 2 端子素子を用いたトンネル磁気抵抗効果 (TMR) の測定について述べる (図 7)。TMR とは、絶縁層を 2 つの強磁性体で挟んだ構造において、面直方向のトンネル電流が 2 つの強磁性体薄膜の相対的な磁化方向によって変化する現象である。本研究では DBTD 構造のエミッタ、ベース、コレクタ層に全て希薄強磁性半導体 GaMnAs を用いた。この構造ではトンネル障壁が 2 つあるため、TMR の影響がエミッタ-ベース間、ベース-コレクタ間の 2 箇所で見られる。そのため、シングルバリア構造よりも大きな TMR 比が期待できる。最大で 30% の TMR が観測された。

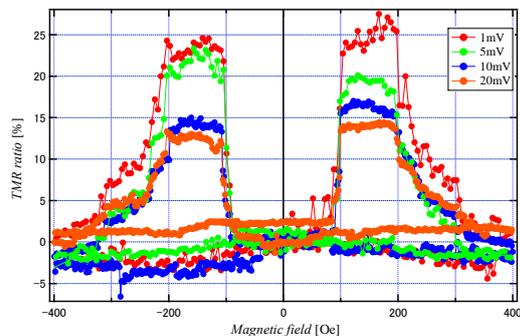


図 7. バイアス 1mV, 5mV, 10mV, 20mV のときの TMR 測定結果。抵抗値はそれぞれゼロ磁場の抵抗値を 0 % として規格化している。

図 8 に測定した電流電圧測定結果から求めた電流増幅率 β のバイアス依存性を示す。 β はベース電流を変調させることでどれだけコレクタ電流が増加したかを表す指標である。 $V_{BC} = 0\text{ mV}$ を除いて、 V_{EB} の増加に伴い β が大きくなり、一旦ある V_{EB} のところで極大値をとった後、 $\beta = 1$ に漸近している。デバイス応用を考えた場合、 β が 1 よりも大き

く、単純増加しているバイアス領域では、本デバイスは V_{EB} による電流増幅機能があると言える。さらに、一定の V_{EB} に対して、 V_{BC} を変化させることでも β の変調が可能である。

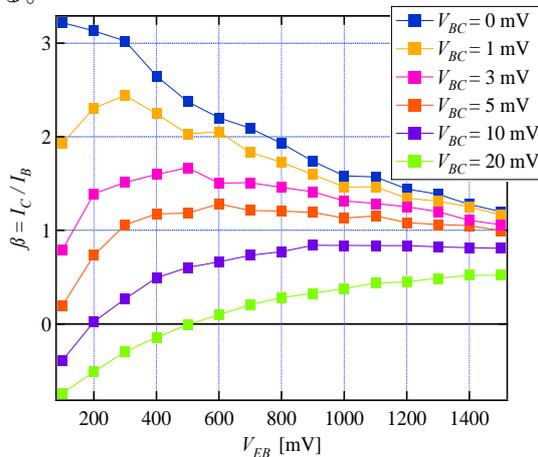


図 8. 電流増幅率 β の V_{EB} , V_{BC} バイアス依存性。

3層 GaMnAs の TMR 素子とダブルバリアトンネルトランジスタの磁気輸送特性を調べた。3層 GaMnAs の TMR 素子では、4.8K において最大 30% の TMR 比が得られたことから、3層 GaMnAs 構造をもちいて、TMR 効果を有効利用したデバイスの作製が可能であることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 35 件) 日本語雑誌 3 件は査読なし、英語論文 32 件は査読有

1. “Width and temperature dependence of lithography-induced magnetic anisotropy in (Ga,Mn)As wires”, M. Kohda, J. Ogawa, J. Shioyai, F. Matsukura, Y. Ohno, H. Ohno, and J. Nitta, Physica E, published online (2010).
2. “Enhancement of spin orbit interaction and the effect of interface diffusion in InGaAsP/InGaAs heterostructures”, M. Kohda and J. Nitta, Phys. Rev. B 81, 115118 (2010).
3. “Electrical Manipulation of Spins in the Rashba Two Dimensional Electron Gas Systems”, J. Nitta, T. Bergsten, Y. Kunihashi, and M. Kohda, J. Appl. Phys. **105**, 122402 (2009).
4. “Enhancement of Spin Lifetime in Gate-Fitted InGaAs Narrow Wires”, Y. Kunihashi, M. Kohda, and J. Nitta, Phys. Rev. Lett. **102**, 226601 (2009).
5. “All-Electrical Detection of the Relative Strength of Rashba and Dresselhaus Spin-Orbit Interaction in Quantum Wires”,

M. Scheid, M. Kohda, Y. Kunihashi, K. Richter, and J. Nitta, Phys. Rev. Lett. **101**, 266401 (2008).

6. “High remanent magnetization of L10-ordered FePt thin film on MgO / (001) GaAs”, M. Kohda, A. Ohtsu, T. Seki, A. Fujita, J. Nitta, S. Mitani, and K. Takanashi, Jpn. J. Appl. Phys. **47**, 3269-3271 (2008).
7. “Manipulating spin orbit interaction in semiconductors”, M. Kohda, T. Bergsten, and J. Nitta, J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 031008 (2008).
8. “Time reversal Aharonov-Casher effect using Rashba spin-orbit interaction”, J. Nitta and T. Bergsten, New. J. Phys. **9**, 341 (2007).
9. 「半導体中のスピン寿命の増大に成功」新田 淳作、好田 誠、国橋 要司、電子情報通信学会誌, **92**, 899-900 (2009).
10. 「ラッシュバ効果をめぐる新展開」新田 淳作、パリティ, **23**, 26-28 (2008).
11. 「Rashba スピン軌道相互作用を用いたアハロノフ・キャッシャー効果」新田 淳作、トビアス バーグステン、固体物理, **42**, 49-58 (2007).

以下省略

〔学会発表〕(計 63 件)

国際会議基調講演 2 件

1. “Electrical Manipulation of spins in the Rashba 2DEG systems”, J. Nitta (Plenary), 29th International Conference on the Physics of Semiconductors, July 27th - Aug. 1st (2008), Rio de Janeiro
2. “Electrical manipulation of spin precession based on the Rashba spin-orbit interaction”, J. Nitta (Plenary), 17th Electronic Properties of Two-dimensional Systems and Modulated Semiconductor Structures, July 15th-20th (2007), Genova

国際会議招待講演 17 件

1. “Spin manipulation and generation with spin orbit interaction in semiconductor heterostructures”, M. Kohda and J. Nitta (Invited), SPIE Photonics West 2010, Jan. 23rd - 28th (2010), San Francisco
2. “Spin Coherent Transport in InGaAs Wires and Rings”, J. Nitta (Invited), The 6th International Conference on Advanced Materials and Devices, Dec. 9th -11th (2009), Jeju
3. “Spin Related Transport affected by Competition between Spin-orbit Interaction and Zeeman Effect”, J. Nitta (Invited), 18th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics, Aug. 3rd - 8th (2008), San Pedero, Brazil

4. “Spin-Orbit Effect in Semiconductor Nanostructures”, J.Nitta (Invited), XXXVII International School on the Physics of Semiconductor Compounds, June 7th-13th (2008), Jaszowiec, Poland
5. “Spin Transport in Semiconductors”, J. Nitta (Invited), 4th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology, June 17th- 22nd (2007), Maui

以下省略

国内学会・研究会招待講演 12 件

1. 「電界効果スピントランジスタに向けたスピネ界制御」 新田 淳作 (招待講演) 日本磁気学会第 26 回スピネ界エレクトロニクス専門研究会 2009 年 11 月 2 日 仙台
2. 「Semiconductor Spintronics with/without Ferromagnets」 新田 淳作 (招待講演) 第 32 回日本磁気学会学術講演会 2008 年 9 月 12 日 ~15 日 多賀城
3. 「スピネ軌道相互作用を用いたスピントランジスタ」 新田 淳作 (招待講演) 第 69 回応用物理学会学術講演会 2008 年 9 月 2 日 ~ 5 日 名古屋
4. 「Electrical Manipulation of Spins and Spin Devices in Semiconductors」 新田 淳作 (招待講演) 26th Electronic Materials Symposium 2007 年 7 月 4 日~ 6 日 堅田
5. 「スピントランジスタに向けてのスピネ界制御」 新田 淳作 (招待講演) 応用物理学会、応用電子物性分科会、スピネ界エレクトロニクス研究会共同主催研究会 2006 年 10 月 17 日 東京

以下省略

国内学会・研究会一般講演 32 件
省略

〔図書〕 (計 2 件)

1. “Controllable Quantum States- Mesoscopic Superconductivity and Spintronics” H. Takayanagi, J. Nitta, and H. Nakano, World Scientific p.1-420 (2009).
2. 「電界スピネ回転制御とスピネ FET」スピネ界エレクトロニクスの基礎と材料・応用技術の最前線 (シーエムシー出版) 第 28 章 新田淳作 331-340 (2009).

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 5 件)

1. 名称: トランジスタおよび電子回路
発明者: 好田 誠、新田 淳作
権利者: 東北大学

種類: 特願

番号: 2009-247794

出願年月日: 平成 21 年 10 月 28 日

国内外の別: 国内

2. 名称: スピネ軌道相互作用を用いたゼロ磁場における電子スピネ共鳴
発明者: 好田 誠、新田 淳作
権利者: 科学技術振興機構

種類: 特願

番号: 2009-220161

出願年月日: 平成 21 年 8 月 14 日

国内外の別: 国内

3. 名称: ヘテロ界面挿入に基づくスピネ軌道相互作用増大方法
発明者: 好田 誠、新田 淳作
権利者: 科学技術振興機構

種類: 特願

番号: 2009-189211

出願年月日: 平成 21 年 8 月 13 日

国内外の別: 国内

4. 名称: スピネ相補性インバータ
発明者: 好田 誠、新田 淳作
権利者: 科学技術振興機構

種類: 特願

番号: 2009-189207

出願年月日: 平成 21 年 8 月 13 日

国内外の別: 国内

5. 名称: スピネ軌道相互作用の増大方法
発明者: 好田 誠、新田 淳作
権利者: 科学技術振興機構

種類: 特願

番号: 2009-189202

出願年月日: 平成 21 年 8 月 13 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

「電子の自転向き制御 東北大学 新型メモリー実現に道」 日経産業新聞 2009 年 6 月 5 日

ホームページ

<http://db.tohoku.ac.jp/whois/detail/8581980d5b925fab833231ce5754cba1.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

新田 淳作 (NITTA JUNSAKU)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 00393778

(2) 研究分担者

好田 誠 (KOHDA MAKOTO)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 00420000

(3) 連携研究者

大野 裕三 (OHNO YUZOU)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号: 00282012