

機関番号： 11301
 研究種目： 特定領域研究
 研究期間： 2007 ～ 2010
 課題番号： 19048005
 研究課題名（和文） スピン軌道相互作用を用いたスピン流の電氣的な検出と制御
 研究課題名（英文） Electrical detection and control of spin current
 by using spin orbit interaction
 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）：

スピン軌道相互作用は、スピン流を電場制御する手段として重要であるが、スピン軌道相互作用が作る有効磁場は電子の運動量ベクトルに依存するため、散乱によりスピン緩和をもたらす。スピン緩和を抑制する方法として、ゲート電圧によって制御可能な Rashba スピン軌道相互作用を Dresselhaus スピン軌道相互作用と等しくすると、有効磁場方向が一軸性となりスピン緩和の抑制が期待される。InGaAs 二次元電子ガスの異なる 3 つの結晶軸方向に切り出した細線のスピン緩和に大きな異方性を見出した。この結果は、Rashba スピン軌道相互作用を Dresselhaus スピン軌道相互作用が共存していることを示している。さらに、量子井戸の厚さを系統的に小さくすることにより Dresselhaus スピン軌道相互作用を大きくするとともに Rashba スピン軌道相互作用をゲート電圧制御すると、スピン緩和の発散的な挙動が観測された。この結果は、電場制御による永久スピン旋回状態の実現を示唆している。

研究成果の概要（英文）：

Spin orbit interaction (SOI) plays an important role for electrical manipulation of spins. However, the direction of the effective magnetic field induced by the SOI depends on the momentum direction. Therefore, spin orientation is randomized after scattering events. This is the so-called spin relaxation. Spin relaxation is suppressed when the Rashba SOI strength is equal to that of the Dresselhaus SOI since the effective magnetic field direction becomes uniaxial. We have found that spin relaxation rate depends on the crystal orientations in InGaAs wires. This indicates that both Rashba and Dresselhaus SOIs coexist in an InGaAs/InAlAs heterostructure. The Dresselhaus SOI strength depends on the thickness of quantum well (QW). In a thinnest InGaAs QW, remarkable suppression of spin relaxation is observed by tuning the Rashba SOI through the gate voltage. This suggests the gate-controlled persistent spin helix state.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,200,000	0	8,200,000
2008年度	9,700,000	0	9,700,000
2009年度	9,700,000	0	9,700,000
2010年度	7,700,000	0	7,700,000
年度			
総計	35,300,000	0	35,300,000

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：スピン流、スピン軌道相互作用

1. 研究開始当初の背景

半導体中にスピン偏極したキャリアを生成し電場制御することはスピントロニクスに不可欠の技術である。半導体上に磁性体をエピタキシャル成長することにより、スピン注入が可能となってきた。一方、磁場を用いることなく、電場によりスピン偏極したキャリアを生成する方法としてスピンホール効果が着目されている。しかしながら、スピン軌道相互作用のある系ではスピンは保存量ではないためスピン流の定義もはっきりしないまま活発な議論が続けられており、スピン流を電氣的に検出した実験例はまだ報告されていない。ゲート電圧により制御可能な Rashba スピン軌道相互作用を用いて電荷流—スピン流変換の電氣的な検出を目指すとともにスピン緩和を抑制する方法を確立することが望まれる。半導体中の電氣的なスピン制御やスピン緩和機構の解明に関する研究は、世界中で多くの研究者が精力的に取り組んでいるものの、未知の部分が多く未解決の分野である。

2. 研究の目的

半導体中のゲート電場により制御可能な Rashba スピン軌道相互作用に着目し、磁場を印加することなく電場により電荷流—スピン流の相互変換手法を確立し、スピン機能デバイス構築に向けての設計指針を構築するとともに、スピン緩和の抑制方法を確立することを目的として研究を行う。

また、スピン流の生成方法として、スピンホール効果の電氣的な検出に適した垂直磁気異方性を有する磁性体から半導体へのスピン注入を検討する。

3. 研究の方法

Rashba のスピン軌道相互作用が重要となる InGaAs/InAlAs ヘテロ構造を用いた二次元電子ガスに着目し、スピン流の電氣的な制御とスピン緩和の抑制を同時に満たすヘテロ構造を設計し伝導測定により実証する。

また、高梨グループと共同で垂直磁気異方性を有する FePt から半導体 GaAs へのスピン注入によるスピン流の生成を試みる。

4. 研究成果

(1) 電場を用いたスピン流の制御とスピン緩和抑制

InGaAs/InAlAs ヘテロ構造を用いた二次元電子ガスは Rashba のスピン軌道相互作用が重要であることが知られている。最近、我々はスピン干渉デバイスを用いてゲート電場によりその強さを制御しスピンの歳差運動が電場により制御できることを実験的

に検証した。一方、この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場制御性を保ちつつスピン緩和を抑制することがスピン流の生成・制御さらに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。

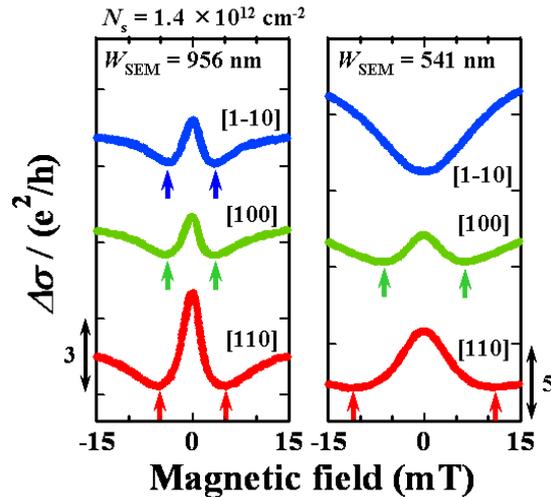


図1 [110], [100], [1-10] 方向に作製した InGaAs 細線構造の磁気コンダクタンス。W= 956 nm ではスピン緩和の異方性は大きくないが、W= 541 nm と細くすると大きな異方性が観測される。

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 μm 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結果、1 桁近く長くなることを確認した。また、細線上に形成したゲート電場によりスピン緩和時間が大幅に増加することがわかった。この結果は、Rashba スピン軌道相互作用αが Dresselhaus スピン軌道相互作用βに近づくことによって説明できる。

また、細線の結晶方位によってスピン緩和長が大きく異なることを見いだした。Rashba スピン軌道相互作用のみ存在する系ではスピン緩和が等方的であるが、Dresselhaus スピン軌道相互作用と共存する場合はスピン緩和が強い異方性を示し、特に [110]方向と [1-10]方向に大きな差が生じる。我々は InGaAs/InAlAs ヘテロ構造を [110], [100], [1-10]の3つの方向に細線を切り出し磁気コンダクタンス測定から大きな異方性を有することを見いだした。

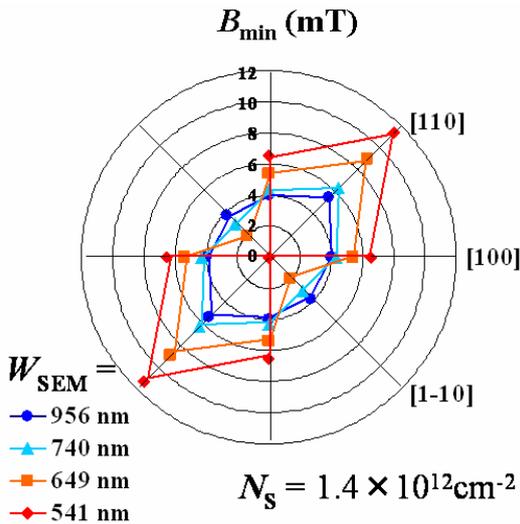


図2 スピン緩和の強さを示すパラメータ B_{min} を各細線方向に対してプロットしたものである。 B_{min} は負の磁気コンダクタンスを示す領域に対応している。細線幅が細くなるに従い異方性は大きくなり、特に [1-10] 方向ではスピン緩和が強く抑制されている。

図1に3つの方向に切り出した細線の磁気コンダクタンスを示す。負の磁気コンダクタンスは弱反局在効果によるもので、負の磁気コンダクタンスの磁場領域 B_{min} が広いほどスピン緩和が強く生じていることを示している。図2はスピン緩和の強さを表す B_{min} を細線方向に対して極プロットしたものである。細線幅が $W=956$ nm と比較的広い場合には、3つの方向で大きなスピン緩和の異方性は観測されないが、 $W=541$ nm と細くするにつれ異方性が大きくなっている様子が観測された。特に [1-10] 方向では、スピン緩和による弱反局在効果は完全に抑制されている。これらの実験結果は、Rashba スピン軌道相互作用と Dresselhaus スピン軌道相互作用の共存を示すものであり、Rashba スピン軌道相互作用をゲート電場により変調すれば、Rashba スピン軌道相互作用と Dresselhaus スピン軌道相互作用が等しくすることが可能であり、スピン緩和の抑制された永久スピン旋回状態を実現できることを示している。

以上の実験は、起源の異なる2つのスピン軌道相互作用の強さを定量的に評価することがスピン緩和の抑制に不可欠であることを示唆している。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により、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。さらに、細線に印加する面内磁場の角度に依存した弱反局在が大きな異方性を示すことを確認し、本提案の有効性を実験的に確認した。

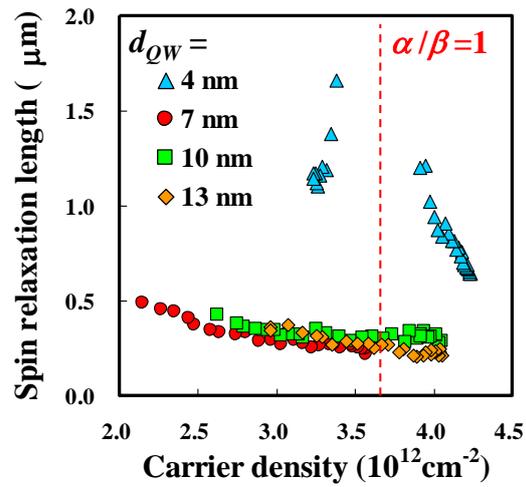


図3 量子井戸幅の異なる InGaAs 二次元電子ガスのスピン緩和長のキャリア濃度依存性。スピン緩和長は弱反局在効果の測定により求めた。

スピン緩和長の増大に最適な量子井戸構造を探索するために、井戸幅の異なる InAlAs / InGaAs (量子井戸) HEMT 構造エピタキシャルウェハをフォトリソグラフィ及びウェットケミカルエッチング、リフトオフ法によりホールバー形状に加工して磁気伝導度のゲート電界依存性を測定した。得られた測定結果に対して、弱反局在解析を行いスピン緩和長のキャリア密度依存性を求めた (図3参照)。Rashba のスピン軌道相互作用はゲート電界に依存するため、スピン緩和長のキャリア密度依存性は Rashba のスピン軌道相互作用依存性に対応する。量子井戸幅 d_{qw} が井戸幅が 7, 10, 13 nm の試料では、キャリア密度が増加に伴ってスピン緩和長は単調に減少した。一方、 $d_{qw} = 4$ nm の試料ではキャリア密度が $3.6 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 付近において、スピン緩和長の急峻な増大が観測された。このスピン緩和長の急峻な増大は、井戸幅が狭くなることによって増大した Dresselhaus のスピン軌道相互作用が、Rashba のスピン軌道相互作用と等しくなり、有効磁場の一軸配向状

態が形成されたために起こったと考えられる。この結果から InGaAs 系量子井戸では、スピン緩和長を増大させるために狭い量子井戸が有効であるという知見を得ることができた。以上の実験結果は、スピン永久巡回状態を用いたスピン緩和の抑制と促進をゲート電場変調により制御できることを示しており、スピン流の電場制御とスピン緩和の抑制を同時に実現できる。

(2) 垂直磁気異方性を有す磁性体を用いたスピン流の生成

これまでに、多くの磁性体から半導体中へのスピン注入実験が行われてきた。しかしながら、多くの磁性体は面内に容易軸を持つ。高梨グループと共同で垂直磁気異方性を有する FePt から半導体 GaAs へのスピン注入によるスピン流の生成を試みた。半導体中に面直なスピンが注入されれば、面内にある Rashba スピン軌道相互作用の作る有効磁場の向きと垂直となるため電界によるスピンの回転制御が容易となる。このため電界効果スピントランジスタの実現に重要なマイルストーンとなる。さらに、半導体中のスピンホール効果の電気的な検出やスピン流の電気的制御に好都合である。L1₀ 構造を有する FePt を半導体 GaAs 上にエピタキシャル成長する条件を最適化し、スピン注入を光学測定により確認した。

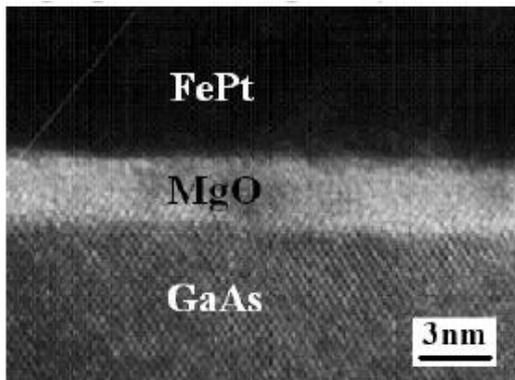


図4 半導体 GaAs 上にエピタキシャル成長した FePt/MgO の TEM 写真。トンネル絶縁層 MgO は電子ビーム蒸着、FePt はスパッタ蒸着により形成した。

図4には FePt/MgO/GaAs 断面の TEM 写真を示す。スパッタ蒸着により形成した MgO に比べ電子ビーム蒸着により MgO/GaAs 界面にアモルファス層のない清浄な界面が形成されることを確認した。また、ポストアニール条件を最適化し FePt の磁化特性を測定した結果、角形の良いヒステリシスを示し残留磁化比 0.9 以上得ることに成功した。

FePt から GaAs へのスピン注入効率を評価するため、FePt/MgO を GaAs 発光ダイオード (LED) 上にエピタキシャル成長した。この成長条件、アニール条件は、上記と同じである。

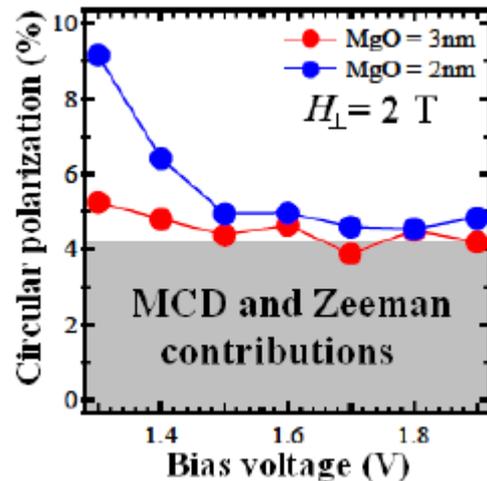


図5 面直磁場 2T で測定した円偏光偏極率のバイアス依存性。

MgO トンネル絶縁層膜厚 2 nm ではスピン LED 構造からの最大円偏光率は約 9.2% が得られた。一方、スピン注入効率を見積もるには電気的スピン注入による円偏光のほかにゼーマン効果、磁気円偏光二色性(MCD)の効果からの寄与を差し引く必要がある。量子井戸内でのスピン緩和時間と再結合時間を考慮することにより、約 11% のスピン注入効率を得られた。この値は、スピンホール効果を用いたスピン流の電気的な測定とホール測定によりスピン流の緩和、電気制御に充分である。

以上の実験結果は、電場によるスピン流の制御とスピン緩和の抑制、垂直磁気異方性を有す磁性体から半導体へのスピン流生成が可能であることを示したものであり、将来のスピントロニクス研究のマイルストーンとなることが期待される。

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 30 件)

1. “Width and temperature dependence of lithography-induced magnetic anisotropy in (Ga,Mn)As wires”, M. Kohda, J. Ogawa, J. Shiogai, F. Matsukura, Y. Ohno, H. Ohno, and J. Nitta, Physica E, **42**, 2685 (2010). 査

- 読有
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). 査読有
 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). 査読有
 4. “Enhancement of Spin Lifetime in Gate-Fitted InGaAs Narrow Wires”, Y. Kunihashi, M. Kohda, and J. Nitta, Phys. Rev. Lett. **102**, 226601 (2009). 査読有
 5. 「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). 査読無
 6. “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). 査読有
 7. “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. Takahashi, Jpn. J. Appl. Phys. **47**, 3269-3271 (2008). 査読有
 8. “Manipulating spin orbit interaction in semiconductors”, M. Kohda, T. Bergsten, and J. Nitta, J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 031008 (2008). 査読有
 9. “Control of interlayer magnetostatic coupling in submicron-sized Fe/Au/Fe rings”, T. Miyawaki, M. Kohda, A. Fujita, and J. Nitta, Appl. Phys. Lett. **92**, 32502 (2008). 査読有
 10. 「ラッシュバ効果をめぐる新展開」 新田 淳作、パリテイ, **23**, 26-28 (2008). 査読無
 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). 査読無
- 以下省略

[学会発表] (計 75 件)

国際会議基調講演 3 件

1. “Spin Coherent Transport in InGaAs Based wire and Ring Structures”, J. Nitta (Plenary), The 6th International Conference on the Physics and Applications of Spin Related

Phenomena in Semiconductors, August 1st (2010), Tokyo

2. “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
3. “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 18 件

1. “Electrical Manipulation of Spins in Semiconductors”, J. Nitta (Invited) International Symposium Nanoscience and Quantum Physics 2011, Jan. 27th (2011), Tokyo
2. “Anisotropic spin transport induced by competition between Rashba and Dresselhaus spin-orbit interactions in InGaAs wires”, J. Nitta (Invited), 3rd International Conference on Nanospintronic design and Realization (ICNDR-2010), May 30th-June 4th (2010), Osaka
3. “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
4. “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
5. “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
6. “Spin-Orbit Effect in Semiconductor Nanostructures”, J. Nitta (Invited), XXXVII International School on the Physics of Semiconductor Compounds, June 7th-13th (2008), Jaszowiec, Poland
7. “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. 「半導体中のスピ
緩和とスピ制御」新田 淳作 (招待
講演) 第 4 回 物性科学領域横断研究会
2010 年 11 月 13 日 東京
 2. 「電界効果スピ
トランジスタに向けたスピ電界制御」
新田 淳作 (招待講演) 日本磁気学会
第 26 回スピエレクトロニクス専門研
究会 2009 年 11 月 2 日 仙台
 3. 「 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
 4. 「スピ軌道相互
作用を用いたスピトランジスタ」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
 5. 「 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
- 以下省略

[図書] (計 2 件)

1. 「電界スピ回転制御とスピ FET」ス
ピン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)高梨弘毅
監修 第 28 章 新田淳作 331-340 (2009).
- 以下省略

[産業財産権]

○出願状況 (計 6 件)

1. 名称: トンネル接合素子の製造方
法
発明者: 好田 誠、新田 淳作
権利者: 東北大学
種類: 特許
番号: 2010-187693
出願年月日: 平成 21 年 10 月 28 日
国内外の別: 国内
2. 名称: トランジスタ及び電子回路
発明者: 好田 誠、新田 淳作
権利者: 東北大学
種類: 特許
番号: 2009-247794
出願年月日: 平成 21 年 10 月 28 日
国内外の別: 国内
3. 名称: スピ軌道相互作用を用い
たゼロ磁場における電子スピ共鳴
発明者: 好田 誠、新田 淳作
権利者: 科学技術振興機構
種類: 特許
番号: 2009-220161

出願年月日: 平成 21 年 8 月 14 日

国内外の別: 国内

4. 名称: スピ相補性インバータ

発明者: 好田 誠、新田 淳作

権利者: 科学技術振興機構

種類: 特許

番号: 2009-189207

出願年月日: 平成 21 年 8 月 13 日

国内外の別: 国内

以下省略

○取得状況 (計 2 件)

名称: トンネル接合およびトンネル接合体を
用いたメモリ

発明者: 新田 淳作、関根 佳明

権利者: NTT

種類: 特許

番号: 4480411

取得年月日: 2010 年 3 月 26 日

国内外の別: 国内

名称: スピフィルタおよびスピ状態分離
方法

発明者: 新田 淳作、寒川 哲臣

権利者: NTT

種類: 特許

番号: 4477901

取得年月日: 2010 年 3 月 19 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

ホームページ等

<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・准教授

研究者番号: 00420000