

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03988

研究課題名(和文) 強磁性半導体を用いた半導体スピndeバイスの研究開発

研究課題名(英文) Research on semiconductor spin devices with ferromagnetic semiconductors

研究代表者

PHAM NAM・HAI (PHAM, NAM HAI)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：50571717

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、半導体スピndeバイスの作製に必要なp型強磁性半導体(Ga,Fe)Sbおよびn型強磁性半導体(In,Fe)Sbの開発に成功した。また、これらの強磁性半導体において、室温強磁性を実現した。次に、鉄系強磁性半導体からなるスピndeダイオード構造やスピnde電界効果トランジスタ構造を作製し、そのスピnde依存伝導特性の評価を行った。n-(In,Fe)As/p-InAsの江崎ダイオード構造においては、トンネル分光法を使って(In,Fe)Asの自発バンドスピnde分裂を観測した。また、(In,Fe)As量子井戸のチャンネルを有するスピnde電界効果トランジスタ構造を作製し、波動関数制御による強磁性変調を行った。

研究成果の概要(英文)：In this research, we successfully developed a new Fe-doped p-type ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb and a new n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)Sb, which are necessary for fabrication of semiconductor spin devices. Furthermore, we demonstrated intrinsic ferromagnetism in both materials at room-temperature. Using Fe-doped ferromagnetic semiconductors, we fabricated spin diodes and spin transistors, and investigated their spin-dependent transport characteristics. In an Esaki spin-diode structure of n-(In,Fe)As/p-InAs, we observed the spin-split conduction band of (In,Fe)As for the first time by using the tunneling spectroscopy method. We also fabricated field-effect transistors with an (In,Fe)As quantum well, and electrically control the Curie temperature of the (In,Fe)As quantum well using the wave function engineering method. Our results provide an approach for versatile, low power, and ultrafast manipulation of magnetization.

研究分野：スピndeトロニクス

キーワード：強磁性半導体 スピndeダイオード スピndeトランジスタ

1. 研究開始当初の背景

半導体と強磁性体は情報化社会を支える材料としてそれぞれ大きな役割を果たしている。半導体は集積回路や光通信素子などの様々なデバイスに応用されている。一方、強磁性体はハードディスクなどの情報記録媒体や磁気抵抗メモリなどの不揮発性メモリに広く利用されており、これらの磁性体デバイスには電子のスピンが持つ「不揮発性」という特徴が生かされている。磁性体デバイスは「不揮発性」「高速性」「耐久性」という性質を生かしている。もし半導体と磁性体の特徴を融合することができれば、両者を持ち合わせた新しい機能デバイスが期待できる。磁性材料と半導体材料の特長を融合できる新材料として強磁性半導体 (Ferromagnetic Semiconductor; FMS) は特に重要な材料系であり、大変注目されている。しかしながら、(Ga,Mn)As を初め、今まで研究された強磁性半導体は次のような欠点がある：1) p 型強磁性半導体しか作製できない (信頼できる n 型が存在しない)、2) キュリー温度 T_C が室温より低く室温では強磁性にならない、3) 強磁性の起源に関する統一的な理解がない。これらの未解決課題は強磁性半導体のデバイス応用にとって大きな障壁となっている。

一方、本研究は以上の状況を打開すべく材料として Fe-As や Fe-Sb の正四面体共有結合を有する鉄系キャリア誘起強磁性半導体を提案して、実証に成功した。鉄系強磁性半導体は 1) p 型だけではなく n 型強磁性半導体も作製できる、2) 室温以上のキュリー温度を持つ強磁性半導体を作製できる、3) バンド構造と強磁性の発生メカニズムの解明が容易であるため、従来の強磁性半導体材料の問題点を一気に解決できる革新的な半導体スピントロニクス材料である。図 1 に本研究で開発した強磁性半導体 (In,Fe)As (Fe 9.1%) の格子像および原子分布を示す。InAs 半導体に大量の Fe 原子をドーピングしたにもかかわらず、綺麗な閃亜鉛型結晶構造を保ち、かつ均一な Fe 分布が得られたことが分かる。

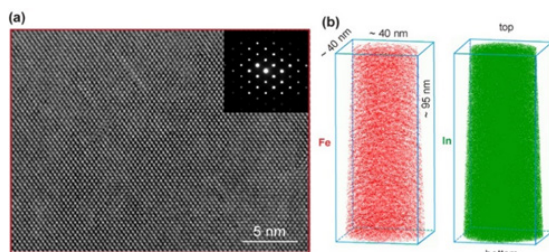


図 1. (a) n 型 III-V 族強磁性半導体 (In, Fe)As の TEM 格子像と電子線回折 (TED) 像および (b) 3 次元原子マッピング法 (3DAP) による Fe と In 原子分布の測定結果。第二相のない閃亜鉛型単結晶が得られたことがわかる。

2. 研究の目的

本研究では、鉄系強磁性半導体材料を利用した半導体スピンドバイスとしてスピンドイオード、スピンドバイポーラトランジスタ、

スピン電界効果トランジスタなど、デバイスレベルの実証を行う。また、これらのデバイスを実現するための、信頼性がある室温鉄系強磁性半導体も開発する。最終的にこれらの鉄系強磁性半導体を用いたスピンドバイスを実現し、超低消費電力の高密度、高速の不揮発性メモリ、超低消費電力のノーマルオフ論理回路や再構成可能な論理回路などの新しい電子情報システムの基盤技術を確立する。

3. 研究の方法

◆ 分子線エピタキシー法による結晶成長

本研究では、低温分子線エピタキシャル法を用いて、非平衡状態で III-V 族半導体にスピンを担う鉄原子とキャリアを提供するドープ原子 (Be, Si など) を添加しながら、鉄系キャリア誘起強磁性半導体の結晶成長を行う。作製した強磁性半導体材料の評価では、透過電子顕微鏡法、電子線回折法、エネルギー分散 X 線分光法による構造解析・元素分布解析を徹底し、磁化特性、磁気電気伝導、光学磁気効果など総合的に磁気特性の評価を行い、信頼性がある n 型および p 型室温強磁性半導体の創製を行う。

◆ 半導体プロセスによる半導体ナノスピンドバイスの作製と特性評価

本研究の第二段階では MBE 法によって作製した鉄系強磁性半導体ヘテロ構造を半導体プロセスを用いて、スピンドイオードなどの 2 端子およびスピントランジスタなどの 3 端子デバイスを作製する。作製したスピンドバイスの磁気電気伝導特性の評価を行う。

4. 研究成果

(1) p 型室温強磁性半導体 (Ga, Fe)Sb の開発
スピンドイオードの作製に必要な p 型鉄系強磁性半導体 (Ga, Fe)Sb の結晶成長を行った。

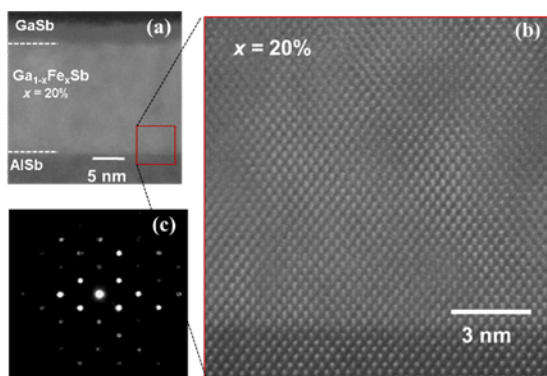


図 2. 厚さ 30 nm の (Ga, Fe)Sb 薄膜 (Fe 濃度 20%) の (a) (b) 断面 TEM 格子像, (c) TED 像。

まず、Fe 濃度 3.9-13.7% の (Ga, Fe)Sb 薄膜を作成し、その磁気特性を評価した結果、キュリー温度が 80 K (11.4%) および 140 K (13.7%) が得られた。この値は狭ギャップ強磁性半導体の中にもっとも高い値であった。さらに、(Ga, Fe)Sb の膜厚を減らすことによって、Fe 濃度を 20% まで高めることができ、キュリー

温度が 230 K の新世界記録を達成した。図 2(a)-2(c)に Fe 濃度 20%の(Ga,Fe)Sb 薄膜の断面透過型電子顕微鏡(TEM)格子像および透過電子線回折(TED)像を示す。非常に高濃度の Fe を GaSb に添加したにもかかわらず、閃亜鉛型(Ga,Fe)Sb の単結晶薄膜が得られている。(Ga,Fe)Sb は p 型半導体であり、前節の n 型(In,Fe)As と合わせて、n 型と p 型の両方の鉄系強磁性半導体を作製できたことになる。さらに、薄膜化などの結晶成長を工夫することによって、Fe 濃度を 25%まで高めて、世界で初めて室温を超えたキュリー温度 340 K を実現した。

(2) n 型室温強磁性半導体(In, Ga)Sb の開発
バンドギャップがさらに小さい InSb 半導体に Fe を添加することによって n 型室温強磁性半導体(In,Fe)Sb の開発に成功した。

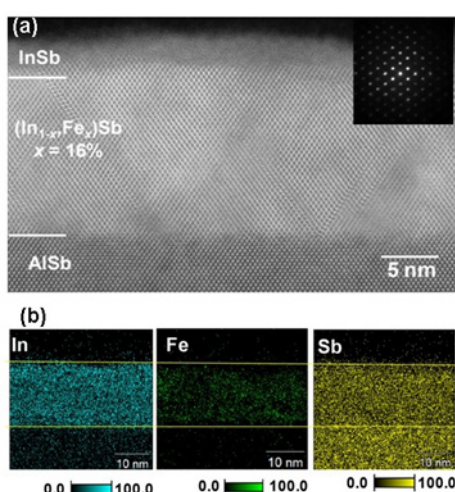


図 3. 厚さ 15 nm の(In,Fe)Sb 薄膜(Fe 濃度 16%)の(a)断面 TEM 格子像と TED 像、(b) EDX による In, Fe, Sb の分布。

図 3(a)に 15 nm (In,Fe)Sb 薄膜(Fe 16%)の TEM 像および TED 像、図 5(b)に同薄膜のエネルギー分散型 X 線分光法(EDX)による元素分布を示す。InSb にも高濃度の Fe を添加できることが分かった。また、キュリー温度が 335 K と非常に高く、同じ Fe 濃度では(In,Fe)Sbが(Ga,Fe)Sbの約2倍の高いキュリー温度を示した。この結果は従来の Mn 系強磁性半導体の平均場 Zener モデルではまったく説明できない。これらの結果から、バンドギャップが狭い方が鉄系強磁性半導体の強磁性が強くなるという独自の設計論を提言した。

(3) 高キュリー温度強磁性半導体(In, Fe)As の実現

次に、n 型強磁性半導体(In,Fe)As のキュリー温度の改善に取り組んだ。高いキュリー温度を得るために、オフ半導体基板の上に(In,Fe)As の結晶成長を行った。その結果、GaAs(001)ジャスト基板の上に成長した薄膜は 300 K において完全に常磁性を示したことに

対して、オフ基板の上に成長した薄膜はいずれもオフ角の増加につれてヒステリシスループの拡大が観測された。一方、MCD スペクトルのピークは 5 K と 300 K いずれにおいても従来報告されてきた(In,Fe)As のピークと一致しており、観測した室温強磁性は真性であることを示した。さらに、高いキュリー温度と高い移動度を両立できる結晶成長技術として、GaAs オフ基板の上に、AlSb/GaSb バッファーおよび Fe の δ ドーピング技術を使って、高品質かつ室温強磁性の(In,Fe)As 薄膜の結晶成長に成功した。

(4) スピンダイオードの作製と超巨大磁気抵抗効果の観測

p 型に(Ga,Fe)Sb を、n 型に(In,Fe)As を用いた、共に強磁性半導体である pn 接合の構造をもつスピンダイオードを作成し、そのスピン依存伝導特性の評価を行った。その結果、20%程度の負の磁気抵抗効果と、500%を超える超巨大な磁気抵抗効果が得られた。20%程度の磁気抵抗効果は単純なスピンバルブ効果で説明できた。それに対して、500%を超える超巨大な磁気抵抗効果は、+8kG から-8kG までの外部磁場の変化に対し2つの鋭いピークをもつ新現象であった。また、超巨大磁気抵抗効果のバイアス依存性および温度依存性を系統的に調べ、超巨大磁気抵抗効果はスピンバルブ効果とスピン分裂効果の組み合わせによって説明できることを根拠づけた。

(5) トンネル分光による(In, Fe)As におけるバンドスピン分裂の直接観察

n-(In,Fe)As/p-InAs の江崎ダイオード構造を作製し、トンネル分光法を使って直接的に(In,Fe)As の自発バンドスピン分裂を観測した。その結果、(In,Fe)As の伝導帯スピン分裂が 30~50 meV と非常に大きいことが分かった。また、強磁性半導体の平均場 Zener モデルでは、観測したキュリー温度とスピン分裂を同時に説明できないことを見出し、新しい理論モデルが必要であることを示した。

(6) (In, Fe)As 強磁性半導体のスピン状態とバンド構造を解明

(In,Fe)As/p-InAs 江崎ダイオード構造において、磁気コンダクタンスのバイアス依存性を評価した。その結果、バイアスが小さい時(トンネル伝導が支配的な領域)、通常の正の磁気コンダクタンス効果に対して、バイアスが大きい時(拡散伝導が支配的な領域)、負の磁気コンダクタンス効果が見られた。この現象は(In,Fe)As のバンドギャップ中にある Fe の不純物バンドの電子が p-InAs の伝導帯側に拡散するモデルで説明が出来ることを示した。以上の研究成果により、(In,Fe)As 強磁性半導体のスピン状態とバンド構造を解明できただけでなく、バイアス電圧によって、(In,Fe)As の伝導帯或いは不純物バンド帯からのスピン注入を選択できることを示した。

(7) スピン電界効果トランジスタ構造の作製と強磁性変調

(In,Fe)As 量子井戸のチャンネルを有するスピン電界効果トランジスタ構造を作製し、波動関数制御による強磁性変調を行った。

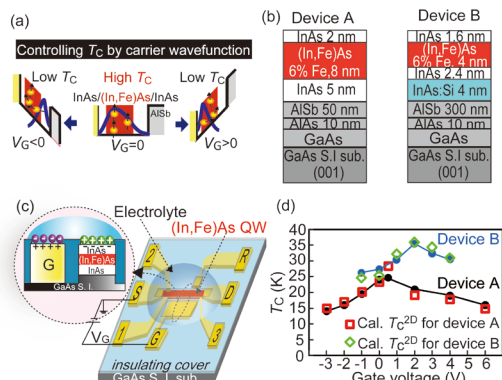


図 4. (a) 強磁性半導体薄膜における電界効果による強磁性変調の概念。(b) InAs/(In,Fe)As/InAs の三層からなる量子井戸の試料構造。(c) 波動関数制御による強磁性変調を実証するため電界効果トランジスタ(FET)構造。(d) ゲート電圧 V_G 印加による(In,Fe)As 量子井戸の T_C の変化。丸は実験データ、四角とダイヤモンドは 2 次元理論による計算結果を示す。

図 4(a)に示すように、強磁性半導体量子井戸には、電子状態の離散化によってキュリー温度が電子濃度ではなく波動関数に強く依存していることが理論的に予測されている。本研究では、この「波動関数の制御による強磁性の変調」を実証するために、図 4(b)に示すような表面/InAs/(In,Fe)As/InAs/AlSb からなる量子井戸構造を作製した。ここでは、表面および AlSb 層が InAs/(In,Fe)As/InAs の三層からなる量子井戸の障壁となる。この量子井戸に閉じ込められた電子の波動関数の効果を明瞭に示すために、ゲート電圧 $V_G = 0$ のときに波動関数の中心が(In,Fe)As 層にあるデバイス A と(In,Fe)As 層からずれて AlSb 層側に近いデバイス B を用意した。これらの量子井戸をチャンネルとする FET を作製し、イオン液体とサイドゲート電極を使って量子井戸にゲート電界を印加した (図 4(c))。図 4(d)にゲート電圧 V_G 印加による(In,Fe)As を含む三層量子井戸の T_C の変化を示す。デバイス A では、 $V_G = 0.5$ V で T_C がピークに達し、それ以上の大きい正または負の V_G を印加すると、 T_C が大きく低下した。これは正あるいは負の V_G によって電子の波動関数の中心が(In,Fe)As 層から表面付近あるいは AlSb 層付近に移動し、波動関数と(In,Fe)As 層との重なりが減ったためである。これに対して、デバイス B では、 $V_G = 2$ V を印加することで T_C を上昇した。これは、デバイス B の量子井戸において $V_G = 0$ V では波動関数の中心が AlSb 層付近にあるが、 $V_G = 2$ V で(In,Fe)As の中心に寄せられ、電子の波動関数と(In,Fe)As 層との重なりが増えたため T_C が上昇したと考えられる。また、デバイス A とデバイス B にお

ける T_C の V_G 依存性は 2 次元モデルを用いた理論計算でほぼ完全に再現できた。この (In,Fe)As を含む三層量子井戸構造における $T_C - V_G$ の振舞いは、(Ga,Mn)As の薄膜で観測された振舞いとは明白に異なり、(In,Fe)As 量子井戸中の電子の波動関数の制御性を示した。また、本実証によって、従来に磁性変調に必要な面キャリア密度の変調量 $\Delta n \sim 10^{12} - 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ から $\Delta n \sim 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ までに大幅に削減し、超高速と超低消費電力の磁化スイッチング技術に応用できると期待している。

さらに、(In,Fe)Sb の電界効果トランジスタ構造を作製し、電界効果による強磁性の変調も行った。その結果、非常に小さい電子濃度の変化 ($\Delta n \sim 2.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) だけで、キュリー温度が 209 K \rightarrow 216 K と約 7 K の変調に成功した。また、従来の Mn 系強磁性半導体のキュリー温度変調実験が数十 K と低温でしか出来なかったに対して、本研究の強磁性変調が 200 K 以上と高い温度領域で達成できた。しかし、キュリー温度の変調量が従来の平均場 Zener モデルだけでは説明できないことも分かった。本研究成果により、(In,Fe)Sb が高キュリー温度の真性な強磁性半導体であり、その強磁性発現機構が伝導電子に依存する電子誘起強磁性の機構だけでなく、別の機構も存在することが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

- (1) N. T. Tu, P. N. Hai, L. D. Anh, M. Tanaka, “Electrical control of ferromagnetism in the n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)Sb with high Curie temperature”, Appl. Phys. Lett. 112, 122409 (2018) (査読有). DOI: 10.1063/1.5022828
- (2) L. D. Anh, P. N. Hai, M. Tanaka, “Electrical tuning of the band alignment and magnetoconductance in an n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As-based spin-Esaki diode”, Appl. Phys. Lett. 112, 102402 (2018) (査読有). DOI: 10.1063/1.5010020
- (3) L. D. Anh, P. N. Hai, M. Tanaka, “Observation of spontaneous spin-splitting in the band structure of an n-type zinc-blende ferromagnetic semiconductor”, Nature Communications 7, 13810 (2016) (査読有). DOI: 10.1038/ncomms13810
- (4) N. T. Tu, P. N. Hai, L. D. Anh, M. Tanaka, “High-temperature ferromagnetism in heavily Fe-doped ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb”, Appl. Phys. Lett. 108, 192401 (2016) (査読有). DOI: 10.1063/1.4948692
- (5) S. Sakamoto, L. D. Anh, P. N. Hai, G. Shibata, Y. Takeda, M. Kobayashi, Y. Takahashi, T. Koide, M. Tanaka, and A. Fujimori, “Magnetization process of the n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As:Be

- studied by x-ray magnetic circular dichroism”, Phys. Rev. B 93, 035203/1-6 (2016) (査読有). DOI: 10.1103/PhysRevB.93.035203
- (6) T. Dietl, K. Sato, T. Fukushima, A. Bonanni, M. Jamet, A. Barski, S. Kuroda, M. Tanaka, Pham Nam Hai, H. Katayama-Yoshida, “Spinodal nanodecomposition in semiconductors doped with transition metals”, Rev. Mod. Phys. 87, 1311-1377 (2015) (査読有). DOI: 10.1103/RevModPhys.87.1311
- (7) L. D. Anh, P. N. Hai, Y. Kasahara, Y. Iwasa, Masaaki Tanaka, “Modulation of ferromagnetism in (In,Fe)As quantum wells via electrically controlled deformation of the electron wave functions”, Phys. Rev. B 92, 161201(R)/1-5 (2015) (査読有). DOI: 10.1103/PhysRevB.92.161201
- (8) N. T. Tu, P. N. Hai, L. D. Anh, M. Tanaka, “Magnetic properties and intrinsic ferromagnetism in (Ga,Fe)Sb ferromagnetic semiconductors”, Phys. Rev. B 92, 144403/1-14 (2015) (査読有). DOI: 10.1103/PhysRevB.92.144403

[学会発表] (計 44 件)

招待講演 (計 10 件)

- (1) M. Tanaka, S. Ohya, L.D. Anh, N.T. Tu, I. Muneta, and P.N. Hai, “Recent progress and topics in semiconductor spintronics and ferromagnetic semiconductors”, Junjirou Kanamori Memorial International Symposium – New Horizon of Magnetism-, Tokyo, Japan, Sep. 27-29 (2017).
- (2) P. N. Hai, T. Ostuka, M. Yoshida, N. T. Tu, L. D. Anh, and M. Tanaka, “Fe-doped ferromagnetic semiconductors for high-performance semiconductor spin devices”, The 29th International Conference on Defects in Semiconductors(ICDS-29), Matsue, Japan, Jul. 31 – Aug. 4 (2017).
- (3) Le Duc Anh, Nguyen Thanh Tu, Pham Nam Hai, Masaaki Tanaka. Fe-based narrow-gap ferromagnetic semiconductor: New materials for high-performance spintronic devices, 2017 Collaborative Conference on Materials Research (CCMR), Jeju Island, Korea, Jun. 26 (2017).
- (4) P. N. Hai, L. D. Anh, N. T. Tu, M. Tanaka. “High-performance Fe-doped ferromagnetic semiconductors”, International Workshop on Advanced Materials and Nanotechnology 2016 (IWAMN 2016), Hanoi, Vietnam, Nov. 3-5 (2016).
- (5) L. D. Anh, P. N. Hai, Y. Kasahara, Y. Iwasa, M. Tanaka. “N-type carrier-induced ferromagnetic semiconductor and electrical control of ferromagnetism by wavefunction engineering”, 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, New

Orleans, Louisiana, USA, Oct. 31- Nov. 10, 2016.

- (6) M. Tanaka, L. D. Anh, P. N. Hai, “Epitaxial Ferromagnetic Semiconductor Heterostructures: Control of Ferromagnetism by Wavefunction Engineering”, The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18), Nagoya, Japan, August 7-12 (2016).
- (7) L. D. Anh, P. N. Hai, Y. Kasahara, Y. Iwasa, M. Tanaka, “Control of magnetic properties by manipulating the carrier wavefunction in n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As quantum wells”, Vietnamese-Japanese Students' Scientific Exchange Meeting 2015, Kyoto University, Kyoto, Japan, October 31 (2015).
- (8) M. Tanaka, L. D. Anh, P. N. Hai, “Ferromagnetic semiconductors and heterostructures for semiconductor spintronics: Wavefunction engineering using n-type electron-induced ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As”, 12th Sweden - Japan QNANO Workshop, Hjortviken, Hindås, Sweden, September 24-25 (2015).
- (9) L. D. Anh, P. N. Hai, Y. Kasahara, Y. Iwasa, and M. Tanaka, “Electrical control of magnetic properties in n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As quantum wells”, EMN Istanbul Meeting, Istanbul, Turkey, July 1-4 (2015).
- (10) M. Tanaka, L. D. Anh, P. N. Hai, “Ferromagnetic semiconductors and heterostructures for semiconductor spintronics: New n-type electron-induced ferromagnetic semiconductor and its quantum wells”, Energy, Material, Nanotechnology Meeting 2015, Cancun, Mexico, June 8-11, (2015).
- 国際学会発表 (計 14 件)
- (1) L. D. Anh, P. N. Hai, M. Tanaka. “Realization of spontaneous spin splitting in the conduction band of n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As”, The 4th International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications (ISAMMA), Phu Quoc, Vietnam, Dec. 10 (2017).
- (2) M. Kobayashi, L. D. Anh, P. N. Hai, Y. Harada, T. Schmitt, A. Fujimori, M. Tanaka, M. Oshima, V. N. Strocov. “Valence-Band Electronic Structure of n-type Ferromagnetic Semiconductor (In,Fe)As”, Junjirou Kanamori Memorial International Symposium – New Horizon of Magnetism-, Tokyo, Japan, Sep. 27 (2017).
- (3) L. D. Anh, P. N. Hai, M. Tanaka. “Tuning of Magnetoconductance by Electrical Control of Band Alignment in a n+-(In,Fe)As/p+-InAs Esaki Diode”, Junjirou Kanamori Memorial International Symposium – New Horizon of Magnetism-, Tokyo, Japan, Sep. 27 (2017).

- (4) N. T. Tu, P. N. Hai, L. D. Anh, M. Tanaka. “High-temperature ferromagnetism in n-type and p-type Fe-doped ferromagnetic semiconductors”, 9th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technolog (Spintech IX), Fukuoka, Japan, Jun. 4 (2017).
- (5) L. D. Anh, P. N. Hai, M. Tanaka. “Tuning of Magnetoconductance by electrical control of band alignment in n+(In,Fe)As/p+InAs Esaki diode”, 9th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technolog (Spintech IX), Fukuoka, Japan, Jun. 4 (2017).
- (6) L. D. Anh, P. N. Hai, M. Tanaka. “Observation of large spin splitting in the conduction band of n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As”, APS March Meeting 2016, New Orleans, USA, Mar. 13 (2017).
- (7) T. Otsuka, Y. Arakawa, M. Tanaka, P. N. Hai. “Giant spin-valve effect in (Ga,Fe)As/(In,Fe)As spin diodes”, 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (2016 MMM), New Orleans, USA, Oct. 31 (2016).
- (8) M. Yoshida, A. Nagamine, M. Tanaka, P. N. Hai. “High Temperature Ferromagnetism in (In,Fe)As Grown on Vicinal GaAs Substrates”, 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (2016 MMM), New Orleans, USA, Oct. 31 (2016).
- (9) N. T. Tu, P. N. Hai, L. D. Anh, M. Tanaka. “High - Temperature Ferromagnetism in Heavily Fe - doped Ferromagnetic Semiconductor (Ga,Fe)Sb”, 19th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2016), Montpellier, France, Sep. 4 (2016).
- (10) T. Otsuka, Y. Arakawa, M. Tanaka, P. N. Hai. “Giant spin-valve effect in (Ga,Fe)Sb/(In,Fe)As ferromagnetic p-n junctions”, 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids (PASPS9), Kobe, Japan, Aug. 8-11 (2016).
- (11) N. T. Tu, P. N. Hai, L. D. Anh, M. Tanaka. “High-Temperature Ferromagnetism in Heavily Fe-doped Ferromagnetic Semiconductor”, 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids (PASPS9), Kobe, Japan, Aug. 8-11 (2016).
- (12) L. D. Anh, P. N. Hai, M. Tanaka. “Spontaneous spin-split band structure of n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As observed by tunneling spectroscopy”, 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids (PASPS9), Kobe, Japan, Aug. 8-11

(2016).

- (13) N. T. Tu, P. N. Hai, L. D. Anh, M. Tanaka. “Magnetic Properties and Intrinsic Ferromagnetism in Narrow-gap Ferromagnetic Semiconductor (Ga,Fe)Sb”, SSDM 2015, Sapporo, Japan, Sep. 27 (2015).

- (14) L. D. Anh, P. N. Hai, Y. Kasahara, Y. Iwasa, M. Tanaka. “Electrical control of ferromagnetism in InAs/(In,Fe)As/InAs trilayer quantum wells by wavefunction engineering”, 17th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS17), Sendai, Japan, Jul. 26 (2015).

その他の国内学会発表 (計 20 件)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称：強磁性半導体、その製造方法およびそれを用いた磁気センサー

発明者：ファムナムハイ、田中雅明、グエンタントゥ

権利者：同上

種類：国内優先権を伴う特許出願

番号：2017-109044

出願年月日：2017年6月1日。

国内外の別：国内

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

- (1) (In,Fe)As 強磁性半導体のスピン状態とバンド構造を解明

<http://magn.pe.titech.ac.jp/lab/?p=1077>

- (2) A change in sign brings a sign of change for spin-current devices

<https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.5027513>

- (3) 半導体のパラダイムシフトを起こす「スピントロニクス」に賭ける

http://www.titech.ac.jp/research/stories/faces24_pham.html

- (4) スピン自由度を用いた次世代半導体デバイス実現へ大きな進展

<https://www.titech.ac.jp/news/2016/037009.html>

- (5) 東大と東工大、スピン自由度利用の半導体デバイスに向け成果

<http://tech.nikkeibp.co.jp/dm/atcl/news/16/121905534/?rt=nocnt>

- (6) 丸文研究奨励賞を受賞

<http://magn.pe.titech.ac.jp/lab/?p=933>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

ファム ナム・ハイ (PHAM NAM・HAI)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：50571717