

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686040

研究課題名(和文) 鉄系キャリア誘起強磁性半導体材料と次世代スピndeバイスの創製

研究課題名(英文) Fe-based carrier-induced ferromagnetic semiconductors and their applications to next-generation spin devices

研究代表者

PHAM NAM・HAI (PHAM, NAM HAI)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：50571717

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では半導体スピndeバイスの応用に向けて、鉄系キャリア誘起強磁性半導体材料とそれを用いた次世代スピndeバイスの基盤技術を確立することを目標として、研究開発を行った。その結果、次の主な成果が得られた。(1)世界初n型電子誘起強磁性半導体(In,Fe)Asの作製に成功した。(2)(In,Fe)As量子井戸における量子サイズ効果の観測および波動関数制御による強磁性変調の世界初の実証に成功した。(3)新しいp型強磁性半導体(Ga,Fe)Sbの作製に成功した。(4)(Ga,Fe)Sb強磁性半導体において、世界最高のキュリー温度(230 K)を達成した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we aimed at fabrication of new Fe-based ferromagnetic semiconductors and development of new spin-devices utilizing them. The major results are as follows. First, we successfully fabricated (1) the world's first n-type electron-induced ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As. We observed (2) the quantum-size effect in quantum wells with ultrathin (In,Fe)As layers. We successfully controlled ferromagnetism by controlling the overlapping between Fe atoms and electron wavefunctions in spin-transistor structures with (In,Fe)As quantum wells for the first time. We then fabricated (3) a new p-type ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb, and improved the Curie temperature of this material up to 230 K, which is the highest value ever reported for intrinsic ferromagnetic semiconductors. Our results indicate that Fe-based ferromagnetic semiconductors are very promising materials for semiconductor spintronics.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：強磁性半導体 量子効果 スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

近年、半導体中の電子の電荷制御に加え、電子のスピン自由度を取り入れて、新しい機能デバイスを実現しようとする半導体スピントロニクスの研究が盛んに行われている。この分野において強磁性半導体は特に重要な材料系であり、大変注目されている。強磁性半導体は非磁性半導体の一部の原子が磁性原子で置換された半導体であり、既存の半導体結晶成長技術とデバイスプロセス技術と極めて高い親和性を持つ上、電界効果や光照射による磁気特性の変調など、従来の半導体や強磁性金属では得られない機能を有する材料でもある。これらの強磁性半導体材料を用いることによって、半導体ベースの超高速不揮発性メモリや再構成可能な超高速論理回路など、従来の半導体デバイスに無い新しい機能を実現できることが期待されている。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できないこと、2)キュリー温度が室温より低く、室温では強磁性にならないこと、3)強磁性の起源に関する統一的理解がないことなどが挙げられる。これらの欠点は強磁性半導体のデバイス応用に大きな障壁となっている。

2. 研究の目的

本研究では、Fe-As 結合を有する(In,Fe)As を初め、鉄系 III-V 族キャリア誘起強磁性半導体に着目した。これらの材料は今まで研究された強磁性半導体よりも次の点で優れている。

- ✓ p 型だけではなく n 型強磁性半導体も作製できる。従来の強磁性半導体では、磁性ドーパント (例えば Mn) が母体の半導体にスピンとキャリアを同時に提供するため、キャリアタイプの制御ができなかった。本研究で使用する鉄(Fe)のドーパントは III-V 族半導体中に中性状態であるため、スピンのみが Fe 原子によって提供される。そのため、別のドナーやアクセプターを提供することによって、強磁性半導体のキャリアタイプ (電子・正孔) を選択することができる。
- ✓ 室温で動作可能な強磁性半導体を作製できる。従来の Mn などの磁性ドーパントと比べて、Fe 原子の原子軌道間の交換相互作用が大きい。そのため、室温で動作可能な強磁性半導体が期待できる。
- ✓ 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。従来の強磁性半導体では、磁性原子が同時にスピンとキャリアを提供するため、磁性原子の sp-d 軌道の混成が発生し、バンドギャップ中に不純物バンドが存在する。キャリアは不純物バンド中に伝導すると理解されている。そのために、バンド構造の解析が極めて困難であり、強磁性メカニズムの解明もできない。それに対して、鉄系強磁性半

導体はスピンを担う局在電子と伝導を担うキャリアが分離されるため、キャリアが不純物バンドには存在しない。そのため、バンド構造と強磁性メカニズムの解析がより容易であり、デバイス応用上大きな利点となる。

本研究では、半導体スピンドバイスの実現に有望な材料として鉄系キャリア誘起強磁性半導体材料を開発し、それらの新材料を用いた次世代スピンドバイスの基盤技術の創製を目標とする。

- ◆(In,Fe)As を初め、鉄系キャリア誘起強磁性半導体の結晶成長技術の確立およびこれらの材料の磁気特性とスピン依存伝導特性を解明する。
- ◆鉄系キャリア誘起強磁性半導体を利用した半導体デバイスとしてスピンドイオード、スピン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、半導体スピンドバイスの基盤技術を確立し、超高速不揮発性メモリ、再構成可能な論理回路や円偏光レーザといったシステムの基盤技術をつくることを最終目標としている。

3. 研究の方法

◆ 分子線エピタキシー法による結晶成長

本研究の第一段階では、低温分子線エピタキシャル法を用いて、非平衡な状態で 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パント原子 (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。作製した材料の結晶構造の評価、磁気特性およびスピン依存伝導特性の評価を行う。

◆ 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、3端子デバイスとしてスピントランジスタ構造を作製する。作製したスピントランジスタ構造における電界効果およびスピンと依存伝導特性の評価を行う。

4. 研究成果

(1) 世界初 n 型強磁性半導体(In,Fe)As の開発

従来の Mn 系強磁性半導体は p 型しか作製できなかった問題点があるため、強磁性半導体のデバイスへ応用に大きな障害となっている。本研究では、Fe を InAs に導入し、さらにダブルドナーとして働く Be を同時添加することによって、世界で初めて n 型強磁性半導体(In,Fe)As の作製に成功した。図 1 に (In,Fe)As の透過型電子顕微鏡像(TEM)を示す。このサンプルに 9.1%と非常に高い濃度の Fe を大量に添加したにもかかわらず閃亜鉛鉱構造を保った単結晶な(In,Fe)As 混晶半導体が成長できたことが分かる。図 2 に (In_{0.82}Fe_{0.08})As サンプルにおける磁気円二色

性(MCD)スペクトルの電子濃度依存性を示す。電子濃度が低い場合、スペクトル強度が弱く、強磁性になっていないことに対して、電子濃度が $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上あると MCD 強度が大幅に増大したとともに、強磁性が発現する。これらの結果により、(In,Fe)As の強磁性は電子誘起であることを示した。電子誘起強磁性であれば、光照射や電界効果を使って、強磁性の変調が期待できる。

発表論文 : Appl. Phys. Lett. 101, 182403/1-5 (2012).

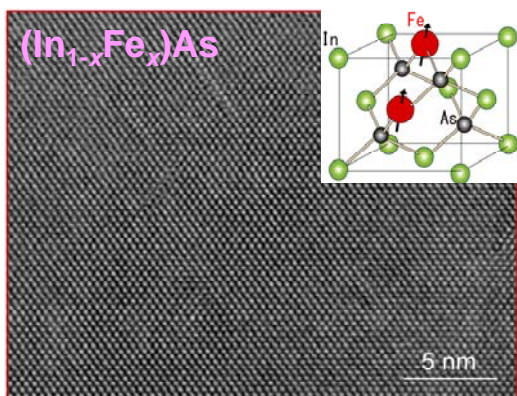


図 1. GaAs(001)基板の上に低温成長したn型強磁性半導体(In_{0.909},Fe_{0.091})As の透過型電子顕微鏡(TEM)格子像。右上に示す閃亜鉛鉱型の結晶構造をもつ混晶半導体であることがわかる。出典: Appl. Phys. Lett. 101, 182403/1-5 (2012).

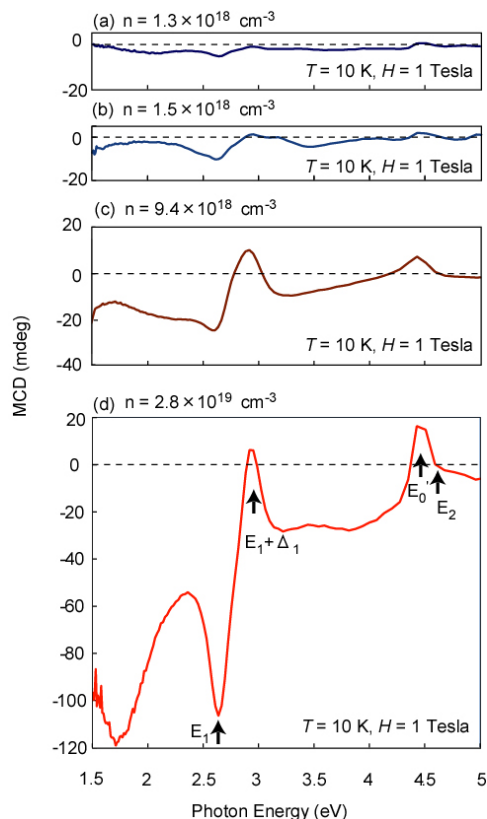


図 2. (In_{0.82},Fe_{0.08})As における MCD スペクトルの電子濃度依存性。(In,Fe)As は電子誘起強磁性半導体であることが分かる。出典: Appl. Phys. Lett. 101, 182403/1-5 (2012).

(2) 独特な 8 回対称性磁気抵抗効果の観測

一般的に、磁性体では、結晶構造を反映する 4 回対称の磁気抵抗効果を示す。しかし、本研究では、(In,Fe)As の強磁性半導体の独特な 8 回対称性磁気抵抗効果を見出した。この高次対称性は Fe-As の正四面体的な結合で説明できることを明らかにした。

発表論文 : Appl. Phys. Lett. 100, 262409/1-5 (2012).

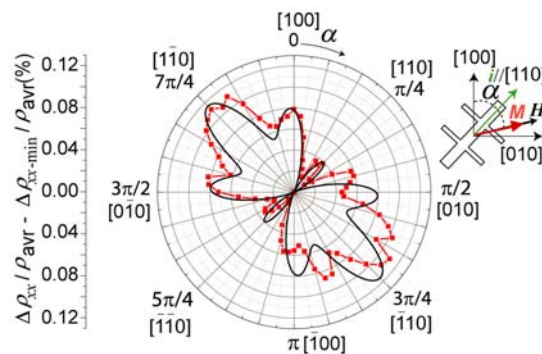


図 3. (In,Fe)As における異方性磁気抵抗効果。独特な 8 回対称の異方性が観測されている。出典: Appl. Phys. Lett. 100, 262409/1-5 (2012).

(3) 伝導電子の伝導帯に滞在することを確認

従来の Mn 系強磁性半導体では、キャリアは不純物バンド中に伝導すると理解されている。そのために、バンド構造の解析が極めて困難であり、強磁性メカニズムの解明も簡単できない。それに対して、n 型の (In,Fe)As では、伝導電子が伝導帯に滞在することを明らかにした。そのため、バンド構造と強磁性メカニズムの解析がより容易であり、デバイス応用上大きな利点となる。

発表論文 : Appl. Phys. Lett. 101, 252410/1-5 (2012)

(4) 量子効果の観測と波動関数制御による強磁性変調

従来の強磁性半導体では、結晶性が悪く、移動度が非常に低くて ($1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)、キャリアの coherency がないため、量子サイズ効果が発現できない。それに対して、本研究で作製した (In,Fe)As は最大で $600 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ と二桁以上高い移動度を示す。本研究では量子井戸構造を作製し、量子サイズ効果の観測に成功した。さらに、量子井戸の幅を変えて、波動関数と磁性層との相対的な位置を制御することによって、強磁性変調に成功した。この「波動関数制御による強磁性変調」は **世界初の実証である。**

発表論文 : Appl. Phys. Lett. 104, 042404/1-5 (2014).

(5) 強磁性発現のメカニズムの解明

本研究で開発した n 型強磁性半導体(In,Fe)As は狭ギャップ半導体にもかかわらず、厚膜では 2.8 eV、量子井戸では 4.5 eV と非常に大きい s-d 交換相互作用を示す。この強い強磁性の起源を探るために、(In,Co)As 磁性半導体を作製し、(In,Fe)As との比較を行った。その結果、(In,Co)As では、Co スピン間の相互作用が反強磁性的であることが分かった。この結果から、強磁性の発現は磁性原子の d 軌道エネルギー準位に強く依存していることを明らかにした。具体的には、強磁性を発現させるためには、d 軌道エネルギー準位が母体半導体の伝導帯あるいは価電子帯の近くに存在する必要があることを示唆した。

発表論文 : Jpn. J. Appl. Phys. 53, 04EM05/1-5 (2014)

(6) 歪みおよび量子構造エンジニアリングによる磁気特性の改善

さらに(In,Fe)As に対して、適切な歪みおよび量子井戸構造を作製すれば、同じ条件でもキュリー温度を倍増できることを示した。また、その強磁性の増大も理論モデルに基づいた数値計算でよく再現できた。

発表論文 : Appl. Phys. Lett. 104, 142406 (2014)

(7) Fe 系 p 型強磁性半導体(Ga,Fe)Sb の作製および世界最高のキュリー温度 (230 K) の達成

分子線エピタキシー結晶成長技術を使って、新しい p 型強磁性半導体(Ga,Fe)Sb の作製に成功した。Fe 濃度 13.7%において狭ギャップ強磁性半導体の中に最も高いキュリー温度 140K を実現した。さらに 20%までの高濃度の Fe を添加することに成功し、**III-V 族強磁性半導体では世界最高のキュリー温度(230 K)を達成した**。この新しい強磁性半導体において、正孔濃度および Fe 濃度を増やせば、室温強磁性半導体の実現が期待できる。

発表論文 : Appl. Phys. Lett. 105, 132402/1-4 (2014).

学会発表 : Thanh Tu Nguyen, Pham Nam Hai, Le Duc Anh, Masaaki Tanaka; 第 62 回応用物理学会春季学術講演会; 14a-D2-10; 東海大学、2015 年 3 月 11-14 日。

(8) (In,Fe)As チャンネルのスピントランジスタにおける電界効果を用いた波動関数制御による強磁性変調の実証

(In,Fe)As 量子井戸構造をチャンネルとした電界効果型スピントランジスタを作製し、ゲート電圧を印加することによって、量子井戸内の波動関数の形を電氣的に制御し、キュリー温度の変調に成功した。従来の技術と比べてチャンネルの電子濃度をほとんど変える必要がなく、非常に低消費電力(2~4 桁少ない電力)で磁性の変調に成功した。**これも世界初の実証である。**

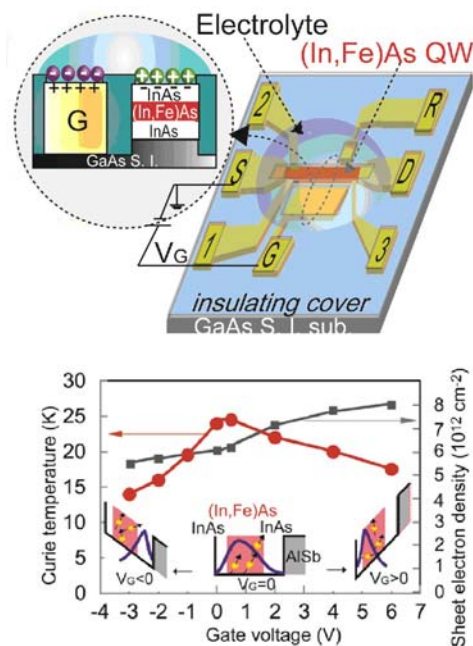


図 4. InAs/(In,Fe)As/InAs 三層構造量子井戸をチャンネル、電解液による電気二重層をゲートとするスピントランジスタ。ゲート電界をかけることにより、2 次元電子キャリアの波動関数を動かし、(In,Fe)As 層との重なりを変えることにより、キュリー温度 T_C を約 2 倍 (13K → 25K) 変化させることに成功した。

学会発表 : Duc Anh Le, Nam Hai Pham, Yuichi Kasahara, Yoshihiro Iwasa, Masaaki Tanaka; 第 62 回応用物理学会春季学術講演会; (招待講演) 14a-D2-2; 東海大学、2015 年 3 月 11 日 ~ 14 日。

5. 主な発表論文等

【雑誌論文】(計 14 件、主な論文は次の 10 件)

1. N. T. Tu, P. N. Hai, L. D. Anh, M. Tanaka, “(Ga,Fe)Sb: A p-type ferromagnetic semiconductor”, Appl. Phys. Lett. 105, 132402/1-4 (2014). 査読有
2. M. Kobayashi, L. D. Anh, P. N. Hai, Y. Takeda, S. Sakamoto, T. Kadono, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, Y. Harada, M. Oshima, M. Tanaka and A. Fujimori, “Spin and orbital magnetic moments of Fe in the n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As”, Appl. Phys. Lett. 105, 032403/1-4 (2014). 査読有
3. D. Sasaki, L. D. Anh, P. N. Hai, M. Tanaka, “Interplay between strain, quantum confinement, and ferromagnetism in strained ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As thin films”, Appl. Phys. Lett. 104, 142406/1-5 (2014). 査読有
4. M. Kobayashi, H. Niwa, Y. Takeda, A. Fujimori, Y. Senba, H. Ohashi, A. Tanaka, S. Ohya, P. N. Hai, M. Tanaka, Y. Harada, and M. Oshima, “Electronic Excitations of a Magnetic Impurity State in the Diluted

- Magnetic Semiconductor (Ga,Mn)As”, Phys. Rev. Lett. 112, 107203/1-5 (2014). 査読有
5. L. D. Anh, P. N. Hai, M. Tanaka, “Control of ferromagnetism by manipulating the carrier wavefunction in ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As quantum wells”, Appl. Phys. Lett. 104, 042404/1-5 (2014). 査読有
 6. N. T. Tu, L. D. Anh, P. N. Hai, M. Tanaka, “Epitaxial growth and characterization of n-type magnetic semiconductor (In,Co)As”, Jpn. J. Appl. Phys. 53, 04EM05/1-5 (2014). 査読有
 7. M. Tanaka, S. Ohya, P. N. Hai (invited review paper), “Recent Progress in III-V based ferromagnetic semiconductors: Band structure, Fermi level, and tunneling transport”, Appl. Phys. Rev. 1, 011102/1-25 (2014). 査読有
 8. P. N. Hai, L. D. Anh, M. Tanaka, “Electron effective mass in n-type electron-induced ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As: Evidence of conduction band transport”, Appl. Phys. Lett. 101, 252410/1-5 (2012). 査読有
 9. P. N. Hai, D. Sasaki, L. D. Anh, M. Tanaka, “Crystalline anisotropic magnetoresistance with two-fold and eight-fold symmetry in (In,Fe)As ferromagnetic semiconductor”, Appl. Phys. Lett. 100, 262409/1-5 (2012). 査読有
 10. P. N. Hai, L. D. Anh, S. Mohan, T. Tamegai, M. Kodzuka, T. Ohkubo, K. Hono, M. Tanaka, “Growth and characterization of n-type electron-induced ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As”, Appl. Phys. Lett. 101, 182403/1-5 (2012). 査読有
- [学会発表](計54件)**
招待講演 (計 13 件)
1. Duc Anh Le, Nam Hai Pham, Yuichi Kasahara, Yoshihiro Iwasa, Masaaki Tanaka, “Electrical modulation of ferromagnetism via controlling the wavefunction in n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As quantum wells”, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 2015 年 3 月 11 日~14 日.
 2. P. N. Hai, “鉄系強磁性半導体とそのヘテロ構造”, 第 19 回 半導体スピン工学の基礎と応用 PASPS-19, 東京大学, 2014 年 12 月 15 日~16 日.
 3. M. Tanaka, P. N. Hai, and L.D. Anh, “Recent progress in III-V based ferromagnetic semiconductors: N-type (In,Fe)As and its heterostructures”, SPIE Nano Science + Engineering, Spintronics Symposium, San Diego, 17-21, August 2014.
 4. P. N. Hai, L. D. Anh, D. Sasaki, M. Tanaka, “Electron-induced ferromagnetism in Fe-doped narrow-gap semiconductors”, 15th International Union of Materials Research Societies, International Conference in Asia (IUMRS-ICA 2014), Fukuoka, Japan 24-30 August, 2014.
 5. M. Tanaka, P. N. Hai, and S. Ohya, “Recent Progress in Ferromagnetic Semiconductors”, 6th Indo-Japan Seminar ‘Physics and Design of Multi-Functional Correlated Materials’, 東京大学, 2014 年 3 月 24 日.
 6. P. N. Hai, L. D. Anh, D. Sasaki, M. Tanaka, “Electron-induced ferromagnetism in Fe-doped semiconductors”; 固体エレクトロニク・光エレクトロニク研究会; 東京大学, 2014 年 3 月 12 日.
 7. P. N. Hai, 東北大通研共同プロジェクト・組織連携型「スピントロニクス国際連携」秋特別講演会; “N型電子誘起強磁性半導体(In,Fe)As ~次世代強磁性半導体の開発に向けて~”; ラフォーレ蔵王 (宮城県刈田郡蔵王町), 2013 年 10 月 17-19 日.
 8. M. Tanaka, Pham Nam Hai, Le Duc Anh, Daisuke Sasaki, “Recent progress of ferromagnetic semiconductors N-type electron-induced ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As”, International Conference and Exhibition on Lasers, Optics & Photonics (Optics 2013), San Antonio, TX, USA, Oct, 7, 2013.
 9. M. Tanaka, P. N. Hai, L. D. Anh, S. Ohya, “Recent progress of ferromagnetic semiconductors: Electron-induced n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As”, The 16th International Symposium on the Physics of Semiconductors and Applications (ISPSA-XVI), Jeju, Korea, July 3, 2013.
 10. M. Tanaka, S. Ohya, P. N. Hai, R. Nakane, “Spintronics materials and devices – ferromagnetic semiconductors and hetero structures”, 2012 Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials & Devices (COMMAD), Melbourne, Australia, Dec 12-14, 2012.
 11. M. Tanaka, P. N. Hai, L. D. Anh, “Iron-Based n-Type Electron-Induced Ferromagnetic Semiconductor”, International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM 2012), Istanbul, Turkey, April 29 – May 4, 2012.
 12. P. N. Hai, L. D. Anh, D. Sakaki, M. Tanaka, “N-type electron-induced ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As”, Nature Conference “Frontiers in Electronic Materials”, Aachen, Germany, June 17-20, 2012.
 13. M. Tanaka, P. N. Hai, and L. D. Anh, “A new Fe-based n-type electron-induced ferromagnetic semiconductor: (In,Fe)As”, 2nd International Workshop on Magnetic Materials and Nano structures, Tokai, Japan, January 10-13, 2012.

国際学会発表（計 17 件、主な発表は下記の 11 件）

1. N.T. Tu, P.N. Hai, L.D. Anh, M. Tanaka; “Epitaxial Growth and Characterization of a New P-type Ferromagnetic Semiconductor (Ga,Fe)Sb”; 18th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE 2014); FrC1-3; Flagstaff, Arizona, USA; Sep. 7-12, 2014.
2. Le Duc Anh, Pham Nam Hai, Yuichi Kasahara, Yoshihiro Iwasa, and Masaaki Tanaka; “Electrical Control of Ferromagnetism by Wave Function Engineering in n-type Ferromagnetic Semiconductor (In,Fe)As Quantum Wells”; 32th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2014); Austin, Texas, USA; Aug. 10-15, 2014.
3. Pham Nam Hai, Daisuke Sasaki, Le Duc Anh, Masaaki Tanaka; “Interplay between strain, quantum confinement, and ferromagnetism in strained (In,Fe)As thin films”; 8th International Conference on Physics and Applications of Spin Phenomena in Solids (PASPS VIII); Washington D.C., USA; Jul. 28-31, 2014.
4. Le Duc Anh, Pham Nam Hai, Yuichi Kasahara, Yoshihiro Iwasa, and Masaaki Tanaka; “Electrical control of ferromagnetism by wavefunction engineering in a ferromagnetic trilayer (InAs/(In,Fe)As/InAs) quantum well”; 8th International Conference on Physics and Applications of Spin Phenomena in Solids (PASPS VIII); BA4; Washington D.C., USA; Jul. 28-31, 2014.
5. T.T. Nguyen, D.A. Le, N.H. Pham and M. Tanaka, “Epitaxial growth and properties of n-type magnetic semiconductor (In,Co)As”; 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2013); PS-12-13; Fukuoka, Japan, Sep. 24-27, 2013.
6. Pham Nam Hai, Soichiro Furukawa, Le Duc Anh, Masaaki Tanaka; “Effects of co-doping on electronic and magnetic properties of n-type electron-induced ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As”, Spintech VII, M15; Chicago, Illinois, USA, Jul. 31, 2013.
7. Le Duc Anh, Pham Nam Hai, and Masaaki Tanaka, 12th Joint MMM/Intermag Conference, BH-05, “Control of ferromagnetism by moving the electron wavefunction in ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As quantum wells”, Chicago, Illinois, USA, Jan. 14-18, 2013.
8. Daisuke Sasaki, Pham Nam Hai, Le Duc Anh and Masaaki Tanaka, The 17th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2012), MoA-1-9, “Anisotropic magnetoresistance in n-type electron-induced ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As:

two-fold and eight-fold symmetry”, Nara, Japan, Sept. 23-28, 2012.

9. Le Duc Anh, Daisuke Sasaki, Pham Nam Hai and Masaaki Tanaka, The 7th International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS-VII), P-129, “Properties of ferromagnetic n-type (In,Fe)As: quantum size effect and crystalline anisotropic magnetoresistance”, Eindhoven, Netherlands, Aug 5-8, 2012
10. Pham Nam Hai, Le Duc Anh, Daisuke Sasaki and Masaaki Tanaka, The 7th International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS-VII), P-121, “Making n-type electron-induced ferromagnetic semiconductor with tetrahedral Fe-As bonding”, Eindhoven, Netherlands, Aug 5-8, 2012.
11. Pham Nam Hai, Le Duc Anh and Masaaki Tanaka, 31th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2012), 52.2, “(In,Fe)As: A new n-type electron-induced ferromagnetic semiconductor with tetrahedral Fe-As bonding”, Zurich, Switzerland, Jul 29 – Aug 3, 2012.

その他の国内学会発表（計 24 件）

【図書】(計 0 件)

【産業財産権】

- 出願状況（計 0 件）
- 取得状況（計 0 件）

【その他】

ホームページ等

1. 安藤研究所 第 26 回安藤博記念学術奨励賞を受賞
<http://www.ando-lab.or.jp/rekidai-6.html>
2. 応用物理学会スピントロニクス研究会第 1 回英語講演奨励賞を受賞！
http://magn.pe.titech.ac.jp/lab/?page_id=614
3. 2014 年応用物理学会秋季学術講演会の「講演奨励賞」を受賞！
http://magn.pe.titech.ac.jp/lab/?page_id=521

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・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：50571717

(2) 研究分担者

()
研究者番号：

(3) 連携研究者

()
研究者番号：