

氏名	PHAM NAM HAI
所属機関	東京工業大学
研究題目	再設計可能なやわらかいハードウェアに向けたスピントロニクス材料とデバイスの研究

1. 研究の目的

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。これらの半導体デバイスにおいては機能が高速な電子の電荷によって支えられているため、動作が大変高速である。一方、強磁性体はハードディスクなどの情報記録媒体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。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。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な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。

そこで、本研究では Fe-As や Fe-Sb などの結合を有する鉄系 III-V 族キャリア誘起強磁性半導体に着目した。本研究が提案した鉄系強磁性半導体は今までに研究された強磁性半導体よりも次の点で圧倒的に優れる。

- ・ p 型だけではなく n 型強磁性半導体も作製できる
- ・ 室温で動作可能な強磁性半導体を作製できる
- ・ 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

本研究では鉄系キャリア誘起強磁性半導体材料を用いた再構成可能なスピン機能半導体デバイスの創製を目標とする。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 n-p 接合ダイオード、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、デバイスレベルの実証を行う。

2. 研究の内容(手法、経過、評価など)

(1) 高キュリー温度強磁性半導体(Ga,Fe)Sb の実現

スピンドायオードの作製に必要な鉄系 p 型強磁性半導体 (Ga, Fe)Sb の結晶成長を行った。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た。このサンプルのキュリー温度が 230 K に達した新世界記録であった [Phys. Rev. B. 92, 144403 (2015)]。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 [Appl. Phys. Lett. 108, 192401 (2016)]。本研究成果は応用物理学会スピントロニクス研究会第 4 回英語講演奨励賞を受賞した。また、この研究成果は米国 AIP によって注目論文として選べられ、Appl. Phys. Lett. 誌の Vol108, Issue19 号のカバーとして飾ったとともに、一般読者向けの解説も掲載されました。



Volume 108, Issue 19, 09 May 2016

FEATURED ARTICLE



High-temperature ferromagnetism in heavily Fe-doped ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4948692>

Ferromagnetism + Semiconductor = Spintronics: New Opportunities for Improving Electronics

From the Journal: *Applied Physics Letters*

By AIP News Staff

WASHINGTON, D.C., May 9, 2016 – More, faster, better, cheaper. These are the demands of our device-happy and data-centered world. Meeting these demands requires technologies for processing and storing information. Now, a significant obstacle to the development of next-generation device technologies appears to have been overcome, according to researchers from the University of Tokyo (Japan), Tokyo Institute of Technology (Japan) and Ho Chi Minh University of Pedagogy (Vietnam).

図 1. 室温強磁性を実現した研究成果が注目論文として Appl. Phys. Lett. 誌のカバーを飾りました。

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です)

(2) 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)ジャスト基板に成長したサンプルは300 Kにおいて完全に常磁性を示したことに対して、オフ基板上に成長したサンプル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可能性が高いことを示唆している。本研究成果は2016年応用物理学会春季学術講演会で発表済みである。

(3) スピンドाय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ドાય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。pn接合はすべての半導体デバイスが持つ構造であるだけに、そのスピン依存伝導特性の解明が極めて重要な課題である。本研究では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。本研究成果は2016年応用物理学会秋季学術講演会および国際学会のPASPS9で口頭発表する予定である。

(4) スピン電界効果トランジスタ構造の作製と波動関数制御による強磁性変調

図2(a)に示すような(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。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。本研究に波動性の強い(In, Fe)As量子井戸を含む電界効果トランジスタ構造を作製し、世界で初めて波動関数制御による強磁性変調に成功した[Phys. Rev. B 92, 161201(R) (2015)]。図2(b)にその様子を示す。本実証によって、従来に磁性変調に必要とする面キャリア密度の変調量 $10^{12} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ から 10^{11} 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。また、本研究成果の一部はアジア太平洋物理学会連合(AAPPS)の機関誌であるAAPPS Bulletin12月号(ノーベル物理学賞特集号)に、注目研究成果としてPhysics Focusで紹介されました。

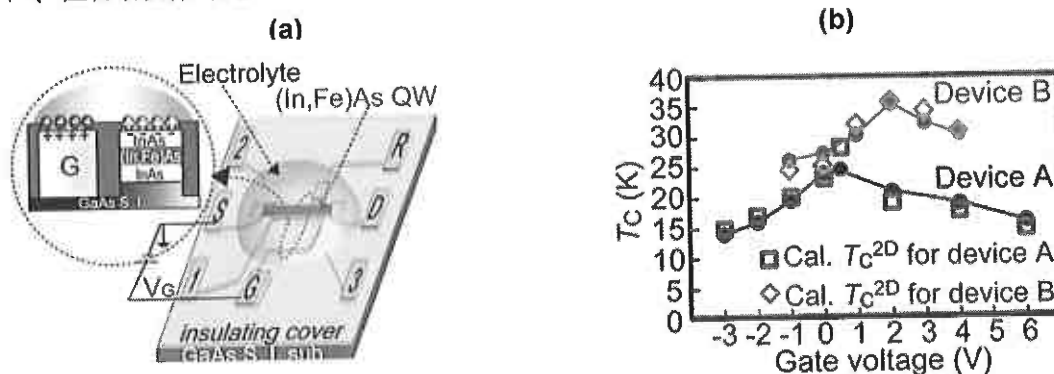


図2.(a) (In,Fe)As量子井戸のチャンネルを有するスピン電界効果トランジスタ構造と(b)キュリー温度のゲート電圧依存性。トランジスタA: InAs 5nm / (In,Fe)As 8nm / InAs 2nmの量子井戸、トランジスタB: InAs:Be 4nm / InAs 2.4nm / (In,Fe)As 4nm / InAs 1.6nmの量子井戸。どちらのデバイスにおいてもゲートの印加によって、波動関数と(In,Fe)Asとの重なりを制御し、強磁性を効率よく変調した。Phys. Rev. B 92, 161201(R) (2015)から出典。

3. 研究の結論、今後の課題

本研究では、強磁性半導体デバイスの実現に向けて、n型強磁性半導体(In, Fe)As および p型強磁性半導体(Ga, Fe)Sbを中心に物性制御および半導体スピンドバイスの実証を行った。結晶成長技術を工夫して、n型と p型強磁性半導体とも世界で初めて室温強磁性を実現した。さらに、強磁性 pn 接合における超巨大磁気抵抗効果を観測した。また、強磁性半導体をチャンネルとした電界効果トランジスタ構造において、電界効果を用いた「波動関数制御」による磁性変調にも成功したなど、ほぼ予定通りに研究が進んできた。これらの結果はいずれも研究代表者が提案した鉄系強磁性半導体の特色を生かした成果だといえる。

鉄系強磁性半導体はまだポテンシャルが高い。特に、キュリー温度に関しては、初めて室温を超えた 340 K が得られたが、さらに結晶成長を工夫すれば、500 K も夢ではない。そのような金属並みの高いキュリー温度を達成できれば、強磁性半導体を用いた室温動作磁気抵抗メモリやスピンドイオードやスピントランジスタなど、従来の材料では実現できなかった半導体スピンドバイスを実現することができる。

4. 成果の価値(とくに判りやすく書いて下さい)

4. 1. 社会的価値

現代社会では、スマートフォンやスマートテレビを初め、様々な情報通信機器 (ICT) が普及している。現在、日本の ICT 機器の電力使用量は、全電力使用量の 6% 程度であるが、経済産業省の予測によると 2030 年に全電力量の約 40% さらに、2050 年に全電力量の約 60% に上ると予測される。一方、近年に半導体集積回路の微細化に伴うトランジスタのリーク電流の増大が顕著となり、半導体集積回路で消費される電力に占める待機電力の割合が急増している。22nm 世代のリソグラフィ技術で作製された電子回路では、待機電力がすでに電子回路の消費電力の約 50% まで上る。この待機電力は集積回路の情報処理にまったく貢献しない無駄なエネルギーとして消費される。

この状況を打開するために、半導体スピントロニクス技術が大変注目されている。特に強磁性体は電子スピンの「不揮発性」を有するため、待機電力ゼロの電子機器には最適である。従って、本研究の強磁性半導体の不揮発性を生かせば、超高速不揮発性メモリ、ノーマルオフ論理回路など、超低消費電力デバイス技術として期待が高い。

4. 2. 学術的価値

強磁性半導体として Mn 系の (In, Mn)As や (Ga, Mn)As などが 20 年以上に研究されている。(Ga, Mn)As や (In, Mn)As は比較的の高いキュリー温度(最大 200 K)、かつキャリア密度によって強磁性が変化する「キャリア誘起強磁性」が発現するために、世界的に研究されています。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未解決課題があります。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な理解が得られていないことなどが挙げられます。これらの未解決課題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ます。

本研究は以上の問題点を解決できる革新的な強磁性半導体として 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、その材料の開発、物性の解明およびデバイスの実証に成功した。本研究の鉄系強磁性半導体が 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た。また、これらの研究成果が従来の理論研究を再構築する必要があることを強く示唆しています。

4. 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いて下さい。未発表のものは公表予定を書いて下さい)

1. 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).
2. S. Sakamoto, L. D. Anh, P. N. Hai, G. Shibata, Y. Takeda, M. Kobayashi, Y. Takahashi, T. Koide, M. Tanaka, 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).
3. L. D. Anh, D. Kaneko, P. N. Hai, M. Tanaka, "Growth and characterization of insulating ferromagnetic semiconductor (Al,Fe)Sb", Appl. Phys. Lett. 107, 232405/1-4 (2015).
4. L. D. Anh, P. N. Hai, Y. Kasahara, Y. Iwasa, M. 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).
5. 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).