

令和 6 年 3 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21961

研究課題名(和文)強磁性材料の量子効果を用いた超高速低消費電力磁化制御法の開発

研究課題名(英文) Realization of ultra-fast and low-power-consumption method for magnetization control utilizing quantum effects of ferromagnetic materials

研究代表者

Le Duc Anh (Le, Duc Anh)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教

研究者番号：50783594

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はピコ秒オーダーの超高速磁化制御法を実現するために強磁性半導体の低次元構造においてキャリア波動関数を高速に制御する新しい方法を提案し、その原理実証に成功した。実験ではポンプアンドプローブ法を用いてN型強磁性半導体(In,Fe)Asの量子井戸構造にポンプ光のfsパルスの照射による波動関数の変化が600fsという超高速の磁化増大過程を誘起した。更に強磁性半導体の低次元構造としてFeドーピング強磁性超格子、強磁性量子ドット材料の研究開発を行い、提案した超高速磁化制御法の応用可能な材料系を広範囲に調べた。本成果で世界最速の磁化増大が実現でき、次世代の超高速低消費電力スピndeデバイスに繋がると期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代の電子デバイスは超高速と低消費電力が強く要求される中、電子のスピン自由度を活用スピndeデバイスとスピンに基づいた情報処理が有力候補になりつつある。スピndeデバイスの基本操作である磁化制御を如何により高速、低電力で実現できるかが大きな課題である。本萌芽研究ではその究極的な方法として低次元強磁性構造の波動関数制御法を提案し、現在の制御法より1000倍も速い世界最速の磁化増大制御の実証まで成功した。この新制御法がより広範囲で応用できれば次世代の超高速低消費電力スピndeデバイスに繋がり現存の情報処理技術に革新的な進歩をもたらせると期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this research, in order to realize an ultrafast control of magnetic properties of ferromagnets, we proposed and successfully demonstrated a new method by controlling the carrier wavefunction in low-dimensional ferromagnetic structures. In the demonstration experiment using a pump-and-probe method, we were able to induce a magnetization enhancement in an unprecedentedly short time scale of 600 fs in N-type ferromagnetic semiconductors (FMS) (In,Fe)As quantum wells, which was caused by the ultrafast changing of the electron wavefunctions upon the irradiation of a fs-pulse of the pumping laser. Furthermore, we developed some other low-dimensional ferromagnetic structures of Fe-doped FMSs such as ferromagnetic superlattices and quantum dots, to which the proposed ultrafast magnetization control method can possibly be applied. The realization of the world's fastest magnetization enhancement here promisingly leads to the next-generation of ultra-high-speed, low-consumption spin devices.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：Fe系強磁性半導体 超高速磁化制御 強磁性量子井戸 波動関数制御法 ポンプアンドプローブ法

1. 研究開始当初の背景

今日の情報社会はデータ量やインターネット接続機器の数が爆発的に増大するビッグデータや IoT(もののインターネット化)の時代を迎える中で、その莫大な情報記録と処理を担う電子デバイスは「高速化」、「高密度化」、「低消費電力化」が強く要求される。既存の電子デバイスでは、ハードディスクのような強磁性体の電子の「スピン」の秩序(磁化と呼ばれる)による「不揮発性」を利用する情報記録デバイスと、集積回路のような半導体の電子の「電荷」の高速移動によって支えられる情報処理デバイスに大別されている。現在の情報システムはこの2種類のデバイスを相補的に利用して「高速度」と「低消費電力」を実現しているが、デバイス間のデータ通信速度が非常に遅く全システムの律速になっている。次世代の電子デバイスに向けて、半導体と磁性体の異なる特長と機能を融合し、磁性体の不揮発性機能を合わせ持つ高速かつ低消費電力のスピンドeviceが望ましく、全世界で盛んに研究されている。スピンドeviceの出力は強磁性体の磁化方向(スピンの方向)で制御されるが、スピンドynamic過程を支配する各相互作用機構は100 fs ~ 10 ps程度で非常に速いため、**原理的にスピンドeviceの動作速度が~psオーダーで実現可能である**(図1)。しかし、磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)を代表とした最も熟成したスピンドeviceでも磁化制御が1ナノ秒(ns)程度で実現され、従来の半導体トランジスタ(MOSFET)より一桁も遅い。また磁化方向を反転するのに電流駆動磁化制御法が採用され、 $10^6 \sim 10^7 \text{ A/cm}^2$ という極めて高い電流密度を流す必要があるため、大量な電力を消費してしまう。スピンドeviceに基づいた情報システムを実現するには、**高速かつ低パワーの磁化制御法が最も重要な基盤技術として確立する必要がある**。磁化制御過程の電力を究極に低減するために、動作電流がゼロに近い電圧駆動磁化制御手法に切り替える必要がある。最も一般的な電圧による磁化制御法は金属ゲート/絶縁膜/強磁性体というキャパシタ構造で強磁性体中のキャリア濃度を変調する。しかし、この手法は大きなキャリア濃度の変化量($\Delta Q = 10^{13} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-2}$)が必要のため、大きな消費電力($E = \Delta Q^2 / 2C$, Cは静電容量である)と遅い動作速度(~ns)がデバイス応用上の難問である。キャリア変調操作がスピンドynamic過程より遥かに遅いため、真性なスピン回転過程を追究することもできない。

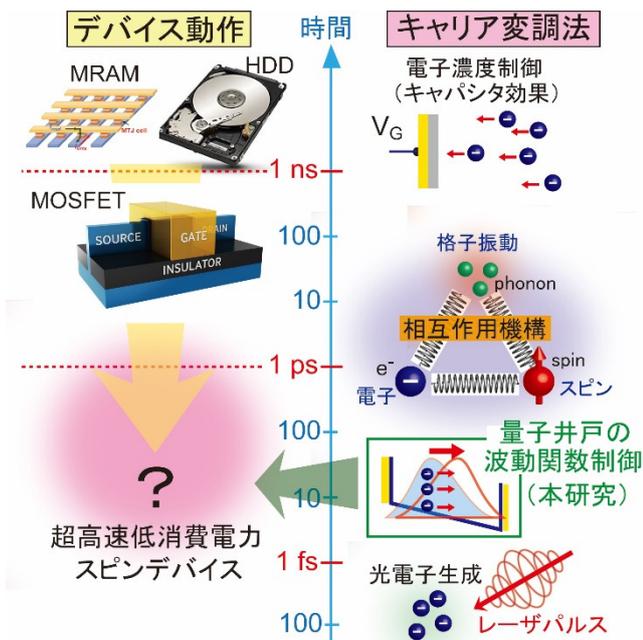


図1. 既存デバイスの動作速度(左)と各キャリア特性変調法の時間スケール(右)。磁化制御過程を決める電子-スピン-フォノンの相互作用の時間スケールも掲載される。

の出力は強磁性体の磁化方向(スピンの方向)で制御されるが、スピンドynamic過程を支配する各相互作用機構は100 fs ~ 10 ps程度で非常に速いため、**原理的にスピンドeviceの動作速度が~psオーダーで実現可能である**(図1)。しかし、磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)を代表とした最も熟成したスピンドeviceでも磁化制御が1ナノ秒(ns)程度で実現され、従来の半導体トランジスタ(MOSFET)より一桁も遅い。また磁化方向を反転するのに電流駆動磁化制御法が採用され、 $10^6 \sim 10^7 \text{ A/cm}^2$ という極めて高い電流密度を流す必要があるため、大量な電力を消費してしまう。スピンドeviceに基づいた情報システムを実現するには、**高速かつ低パワーの磁化制御法が最も重要な基盤技術として確立する必要がある**。磁化制御過程の電力を究極に低減するために、動作電流がゼロに近い電圧駆動磁化制御手法に切り替える必要がある。最も一般的な電圧による磁化制御法は金属ゲート/絶縁膜/強磁性体というキャパシタ構造で強磁性体中のキャリア濃度を変調する。しかし、この手法は大きなキャリア濃度の変化量($\Delta Q = 10^{13} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-2}$)が必要のため、大きな消費電力($E = \Delta Q^2 / 2C$, Cは静電容量である)と遅い動作速度(~ns)がデバイス応用上の難問である。キャリア変調操作がスピンドynamic過程より遥かに遅いため、真性なスピン回転過程を追究することもできない。

2. 研究の目的

本研究では次世代のスピンドeviceに向けて、ピコ秒(ps)オーダーの超高速低消費電力磁化制御法の実現を目指す。

超高速磁化制御の手法として、低次元の強磁性半導体構造(量子井戸、量子ドット)においてキャリアの波動関数を制御する手法の実証したい。このために、低次元強磁性半導体構造の研究開発及びピコ秒(ps)オーダーの超高速磁化制御の実証という2つの目標を設定した。

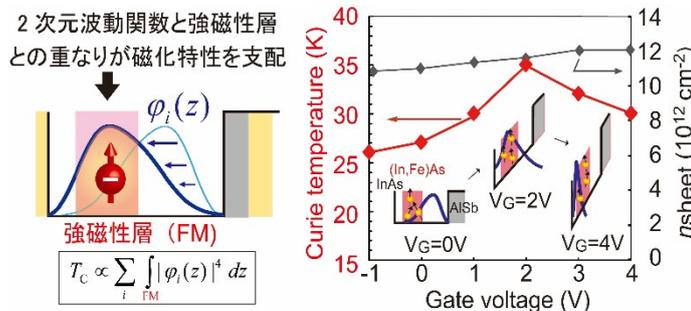


図2 波動関数制御による磁性変調の概念と実証例: InAs/(In,Fe)As/InAs 三層構造量子井戸においてゲート電界により、2次元電子キャリアの波動関数を動かし、(In,Fe)As層との重なりを変え、キュリー温度 T_c を約2倍変化させることに成功した[PRB 92, 161201(R) (2015)].

3. 研究の方法

本研究で考案した新しい手法: 強磁性量子井戸の波動関数工学による革新的な高速磁性変調

高品質の強磁性材料を超薄膜化・微細化およびそのヘテロ構造を作製

することによって、量子効果が期待できる。実際に、最近我々が作製した鉄(Fe)系強磁性半導体(In,Fe)As の薄膜構造において、明瞭な量子サイズ効果の観測に成功した[Appl. Phys. Lett. **104**, 042404 (2014)]。このような低次元量子構造においてキャリアの2次元波動関数と強磁性層の重なりの変調によりキャリア濃度がほとんど変化しないで磁気特性を制御できること、我々が世界で初めて実証した[Phys. Rev. B **92**, 161201(R) (2015)](図2)。この波動関数制御法は、i)キャリアの総数の変化を要しないこと、ii)キャリアの移動距離が量子井戸の幅の数 nm で非常に短いことから、従来のキャパシタ効果による電子濃度制御法で実現できない ps オーダーの超高速かつ超低消費電力の磁化制御が期待できる。

4. 研究成果

4-1. 低次元強磁性半導体構造の研究開発

(1) (In,Fe)As のバンド構造と強磁性発現機構の解明¹⁾

強磁性半導体の中で、(In,Fe)As は様々な特長でユニークな材料である。この材料は III-V 族半導体の中で初めて N 型伝導で強磁性半導体になる例である。InAs に添加した Fe 原子は電気中性の Fe³⁺として In を置換し、電子や正孔キャリアを供給しないため、原理的に別の元素と同時に添加すればキャリアタイプを Fe と独立に決めることが可能である。この特徴から、(In,Fe)As の電子キャリアが通常の半導体と同じような軽い有効質量と高いコヒーレンス性を持って、ナノ構造において電子構造が量子化しやすいため大変注目されている[Appl. Phys. Lett. **104**, 042404 (2014)]。興味深いことに、(In,Fe)As の電子が Fe のスピンと強く交換相互作用を有し、数十 K 程度まで強磁性を発現できることは既存の理論で予測した強磁性転移温度(~0.1 K)より 100 倍も高い。本萌芽研究では(In,Fe)As の強磁性量子井戸構造において、その2次元の波動関数を超高速制御法で動かすことより、超高速磁化制御法を目指している。そのために(In,Fe)As のバンド構造と強磁性発現機構を正しく理解する必要がある。我々が角度分解光電子分光法(ARPES)を用いて(In,Fe)As のバンド構造(伝導帯、価電子帯、Fe の不純物帯)が初めて明瞭に観測でき、フェルミレベルが伝導帯にあること、そして Fe 不純物帯が伝導帯の底の直下に位置することを明らかにした。この結果から電子キャリアが高いコヒーレンス性を実現しながら、Fe スピンとの強い磁気交換相互作用を持つことに繋がると考えられる。そしてこの伝導帯や価電子帯と磁性不純物帯の共鳴的な位置関係が強磁性半導体の強磁性転移温度を上昇させる重要な要因であることを提案した。この新しい設計論は高温強磁性半導体の実現につながると期待される。

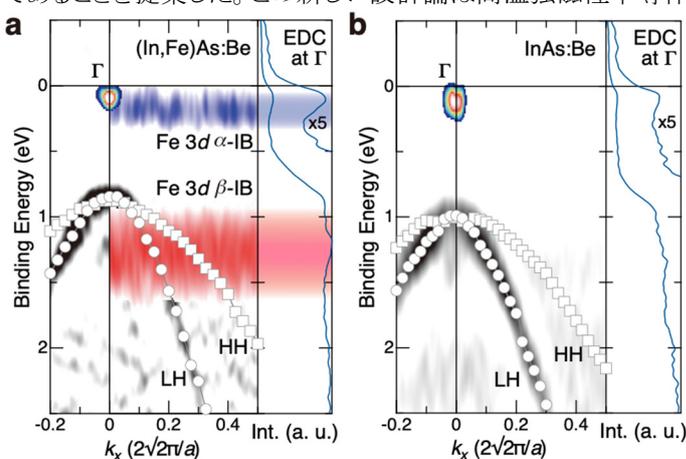


図3. a) (In,Fe)Asとb) InAs:Be のバンド構造 (Γ 点近傍)の ARPES 測定結果。縦軸のゼロ位置がフェルミレベル位置である。その下に伝導帯の底、Fe 不純物帯、価電子帯が明瞭に観測できる。参考文献1)より抜粋。

(2) ドーピング法による(In,Fe)As の磁気特性の制御²⁾³⁾

(In,Fe)As では Fe が InAs 結晶中に3次的に添加される。強磁性転移温度を増大させるために Fe 濃度を増大する必要があるが、III-V 族半導体中の Fe の固溶度が低い場合 Fe クラスターなど析出物ができてしまう。我々がデルタドーピングという特別な成長法を用いて、図4に示すように、InAs 結晶の中に Fe を2次的に添加して閃亜鉛鉱構造の FeAs 単原子層を一定の間隔で InAs 結晶中に挿入した構造を実現した²⁾。このような FeAs/InAs 超格子構造では Fe は InAs 全空間に添加しなくても結晶中のキャリアを介して FeAs 層間の RKKY 相互作用と同じ FeAs 層内の Fe-Fe 超交換相互作用によって強い強磁性が成立されることを明らかにした。更に伝導特性を評価した結果、外部磁場をかければ 500%の巨大磁気抵抗効果を初めて実証した(図4d)。面白いことに、系の強磁性転移温度(キュリー温度 T_C)が FeAs 層間の間隔の3乗に反比例する傾向も判明した。従って FeAs 層の間隔をさらに縮小することより強磁性転移温度が室温より高くなる可能性を示唆した。この構造は電子キャリアの不純物散乱を軽減することが可能なため、強磁性 InAs の電子キャリアの移動度とコヒーレンス性を改善することが期待できる。

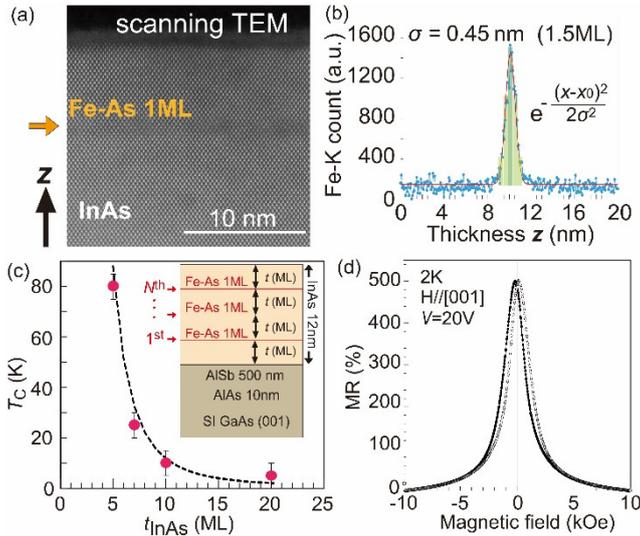


図4. a) InAs 中の FeAs 単原子層の STEM 格子像。b)EDX による成長方向の Fe 分布の測定結果。(c) FeAs/InAs 超格子の T_c の層間距離の依存性 (インセット: 試料構造、 N が FeAs の層数、 t が InAs 原子層で表される層間距離)。 (d) $t = 5$ と $N = 7$ の試料で観測した巨大磁気抵抗効果。参考文献 2) から抜粋。

一方、(In, Fe)As (Fe 6%) に Mn (0.4 - 8%) を同時添加して伝導特性と磁気特性の変化を評価した。(In, Fe)As 結晶中では Mn は同時に正孔を出すアクセプターと電子を出すドナーになって自己補償現象が起こることが分かった。(In, Fe, Mn)As 試料の電子濃度が軽く減少するが、Mn 原子による結晶中のスピン濃度が增大するため、 $3.8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ という低い電子濃度でも強磁性秩序が発現できることが分かった。この閾値の電子濃度は Mn がない(In, Fe)As の場合より 10 倍小さい。この結果から Mn の同時添加も (In, Fe)As の強磁性を強くする有効な手法であることが分かった³⁾。

(3) 他の低次元強磁性半導体構造の研究開発: Fe ドープ InAs と Fe ドープ GaSb 量子ドット^{4,5)}

強磁性半導体を低次元化するために量子井戸 (2 次元)、量子細線 (1 次元)、量子ドット (0 次元) の選択肢がある。本研究では我々が GaAs (001) 基板上 Fe ドープした InAs と GaSb の量子ドット構造を自己形成成長法で作製した。図 5a-c に示すように、30-40 nm 程度の Fe (12%) ドープ InAs ドットは閃亜鉛鉱構造を保つが、ほとんどの Fe がふもと (図 5a の領域 2) に分布することが明らかになった。それに対して Fe (16.6%) ドープした GaSb ドットでは Fe と Ga がトップ領域で立方晶の新しい相を形成することが判明した。両方の構造が室温以上の強磁性を示しており、室温動作の実用的なスピントロニクス応用に大変有望な材料である。

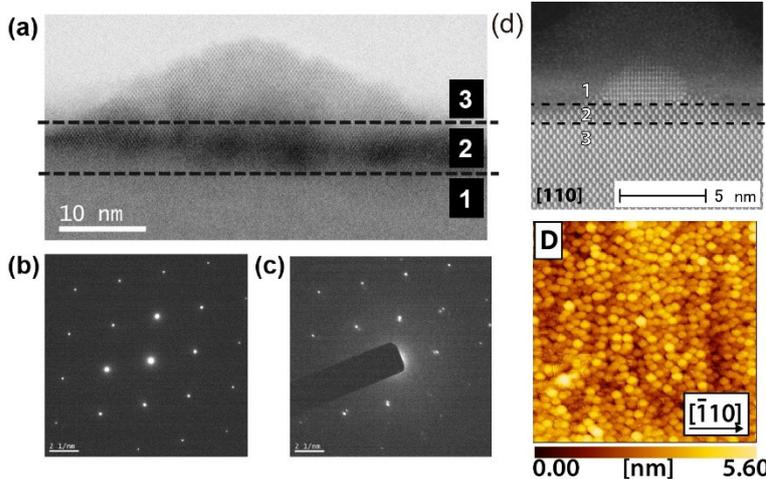


図 5. a)電子顕微鏡(TEM)による Fe ドープ InAs ドットの格子像。b) c)領域 2 と 3 の透過型電子回折像。ドットの全領域で閃亜鉛鉱構造が保たれる。(d) 電子顕微鏡(TEM)による Fe ドープ GaSb ドットの格子像(上)と原子力顕微鏡(AFM)によるドットの形状評価(下)。参考文献 4,5)から抜粋

4-2. 強磁性半導体 (In, Fe)As 量子井戸の超高速磁化制御⁶⁾

(In, Fe)As 強磁性量子井戸構造において、フェムト秒(fs)パルスレーザーを照射することより 2 次元波動関数を超高速 (~ps 以下) で変調し、サブピコ秒 (600 fs) の長短時間スケールで磁化を増大させる制御を初めて実証に成功した。

本実験で使用する試料構造は図 6a に示されるように、半絶縁 GaAs(001)基板上に AlSb バッファー、そして InFeAs (10 nm, Fe 8%)/InAs (5nm)の二層構造を分子線エピタキシー装置で成長した。上部の 15nm の(In, Fe)As/InAs は表面量子井戸構造になっており、キュリー温度 20K の強磁性を示した。図 6b,c に示すように、波長 800 nm の fs パルスレーザーをポンプ光、Fe の M 端吸収に共鳴する光子エネルギー=51 eV の X線自由電子レーザー光をプローブ光として、時間分解共鳴磁気光学効果 (Resonant Magneto-

Optical Kerr Effect, XMOKE) 測定を理化学研究所の SACLA 施設で行った。直線偏光のプローブ光が試料から反射されるとカー回転が発生するが、回転するポラライザーでプローブ光の強度を変調してフォトディテクターで検出する。この手法によってプローブ光のカー回転角度が測定でき、試料の磁化を fs 時間スケールで評価できる。磁化方向依存性を調べるために同じ試料を 2 つの逆方向に向けた永久磁石 (磁場強度 0.4 T) の上に載せた (図 6b)。測定温度 9 K において、量子井戸の磁化がサブピコ秒 (600 fs) の超短時間で増大したことを確認できた (図 6d)。図 6e で説明したように、ポンプ光の照射により (In,Fe)As 量子井戸内に生成された電子と正孔 (光電子、光正孔) は強磁性半導体層の Fe 磁気モーメントと直接に相互作用しないが、それらの空間電荷で作られるポテンシャルを非常に速く変化させ、量子井戸内に閉じ込められた 2 次元電子の波動関数 ($\phi_i(z)$, 青い曲線) をシフトさせる。強磁性半導体 (In,Fe)As の Fe 磁気モーメント間の磁気相互作用はこれらの 2 次元電子波動関数によって仲介されるため、ポンプ光照射直後に 2 次元電子の波動関数が動き (In,Fe)As 層との重なりが増えることで、強磁性量子井戸全体の磁化が超高速で増大する。この波動関数の超高速の移動によって **本成果の磁化増大の時間スケールは先行研究より 1000 倍も速く、キャリア濃度の変化を要しない世界最速の磁化増大が実現できた**と言える。この研究成果は *Advanced Materials* に発表した。

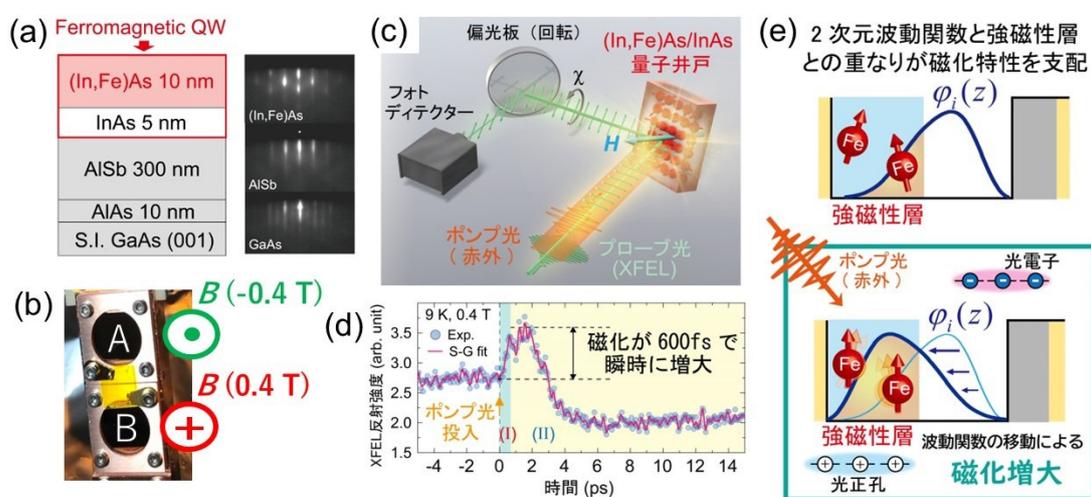


図 6. a) 測定に用いた試料構造。b) 試料セットアップ。c) 測定方法の概念図。波長 800 nm の fs パルスレーザーをポンプ光、X線自由電子レーザー光をプローブ光として、時間分解共鳴磁気光学効果測定を行った。d) 時間分解共鳴磁気光学効果の測定結果。ポンプ光照射より (In,Fe)As 磁化が 600 fs で増大することが明らかになった。e) 磁化増大のメカニズム。本研究で作製した量子井戸構造のポテンシャルを示す。赤外超短パルスレーザーによって生成された電子と正孔 (光電子、光正孔) の空間電荷で作られるポテンシャルを非常に速く変化させ、量子井戸内に閉じ込められた 2 次元電子の波動関数をシフトさせる。強磁性半導体 (In,Fe)As の Fe 磁気モーメント間の磁気相互作用はこれらの 2 次元電子波動関数によって仲介されるため、ポンプ光照射直後に 2 次元電子の波動関数が動き (In,Fe)As 層との重なりが増えることで、強磁性量子井戸全体の磁化が超高速で増大する。

参考文献

- 1) M. Kobayashi, **Le Duc Anh**, J. Minár, W. Khan, S. Borek, P. N. Hai, Y. Harada, T. Schmitt, M. Oshima, A. Fujimori, M. Tanaka, and V. N. Strocov, "Minority-Spin Impurity Band in n-Type (In,Fe)As: A Materials Perspective for Ferromagnetic Semiconductors", *Phys. Rev. B* **103**, 115111 (2021).
- 2) **Le Duc Anh**, Taiki Hayakawa, Yuji Nakagawa, Hikari Shinya, Tetsuya Fukushima, Masaki Kobayashi, Hiroshi Katayama-Yoshida, Yoshihiro Iwasa, and Masaaki Tanaka, "Ferromagnetism and giant magnetoresistance in zinc-blende FeAs monolayers embedded in semiconductor structures", *Nature Communications* (2021, accepted). Preprint: <https://arxiv.org/abs/2005.10181>.
- 3) **Le Duc Anh**, Taiki Hayakawa, Kohei Okamoto, Nguyen Thanh Tu, Masaaki Tanaka, Transport and magnetic properties of co-doped ferromagnetic semiconductor (In,Fe,Mn)As, *Appl. Phys. Express* **13**, 083005 (2020).
- 4) Karumuri Sriharsha, **Le Duc Anh**, Yuji Shimada, Takuji Takahashi, and Masaaki Tanaka, "Growth and characterization of ferromagnetic Fe-doped GaSb quantum dots with high Curie temperature", *APL Materials* **8**, pp.091107/1-7 (2020).
- 5) Karumuri Sriharsha, **Le Duc Anh**, and Masaaki Tanaka, "Growth and characterization of ferromagnetic Fe-doped InAs quantum dots with high Curie temperature" *Appl. Phys. Express* **14**, pp.083002/1-4 (2021)..
- 6) **Le Duc Anh**, Masaki Kobayashi, Takahito Takeda, Kohsei Araki, Ryo Okano, Toshihide Sumi, Masafumi Horio, Kohei Yamamoto, Yuya Kubota, Shigeki Owada, Makina Yabashi, Iwao Matsuda, Masaaki Tanaka, "Ultrafast Subpicosecond Magnetization of a 2D Ferromagnet". *Advanced Materials* **35**, 2301347 (2023).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Shingo Kaneta, Le Duc Anh, Karumuri Sriharsha, Masaaki Tanaka	4. 巻 12
2. 論文標題 Observation of quantum size effect at the conduction band bottom of n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As thin films	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 073001 ~ 073001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab25c8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kobayashi Masaki, Anh Le Duc, Min?r Jan, Khan Walayat, Borek Stephan, Hai Pham Nam, Harada Yoshihisa, Schmitt Thorsten, Oshima Masaharu, Fujimori Atsushi, Tanaka Masaaki, Strocov Vladimir N.	4. 巻 103
2. 論文標題 Minority-spin impurity band in n-type (In,Fe)As: A materials perspective for ferromagnetic semiconductors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.115111	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Takeda Takahito, Sakamoto Shoya, Araki Kohsei, Fujisawa Yuita, Anh Le Duc, Thanh Tu Nguyen, Takeda Yukiharu, Fujimori Shin-ichi, Fujimori Atsushi, Tanaka Masaaki, Kobayashi Masaki	4. 巻 102
2. 論文標題 Evolution of Fe 3d impurity band state as the origin of high Curie temperature in the p-type ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.245203	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Duc Anh Le, Hayakawa Taiki, Okamoto Kohei, Tu Nguyen Thanh, Tanaka Masaaki	4. 巻 13
2. 論文標題 Transport and magnetic properties of co-doped ferromagnetic semiconductor (In,Fe,Mn)As	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 083005 ~ 083005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/aba4d9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sriharsha Karumuri, Anh Le Duc, Shimada Yuuji, Takahashi Takuji, Tanaka Masaaki	4. 巻 8
2. 論文標題 Growth and characterization of ferromagnetic Fe-doped GaSb quantum dots with high Curie temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 APL Materials	6. 最初と最後の頁 091107 ~ 091107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0017938	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sriharsha Karumuri, Anh Le Duc, Tanaka Masaaki	4. 巻 14
2. 論文標題 Ferromagnetic Fe-doped InAs quantum dots with high Curie temperature	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 083002 ~ 083002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac1182	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Anh Le Duc, Kobayashi Masaki, Takeda Takahito, Araki Kohsei, Okano Ryo, Sumi Toshihide, Horio Masafumi, Yamamoto Kohei, Kubota Yuya, Owada Shigeki, Yabashi Makina, Matsuda Iwao, Tanaka Masaaki	4. 巻 35
2. 論文標題 Ultrafast Subpicosecond Magnetization of a 2D Ferromagnet	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 2301347
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.202301347	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Le Duc Anh, Taiki Hayakawa, Yuji Nakagawa, Hikari Shinya, Tetsuya Fukushima, Hiroshi Katayama-Yoshida, Yoshihiro Iwasa, and Masaaki Tanaka
2. 発表標題 Ferromagnetism and giant magnetoresistance in zinc-blende FeAs/InAs superlattice structures
3. 学会等名 The 65th Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials (国際学会)
4. 発表年 2020年 ~ 2021年

1. 発表者名 Le Duc Anh
2. 発表標題 n型およびp型Fe系強磁性半導体 - 高いキュリー温度の実現とヘテロ構造デバイスへの展開 -
3. 学会等名 第76回スピントロニクス専門研究会「イマドキの磁性材料開発と理論設計」(オンライン)(招待講演)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Tomoki Hotta, Kengo Takase, Kosuke Takiguchi, Karumuri Sriharsha, Le Duc Anh, Masaaki Tanaka
2. 発表標題 Properties of quaternary-alloy ferromagnetic semiconductor (In,Ga,Fe)Sb
3. 学会等名 The 65th Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Tomoki Hotta, Kengo Takase, Kosuke Takiguchi, Karumuri Sriharsha, Le Duc Anh and Masaaki Tanaka
2. 発表標題 Transport and magnetic properties of quaternary-alloy ferromagnetic semiconductor (In,Ga,Fe)Sb
3. 学会等名 2020 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM) (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Le Duc Anh, Masaki Kobayashi, Takahito Takeda, Kohsei Araki, Ryo Okano, Toshihide Sumi, Masafumi Horio, Kohei Yamamoto, Yuya Kubota, Shigeki Owada, Makina Yabashi, Iwao Matsuda, Masaaki Tanaka
2. 発表標題 Ultrafast enhancement of magnetization in ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As quantum wells
3. 学会等名 2021年 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年～2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 半導体デバイスおよびその製造方法	発明者 Le Duc Anh, 金田真悟, 大矢忍, 田中雅明, 他	権利者 国立大学法人東京大学
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2020/42516	出願年 2020年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------