

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 10 月 6 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13960

研究課題名(和文)核電気共鳴を用いた全電氣的核スピン制御法の確立

研究課題名(英文)Development of all-electrical control of nuclear spin states using nuclear electric resonance

研究代表者

植村 哲也 (Uemura, Tetsuya)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：20344476

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：半導体中の核スピンは量子力学的な重ね合わせ状態を長く維持することができ、量子計算機の量子ビットとして有望である。本研究では、強磁性電極から半導体への電氣的スピン注入と核電気共鳴(NER)効果を併用し、電氣的制御のみで核スピンをナノメートルスケールの空間分解能で選択的に制御できる素子を開発した。具体的には、高いスピン偏極率を有するCo<sub>2</sub>MnSi電極からGaAsへの高効率スピン注入と、スピン注入信号のゲート電圧による高効率制御を実証した。さらに、注入した電子スピンを用いて、GaおよびAs原子の核スピンを高効率に偏極し、ゲート電極に印加した高周波電場により核スピンに対するNER操作を実証した。

研究成果の概要(英文)：Nuclear spins in semiconductors are an ideal system for implementing quantum bits (qubits) for quantum computation because they have an extremely long coherence time. In this project, an all-electrical control of nuclear spin states has been developed by the combined use of an electrical spin injection from a highly polarized spin source into a semiconductor and the nuclear electric resonance (NER). An efficient spin injection into GaAs from a half-metallic spin source of Co<sub>2</sub>MnSi and an efficient gate control of spin-injection signals were demonstrated. Moreover, an efficient nuclear polarization through the interactions between electron spins and nuclear spins and the electrical control through NER induced by an RF electric field applied to the gate were demonstrated. This provides a novel all-electrical solid-state NER system with high spatial resolution and high sensitivity needed to implement scalable nuclear-spin based qubits.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：核電気共鳴 スピン注入 動的核スピン偏極 ハーフメタル強磁性体

1. 研究開始当初の背景

半導体中の核スピンは量子力学的な重ね合わせ状態を比較的長く維持することができ、量子計算機の量子ビットとして有望である。核スピン量子ビットの操作と検出にはこれまで核磁気共鳴(NMR: Nuclear Magnetic Resonance)が用いられているが、この手法では核スピンを偏極させるための強い外部磁場と、核スピンに量子操作を施すための振動磁場を試料に印加する必要があり、微小な領域の核スピンのみを選択的に制御することは困難である。このため、高い空間分解能を有し、かつ、高集積化が可能な核スピン制御法の開発は、大規模な固体量子計算機を実現するための基盤技術として極めて重要であり、現在盛んに研究がなされている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、強磁性電極から半導体へのスピン注入と核磁気共鳴効果を併用し、半導体中の核スピンをナノメートルスケールの空間分解能で制御できる素子を創出することである。そのために、ソースおよびドレイン電極を強磁性電極とした電界効果型スピントランジスタ構造を用いて、ソースからチャンネル中に注入した電子スピンを介してチャンネル中の核スピンを偏極させ、さらに、ゲート電極に印加した高周波電場により、偏極した核スピンの量子状態を制御する手法を開発する。これにより、光や振動磁場を用いずに、電氣的制御のみで核スピンの局所的な量子操作が可能となる。

3. 研究の方法

図1に本素子の基本概念を示す。まず、微細加工を施した強磁性体・半導体の接合界面に電流を流し、方向の揃った電子スピンを半導体中に生成する(スピン注入)。生成された電子スピンとその近傍の核スピン間に働く超微細相互作用を利用することで、核スピンを局所的に偏極させる(動的核スピン偏極DNP)。ゲートに高周波電場を印加し、そのとき誘起される核電気共鳴効果(NER: Nuclear Electric Resonance)を利用して偏極した核スピンの量子力学的な状態を制御する。核スピン状態の変化に伴い、核スピンが電子スピンの及ぼす有効磁場(核磁場  $B_n$ )の大きさ・方向が変化し、さらには電子スピン状態も変化する。この電子スピン状態の変化を強磁性体の電位変化から検出することで、核スピン状態を検出する。

上記の概念を具現化するため、ソースおよびドレイン電極を強磁性電極とし、チャンネルに n-GaAs を用いた電界効果型スピントランジスタ構造を用いて、上記の動作を実証した。スピン注入特性は、非局所4端子配置を用いたスピンバルブ効果測定および Hanle 効果測定により評価した。さらに、注入された電子スピンを用いた Ga および As 原子核に対する DNP の評価、ならびに、DNP により偏極し

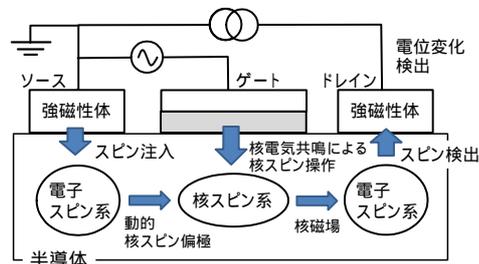


図 1. 半導体スピン注入を用いた核スピン制御素子。

た核スピンに対する NER の電氣的検出を過渡 oblique Hanle 効果測定により行った。

4. 研究成果

以下に、本研究で得られた主な成果を項目ごとにとまとめる。

(1) 半導体への高効率スピン注入

図2(a), (b)に、作製した素子における、4.2 Kでの spin-valve 信号と Hanle 信号の測定結果を示す[1]。スピン注入用および検出用電極に  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  を用い、チャンネルには GaAs を用いた。両信号ともに非常に明瞭であり、スピン注入の確実な証拠が得られた。Hanle 信号の半値幅から見積もられるスピン緩和時間はおよそ 20 nsec 程度であり、この値はチャンネルのドーピング濃度から期待される値とよい一致を示した。このことは、観測された信号はチャンネルに注入された電子スピンの Hanle 効果によるものと考えてよく、合理的な結果である。

スピン信号の大きさの指標の一つに、非局所電圧の変化量  $\Delta V_{NL}$  を注入電流量  $I$  で割った  $\Delta R_S$  が使われる。注目すべき点として、 $\text{Co}_2\text{MnSi}$  をスピン源として用いることで最大  $8 \Omega$  の  $\Delta R_S$  が得られており、これは CoFe 電極のそれより一ケタ以上大きな値である。また、4.2 K から室温までの全ての温度範囲において、 $\text{Co}_2\text{MnSi}$  の方が CoFe よりも大きなスピン信号が得られた。特に室温における  $\Delta R_S$  の大きさは当時としては最も大きく、特筆すべきことである。以上のことは、 $\text{Co}_2\text{MnSi}$  電極が高スピン偏極源として機能していることを強く示している。

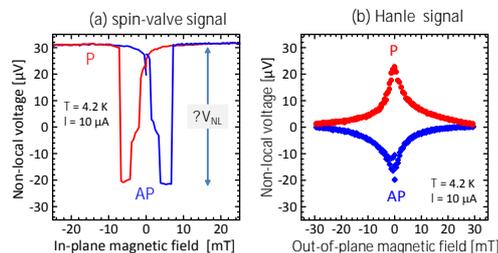


図 2. 作製した素子のスピン注入特性。(a) spin-valve 信号。(b) Hanle 信号 [1]。

## (2) スピン注入信号のゲート制御

本研究で作製した、p-i-n 接合型バックゲート構造および金属/半導体ショットキー接合型トップゲート構造を図 3(a), (b)に示す。スピン源として Fe 電極を用い、スピン注入信号のゲート電圧依存性を 77 K にて評価した。図 4 にバックゲート素子における、spin-valve 信号のゲート電圧依存性を示す[2]。spin-valve 信号の強度( $\Delta R_S$ )はゲート電圧とともに明瞭に変化していることがわかる。 $\Delta R_S$  の変化量とゲート電圧変化量の比で定義される、スピン信号のゲート変調効率 $\eta$ は、先行研究である Si チャンネルやグラフェンチャンネルの素子に比べ、約 50 倍高く、高効率なゲート変調を達成した。また、トップゲート構造においても同様に、spin-valve 信号の高効率ゲート制御を実証した[3]。以上の成果は、本研究の目的である NER 素子のみならず、電子スピンを活用したスピントランジスタ[4]実現に向けての重要な基盤技術となる。

## (3) 半導体スピン注入を用いた動的核スピン偏極と NER による核スピン制御

図 5 に、 $\text{Co}_2\text{MnSi}$  電極を用いた素子における、DNP の実験結果の一例を示す。外部磁場 ( $\mathbf{B}_{\text{ob}}$ ) は  $\mathbf{B}_{\text{ob}} = B_{\text{ob}}\mathbf{u}$  ( $\mathbf{u}$  は  $(\sin 13^\circ, 0, \cos 13^\circ)$  の単位ベクトル) の条件で印加した。核磁場を生成するため、初期状態として  $B_{\text{ob}} = +48 \text{ mT}$ ,  $I = -10 \mu\text{A}$  印加のもとで  $t_{\text{hold}} = 60$  秒待機した後に、 $B_{\text{ob}}$  を  $+48 \text{ mT}$  から  $-48 \text{ mT}$  へ  $0.18 \text{ mT/s}$  の速さで掃引し、 $V_{\text{NL}}$  の  $B_{\text{ob}}$  依存性を測定した。ゲートに高周波電場を印加しない場合、 $B_{\text{ob}} = +17 \text{ mT}$ , および  $-7.4 \text{ mT}$  のところで核磁場由来の明瞭なサイドピークが観測され、注入された電子スピンによる DNP が実証された。

高周波電場を印加した場合、核磁場に由来するサイドピークは減少し、負側のピークは完全に消失した。このことは、DNP により生成された核磁場が NER により消失したことを意味している。以上により、光や振動磁場を用いず、電気的制御のみで核スピンの局所的な操作ができることを実証した。

今後の展望としては、本手法を用いた核スピンの量子操作の実証が挙げられる。具体的には、核スピンのエネルギー準位間の量子遷移の観測や量子ビットの基本操作を実証することで、核スピンの量子力学的なコヒーレンスを活用した、次世代の量子計算機や量子情報通信の実現に向けて大きなブレイクスルーが期待できる。

## 引用文献

- [1] Ebina et al., Appl. Phys. Lett. **104**, 172405 (2014).
- [2] T. Miyakawa et al., Appl. Phys. Express **9**, 023103 (2016)
- [3] W. Nomura et al., Extended Abstract for 2016 International Conference on Solid State Devices and Materials, (SSDM2016), 921 (2016).

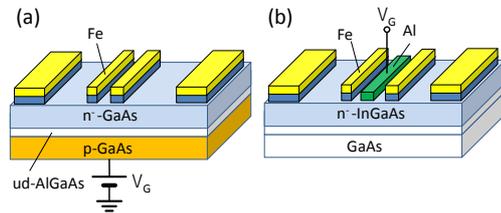


図 3. ゲート構造を有する横型スピン注入素子。(a) p-i-n 接合型バックゲート構造, (b) ショットキー接合型トップゲート構造。

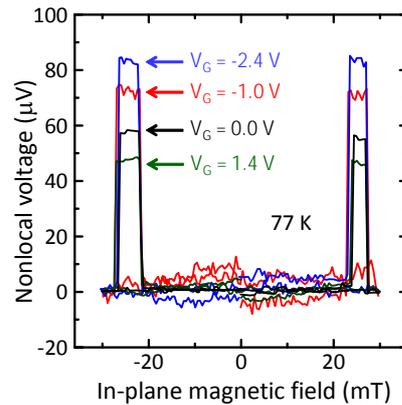


図 4. バックゲート構造を有するスピン注入素子における、spin-valve 信号のゲート電圧依存性[2]。

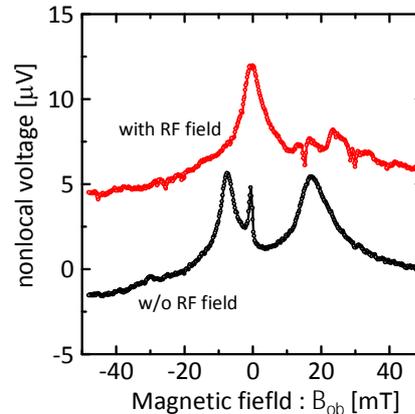


図 5. oblique Hanle 測定による DNP および NER の検出結果。黒線は RF 電場を印加しない場合、赤線は 150kHz の RF 電場をゲートに印加した場合を示す[T. Uemura, unpublished]。

- [4] S. Sugahara and M. Tanaka, Appl. Phys. Lett. **84**, 2307 (2004).

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

B. Hu, K. Moges, Y. Honda, H.-x. Liu, **T. Uemura**, M. Yamamoto, J. Inoue, and M. Shirai, “Temperature dependence of spin-dependent tunneling conductance of magnetic tunnel junctions with half-metallic  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  electrodes”, Phys. Rev. B, vol. 94,

094428 (15pp), September 2016. DOI: 10.1103/PhysRevB.94.094428, 査読有

L. Li, I. Lee, D. Lim, S. Rathi, M. Kang, **T. Uemura**, and G.-H. Kim, “Spin diffusion and non-local spin-valve effect in an exfoliated multilayer graphene with a Co electrode”, *Nanotechnology*, vol. 27, 335201 (6pp), July 2016. DOI:10.1088/0957-4484/27/33/335201, 査読有

R. Fetzner, H.-x. Liu, B. Stadtmüller, **T. Uemura**, M. Yamamoto, M. Aeschlimann and M. Cinchetti, “Impact of CoFe buffer layers on the structural and electronic properties of the Co<sub>2</sub>MnSi/MgO interface”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* vol. 49, 195002 (5pp), April 2016. DOI: 10.1088/0022-3727/49/19/195002, 査読有

K. Moges, Y. Honda, H.-x. Liu, **T. Uemura**, M. Yamamoto, Y. Miura, and M. Shirai, “Enhanced half-metallicity of off-stoichiometric quaternary Heusler alloy Co<sub>2</sub>(Mn,Fe)Si investigated through saturation magnetization and tunneling magnetoresistance”, *Phys. Rev. B*. vol. 93, 134403 (15pp), April 2016. DOI: 10.1103/PhysRevB.93.134403, 査読有

Z. Lin, **K. Kondo**, M. Yamamoto, and **T. Uemura**, “Transient analysis of oblique Hanle signals observed in GaAs”, *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 55, 04EN03 (5pp), March, 2016. DOI: 10.7567/JJAP.55.04EN03 査読有

M. Rasly, Z. Lin, M. Yamamoto, and **T. Uemura**, “Analysis of the transient response of nuclear spins in GaAs with/without nuclear magnetic resonance”, *AIP Advances* vol. 6, 056305 (8pp), March, 2016. DOI: 10.1063/1.4943610, 査読有

T. Miyakawa, T. Akiho, Y. Ebina, M. Yamamoto, and **T. Uemura**, “Efficient gate control of spin-valve signals and Hanle signals in GaAs channel with p-i-n junction-type back-gate structure”, *Appl. Phys. Express* vol. 9, 023103 (4pp), January, 2016. DOI: 10.7567/APEX.9.023103, 査読有

T. Akiho, M. Yamamoto, and **T. Uemura**, “Investigation of spin lifetime in strained In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As channels through all-electrical spin injection and detection”, *Appl. Phys. Express* vol. 8, 093001 (4pp), August, 2015. DOI: 10.7567/APEX.8.093001, 査読有

**T. Uemura**, T. Akiho, Y. Ebina, and M. Yamamoto, “Coherent manipulation of nuclear spins using spin injection from a half-metallic spin source”, *Phys. Rev. B* vol. 91, 140410(R) (5pp), April 2015. DOI: 10.1103/PhysRevB.91.140410, 査読有

Y. Ebina, T. Akiho, H.-x. Liu, M. Yamamoto, and **T. Uemura**, “Effect of CoFe insertion in

Co<sub>2</sub>MnSi/CoFe/n-GaAs junctions on spin injection properties”, *Appl. Phys. Lett.* vol.104, 172405(4pp), May 2014. DOI: 10.1063/1.4873720, 査読有

[学会発表](計39件)

R. Rasly, Z. Lin, and **T. Uemura**, “Electrical control of the nuclear spin polarization: experimental and quantitative modelling”, *IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG Europe 2017)*, GO-12, Dublin (Ireland), April 24 – 28, 2017.

W. Nomura, T. Miyakawa, M. Yamamoto, and **T. Uemura**, “Fabrication of a Spin Injection Device Having a Top-gate Structure”, *2016 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2016)*, PS-12-07, つくば国際会議場(茨城県・つくば市) Sep. 27 – 29, 2016.

**T. Uemura**, “Coherent manipulation of nuclear spins using spin injection from a half-metallic spin states”, *SPIE Optics + Photonics 2016, Spintronics IX* 9931-55, San Diego (United States), Aug. 28 – Sep. 1, 2016. 招待講演

**T. Uemura**, “Highly efficient spin injection from a half-metallic spin source of Co<sub>2</sub>MnSi and sensitive detection of nuclear spin states”, *The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE18)*, Th2-T05-5, 名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市), August 7 - 12, 2016. 招待講演

**T. Uemura**, “Coherent Control of Nuclear Spins in Semiconductor using Electrical Spin Injection”, *2016 RCIQE International Seminar*, 北海道大学(北海道・札幌市), March 8, 2016. 招待講演

M. Rasly, Z. Lin, M. Yamamoto, and **T. Uemura**, “Analysis of transient response of nuclear spins in GaAs with/without nuclear magnetic resonance”, *13<sup>th</sup> Joint MMM-Intermag Conference*, CB-07, San Diego (United State), Jan. 11 – 15, 2016.

Z. Lin, M. Yamamoto and **T. Uemura**, “Transient Analysis of Oblique Hanle Signals Observed in GaAs”, *2015 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2015)*, PS-12-17, 札幌コンベンションセンター(北海道・札幌市) Sep. 28 – 30, 2015.

T. Akiho, Y. Ebina, M. Yamamoto, and **T. Uemura**, “Coherent control of nuclear spins using spin injection from half-metallic Co<sub>2</sub>MnSi”, *21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems*, Tu-A2-4, 仙台国際センター(宮城県・仙台市), July 26 – 31, 2015.

T. Miyakawa, T. Akiho, Y. Ebina, M. Yamamoto, and **T. Uemura**, “Gate control

of spin-valve signal and Hanle signal in GaAs observed by a four-terminal nonlocal geometry”, 17<sup>th</sup> International Conference on Modulated Semiconductor Structures, Mo-PM-22, 仙台国際センター(宮城県・仙台市), July 26 – 31, 2015.

**T. Uemura** and M. Yamamoto, “Manipulation of nuclear spins in GaAs using a half-metallic spin source of Co<sub>2</sub>MnSi”, IEEE Int'l Magnetism Conf. 2015 (INTERMAG 2015), Beijing (China), May 11 – 15, 2015. 招待講演

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ist.hokudai.ac.jp/labo/nanodev/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

植村 哲也 (UEMURA, Tetsuya)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：20344476

### (2) 研究分担者

近藤 憲治 (KONDO, Kenji)

北海道大学・電子科学研究所・准教授

研究者番号：50360946