

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25286039

研究課題名(和文) 半導体スピン注入を利用した核スピン制御と量子情報デバイスの基盤構築

研究課題名(英文) Coherent control of nuclear spin using spin injection into semiconductor for application to quantum information devices

研究代表者

植村 哲也 (UEMURA, TETSUYA)

北海道大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：20344476

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000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。本研究では、強磁性体から半導体へのスピン注入を用いた新たな核磁気共鳴(NMR)デバイスを開発した。高いスピン偏極率を有するハーフメタル強磁性体Co₂MnSiからGaAsへの高効率スピン注入を実証し、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できること、および、核スピンに対するNMR操作を電氣的に高感度に検出できることを示した。さらに、Ga原子の核スピン準位間のラビ振動を実証し、核スピンのコヒーレント制御にスピン注入素子で初めて成功した。

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, a novel nuclear magnetic resonance (NMR) system that uses spin injection from a highly polarized spin source has been developed. An efficient spin injection into GaAs from a half-metallic spin source of Co₂MnSi enabled an efficient dynamic nuclear polarization of Ga and As nuclei in GaAs and a sensitive detection of NMR signals. Moreover, coherent control of nuclear spins, or the Rabi oscillation between two quantum levels formed at Ga nuclei, induced by a pulsed NMR has been demonstrated at a relatively low magnetic field of approximately 0.1 T. This provides a novel all-electrical solid-state NMR system with the 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：半導体スピン注入 核スピン ハーフメタル 半導体 量子ビット

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 ΔV_{NL} を注入電流量 I で割った ΔR_S が使われる。注目すべき点として、 Co_2MnSi 素子において最大 8Ω の ΔR_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、 Co_2MnSi 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 ΔR_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、 Co_2MnSi 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。

(2) 半導体スピン注入を用いた動的核スピン偏極

図 3(a) に、 Co_2MnSi 電極を用いた素子における、DNP の実験結果の一例を示す[9]。外部磁場 (\mathbf{B}_{ob}) は $\mathbf{B}_{ob} = B_{ob} \mathbf{u}$ (\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 $B_{ob} = +42 \text{ mT}$ 、 $I = -40 \mu\text{A}$ 印加のもとで $t_{hold} = 60$ 秒待機した後、 B_{ob} を $+42 \text{ mT}$ から -42 mT へ 0.18 mT/s の速さで掃引し、 V_{NL} の B_{ob} 依存性を測定した。図中の矢印に示すように、 $B_{ob} = +33 \text{ mT}$ 、および -10 mT のところにて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。図 3(b) に、 Co_2MnSi 電極と CoFe 電極それぞれの素子における、核磁場生成のための待機時間 (t_{hold}) と観測された核磁場の大きさの関係を示す。核磁場の大きさは、 $B_{ob} > 0$ のサイドピーク位置から見積もった。両素子とも核磁場の大きさは t_{hold} に対して指数関数的依存性を示し、その時間スケールは典型的な DNP の値として妥当なものである[11]。ここで、両素子の核磁場の大きさを比べると、 Co_2MnSi の方が CoFe よりも 4 倍以上大きくなり、核スピンをより高効率に偏極できることが示された。得られた核磁場の大きさから見積もられる核スピン偏極率はおよそ 1.7% となった。この値は DNP を用いずに静磁場のみで核スピンを

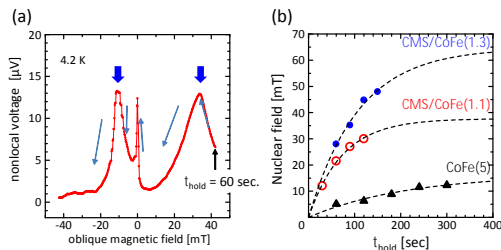


図 3 $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{CoFe}/n\text{-GaAs}$ スピン注入素子を用いた動的核スピン偏極。(a) 非局所電圧の外部磁場依存性。核磁場を生成するために、外部磁場は試料面から斜めに傾けた方向に印加。矢印で示すサイドピークの出現は核磁場の存在を示す。(b) 生成された核磁場の待機時間依存性。 Co_2MnSi の方が CoFe よりも約 3 倍大きな核磁場が生成された[9]。

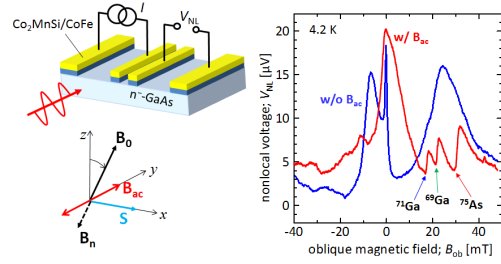


図 4 oblique Hanle 測定による NMR の検出結果 [10]。破線は RF 磁場がない場合、実線は 175kHz の RF 磁場を照射した場合を示す。

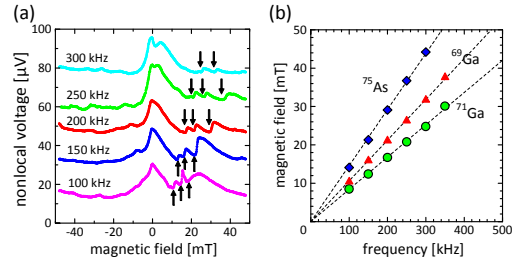


図 5 (a) oblique Hanle 信号の RF 磁場周波数依存性 (b) oblique Hanle 信号における dip 位置の RF 磁場周波数依存性

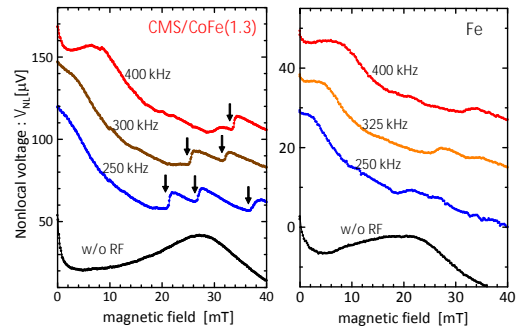


図 6 Co_2MnSi 電極と Fe 電極を有する素子に対する NMR 信号の比較

偏極させる場合に比べ、およそ 4 桁程度大きく、DNP による極めて高い効率を実証した。

(3) NMR を用いた核スピン操作とその電気的検出

図 4 に、RF 磁場がない場合と 175kHz の RF 磁場を照射した場合それぞれの oblique Hanle 測定結果を示す[10]。RF 磁場を照射しないときに観測された、核磁場由来のサイドピークは、RF 磁場照射により減少し、負側のピークは完全に消失した。この原因を明らかにするため、oblique Hanle 信号の RF 磁場の周波数依存性を調べた。図 5(a) に示すように、非局所電圧が極小となる磁場の値が RF 周波数とともに系統的に変化していることがわかる。また、図 5(b) に示すように、非局所信号が極小となるときの磁場の大きさは RF 周波数に比例し、その傾きはそれぞれ、 ^{69}Ga 、 ^{71}Ga および ^{75}As の磁気回転比と良く一致した。このことから、RF 磁場印加に伴う

過渡 oblique Hanle 信号の変化は、NMR による核磁場の消失が原因であることがわかった。すなわち、NMR による核スピン状態の変化を電氣的に検出することを実証した。従来の定常状態での oblique Hanle 信号測定では NMR による信号変化は共鳴磁場のところだけで生じるのに対し、過渡信号に対しては共鳴磁場以外のところでも見られ、NMR の検出が容易であることが示された。このことは、核スピンの外部磁場の変化に対する過渡応答特性を評価できることに加え、本手法の特徴の一つである。

図 6 に、 Co_2MnSi 電極と Fe 電極それぞれの素子における、NMR 信号の比較を示す。 Co_2MnSi 電極の方が明瞭な NMR 信号が得られており、これは Co_2MnSi 電極の高いスピン偏極率によるものと考えられ、NMR の電氣的検出に対するハーフメタル Co_2MnSi の有用性を実証する結果である。

最後に核スピンのコヒーレント制御に関して述べる[10]。試料に大きさ 114 mT の静磁場(\mathbf{B}_0)を z 軸から約 5 度傾けた方向に印加し、460 秒間待機した。このとき、DNP により生成される核磁場と外部磁場が打ち消しあい、電子スピンの作用する有効磁場はほぼゼロとなる。この状態を初期状態として、周波数 $f = 1150$ kHz の正弦波高周波磁場(\mathbf{B}_{ac})を時間 τ_p の間印加したときの非局所電圧(V_{NL})変化を計測した。 \mathbf{B}_{ac} の周波数は ^{69}Ga に対する NMR の共鳴周波数に相当する。図 7 (a) に $\tau_p = 56$ μsec の \mathbf{B}_{ac} パルス照射後の V_{NL} の時間変化を示す。 V_{NL} は RF パルス照射により $\Delta V_{NL} = 6$ μV 程度変化し、その後、数百秒の時間スケールで初期状態まで回復した。 V_{NL} の急峻な変化は、 ^{69}Ga の核磁場が NMR により変化することで、電子スピンの作用する有効磁場が増大し、その結果、電子スピンの歳差運動が誘起されたために生じたものと考えられる。図 7(b) に、 $|\mathbf{B}_{ac}| = 0.9, 0.95$ mT のときの ΔV_{NL} と τ_p の関係を示す。いずれの場合にも、 ΔV_{NL} は τ_p に対し明瞭に振動し、このことは、核スピンの静磁場方向の成分が高周波磁場印加によりコヒーレントに振動する Rabi 振動が得られたことを示す。また、Rabi 振動の周期は理論的に予測される値 $2\pi/\gamma|\mathbf{B}_{ac}|$ (ここに γ は ^{69}Ga の磁気回転比)と良い一致を示した。半導体スピン注入を用いた Rabi 振動の実証は本研究が初めてであり、量子 Hall 素子を用いた従来研究[3]に比べ、低磁場、かつ、高温での実証は、デバイス応用上、有用と考えられる。

以上により、強磁性体から注入された電子スピンを利用し、核スピンをサブマイクロスケールの空間分解能で制御し、かつ、高感度に検出できる NMR 素子の実証を行い、本研究の目標を達成した。本研究で得られた成果は、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ークスルーを与えるものとして期待される。

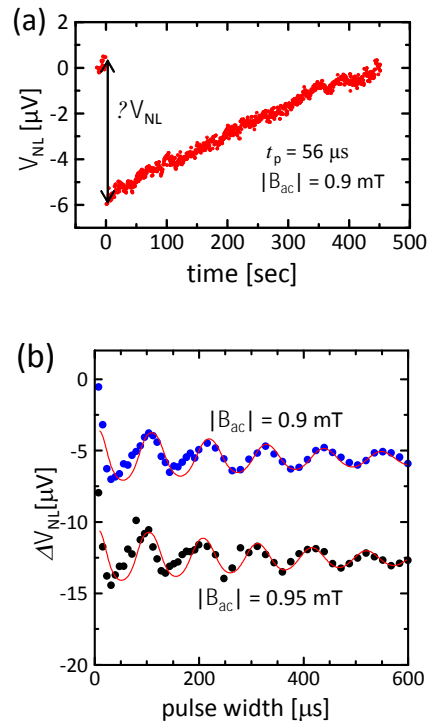


図 7 (a) $\tau_p = 56$ μsec の \mathbf{B}_{ac} パルス照射後の V_{NL} の時間変化。(b) Rabi 振動の測定結果 [10]

引用文献

- [1] L. M. K. Vandersypen, *et al.*, *Nature* **414**, 883–887 (2001).
- [2] H. Sanada, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 067602 (2006).
- [3] T. Machida, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **82**, 409 (2003).
- [4] X. Lou, *et al.*, *Nature Phys.* **3**, 197 (2007).
- [5] T. Sasaki, *et al.*, *IEEE Trans. Magn.* **46**, 1436 (2010).
- [6] Y. Zhou, *et al.*, *Phys. Rev. B* **84**, 125323 (2011).
- [7] T. Uemura, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **99**, 082108 (2011).
- [8] Ebina, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **104**, 172405 (2014).
- [9] T. Akiho, *et al.*, *Phys. Rev. B* **87**, 235205 (2013).
- [10] T. Uemura, *et al.*, *Phys. Rev. B* **91**, 140410(R) (2015).
- [11] P. Van Dorpe, *et al.*, *Phys. Rev. B* **72**, 035315 (2005).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 17 件)

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 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 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

A. Yamamoto, Y. Ando, T. Shinjo, **T. Uemura**, and M. Shiraishi, “Spin transport and spin conversion in compound semiconductor with non-negligible spin-orbit interaction”, Phys. Rev. B, vol. 91, 024417(6pp), January 2015. DOI: 10.1103/PhysRevB.91.024417 , 査読有

T. Ishikura, L.-K. Liefeth, Z. Cui, K. Konishi, K. Yoh, and **T. Uemura**, “Electrical spin injection from ferromagnet into an InAs quantum well through an MgO tunnel barrier”, Appl. Phys. Express vol.7, 073001(4pp), June 2014. DOI: 10.7567/APEX.7.073001 , 査読有

Y. Ebina, T. Akiho, H.-x. Liu, M. Yamamoto, and **T. Uemura**, “Effect of CoFe insertion in $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{CoFe}/\text{n-GaAs}$ junctions on spin injection properties”, Appl. Phys. Lett. vol.104, 172405(4pp), May 2014. DOI: 10.1063/1.4873720 , 査読有

T. Akiho, J. Shan, H.-x. Liu, K.-i. Matsuda, M. Yamamoto, and **T. Uemura**, “Electrical injection of spin-polarized electrons and electrical detection of dynamic nuclear polarization using a Heusler alloy spin source”, Phys. Rev. B, vol.87, 235205 (7pp), June 2013.

DOI: 10.1103/PhysRevB.87.235205 , 査読有

[学会発表](計 62 件)

T. Uemura, “Coherent Control of Nuclear Spins in Semiconductor using Electrical Spin Injection”, 2016 RCIQE International Seminar, Sapporo, Japan, 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”, 13th Joint MMM-Intermag Conference, CB-07, San Diego, CA, USA, 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, Sapporo, Japan, 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_2MnSi ”, 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, Tu-A2-4, Sendai, Japan, 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”, 17th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, Mo-PM-22, Sendai, Japan, July 26 – 31, 2015.

T. Uemura and M. Yamamoto, “Manipulation of nuclear spins in GaAs using a half-metallic spin source of Co_2MnSi ”, IEEE Int'l Magnetism Conf. 2015 (INTERMAG 2015), Beijing, China, May 11 – 15, 2015. 招待講演

T. Uemura, T. Akiho, Y. Ebina and M. Yamamoto, “Electrical detection of nuclear magnetic resonance in GaAs using transient oblique Hanle effect measurements”, 59th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, FW-10, Honolulu, Hawaii, USA, November 3 – 7, 2014.

T. Uemura and M. Yamamoto, “Efficient nuclear spin polarization and electrical detection of nuclear magnetic resonance in GaAs using half-metallic spin source”, The 3rd International Conference of Asian Union of Magnetism Societies (ICAUMS 2014), VIII-25, Haikou, China, October 28 – November 2, 2014. 招待講演

T. Akiho, Y. Ebina, H.-x. Liu, M. Yamamoto, **T. Uemura**, “Efficient Dynamic Nuclear Polarization Using Electrical Spin Injection from a Half-Metallic Spin Source”, 32nd International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2014), Austin convention center, Austin, Texas, USA, August 10 – 15, 2014.

T. Uemura, “Highly efficient spin injection and dynamic nuclear polarization using a half-metallic spin source”, The 6th IEEE

International Nanoelectronics Conference (IEEE INEC2014), Sapporo, Japan, July 28 – 31, 2014. 招待講演

T. Akiho, M. Yamamoto, and **T. Uemura**, “Spin-dependent transport properties of strained InGaAs channel investigated through all electrical spin injection and detection”, 58th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, HB-10, Denver, Colorado, USA, November 4 – 8, 2013.

Y. Ebina, T. Akiho, H. Liu, M. Yamamoto, and **T. Uemura**, “Effect of CoFe insertion on spin injection properties of Co₂MnSi/CoFe/n-GaAs junctions”, 58th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, AX-01, Denver, Colorado, USA, November 4 – 8, 2013.

〔図書〕(計1件)

M. Yamamoto and **T. Uemura**, “Effect of Nonstoichiometry on the Half-Metallic Character of Co₂MnSi and Its Application to the Spin Sources of Spintronic Devices”, Heusler Alloys, C. Felser and A. Hirohata (Eds.), Springer International Publishing Switzerland 2016, Chap. 18, pp. 413-444, Jan. 2016.

DOI: 10.1007/978-3-319-21449-8_20

〔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

<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・准教授

研究者番号：20344476

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし