

令和元年5月7日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2018

課題番号：17K19046

研究課題名（和文）半導体ナノ構造での自発分極を利用した核スピン完全偏極

研究課題名（英文）Complete nuclear spin polarization using spontaneous polarization mechanism in semiconductor nanostructures

研究代表者

足立 智（ADACHI, SATORU）

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：10221722

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、単一量子ナノ構造での核スピンエンジニアリングとして光注入局在スピンのリザーバである核スピン集団を制御する（分極率、分極方向等）ことを目標とした。特に自発分極を利用する方法を探索した。自発分極の確証は得られなかったが、80%の分極率は容易に得られた。また核四極子効果が核スピン分極形成に重要な役割を果たしており、電子g因子の符号に依存せずに注入する電子スピンの直交する高分極率で核スピン分極が形成できることを実証した。これは既存理論では説明できず、核四極子分裂に起因する核スピンの横磁場に対して敏感ではなくなることを取り入れたモデル計算で定性的に説明できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ナノ構造中の局在キャリア系は超微細相互作用を介して電子と核が強く結合するため、相互に分極を制御できるというポジティブな側面と、互いのデコヒーレンスが伝搬し合うというネガティブな側面が共存する。従って電子-核スピンの結合を十分に理解し、スピン緩和の抑制と分極の制御手法を実現することが重要である。本研究で得た成果により、核四極子相互作用を介した核スピン分極と局在電子スピン制御の道が拓けた。核四極子相互作用は、スピン揺らぎの根源である隣接核スピン間の双極子相互作用を封じるため、その制御により、核スピンバーストノイズを低減も期待できる等、半導体物性および量子情報処理分野に重要な知見を与えるものである。

研究成果の概要（英文）：In this project, we aimed to establish the methods for optical engineering of nuclear spins, for example control of the polarizability and the polarization direction. Although the clear evidence of spontaneous polarization was not observed, the following experimental achievements were obtained in the exploring processes: a large transverse nuclear spin polarization orthogonal to the injected electron spin can be created. The Hanle curve is anomalously broadened and shows the bistability at the critical field strength. This anomalous Hanle effect is independent of the sign of electron g-factor, and cannot be explained by the standard theory of the optical orientation. We proposed the new model including the nuclear quadrupolar interaction and indicated the qualitative agreement with the observed experimental results.

研究分野：半導体光物性

キーワード：量子ドット 核スピン分極 電子スピン 核スピンエンジニアリング スピントロニクス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

半導体量子ドット (QD) の内部に局在化したキャリアは、その離散化した準位構造や長いコヒーレンスから、単一光子源や量子ビットに応用できる。また、電子の局在化が電子-核スピン間に働く超微細相互作用 (HFI) を増強するため、電子から核へのスピン角運動量の転写が実現し、QD 内部には大きな核スピン分極 (NSP) が形成される[1,2]。外界から孤立した NSP は、数時間に及ぶ長いスピン緩和時間を持つため量子メモリへ応用可能である。従って QD は、量子情報の通信、演算、ストレージの全てのプラットフォームとして期待されている。

NSPは電子に対し有効磁場 (核磁場)

として働く一方で、電子スピン偏極も同様に有効磁場としてNSPに影響し、2つのスピン系は相互に発展する (図1参照)。ナノ構造中の局在キャリア系では超微細相互作用 (HFI) を介して電子と核が強く結合するため、相互に分極を制御できるというポジティブな側面と、互いのデコヒーレンスが伝搬し合うというネガティブな側面が共存する。従って局在キャリア系を応用するには、電子-核スピンの結合を十分に理解し、スピン緩和の抑制と分極の制御手法を実現することが特に重要である。

バルク半導体や量子井戸構造で発展してきた従来の理論でも、光誘起 NSP についての報告がなされているが[2]、バリア材料との格子歪みを形成駆動力とする自己集合 QD では、内部歪が誘起する電場勾配と核四極子モーメントが結合し核四極子相互作用 (NQI) が顕著になるため、自己集合 QD でのみ観られる特異な振る舞いが現れる。その一つが、本研究でも扱う面内 NSP (光注入電子スピンと直交する NSP) の発生である。従来の理論では、NSP は常に光注入電子スピン (結晶成長方向) と同軸になるが、2010 年に Krebs らは外部磁場を相殺し続ける面内 NSP の存在を初めて報告した[3]。無歪の液滴 QD では大きな面内 NSP は検出されないため[4]、その発現には NQI の関与が示唆されたが、面内 NSP の形成ダイナミクスは勿論、そこで NQI が担う役割についてもほとんど議論がなされていない状況であった。理論的には予想されているが、未だ確認されていない自発 NSP[5]についても NQI が絡んでいる可能性が高い。NQI が誘起する効果の解明は、核スピン緩和の完全な抑制や NSP の 3 次元的な方向制御に繋がり、分極率 100% の NSP や核磁場を用いた電子の自在制御を実現する大きな可能性を持つ。

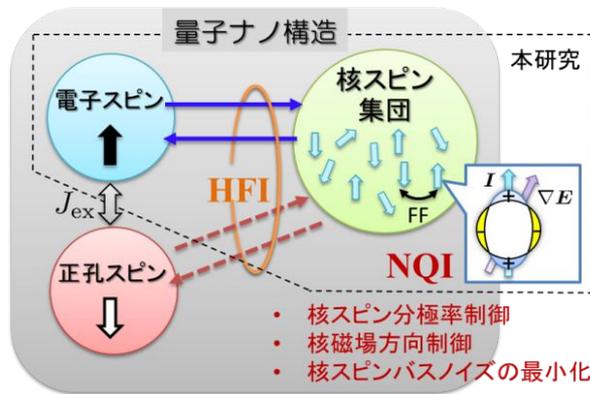


図 1. 半導体量子ナノ構造での核スピンエンジニアリング：量子ナノ構造におけるスピン結合系の概念図。 J_{ex} ：交換相互作用， E ：電場勾配，FF：核スピン間の双極子相互作用。

引用論文

- [1] B. Urbaszek, et al., Rev. Mod. Phys. 85, 79 (2013).
- [2] Optical Orientation, Modern Problems in Condensed Matter Sciences Vol. 8 edited by F. Meier and B. Zakharchenya (North-Holland, New York 1984).
- [3] O. Krebs, et al. Phys. Rev. Lett. 104, 056603 (2010).
- [4] G. Sallen et al., Nat. Commun. 5, 3268 (2014).
- [5] M. I. Dyakonov and V. I. Perel, JETP Lett. 16, 398 (1972), V.L. Korenev, PRL 99, 256405 (2007).

2. 研究の目的

本研究では NSP 形成機構における NQI の効果を解明することを目的とする。そのために自発分極現象および面内 NSP の形成に必要な物性パラメータと外部条件をハル効果測定より実験的に探索すると共に、その応用として核スピン集団の完全偏極と方向制御を目指した。ハル効果測定は、発光円偏光度 (直交する円偏光成分 σ_+ , σ_- の強度比：DCP) をプローブとして面内磁場下における電子スピン分極の変化と NSP の有無を調べる手法である。

3. 研究の方法

研究開始当初の問題点を解決し目的を達成するために、光学測定系に改良を加えると共に、NSP 形成に係る調査を実験と理論の両面から精力的に推進した。単一 QD でのハル効果測

定の実施にあたり、DCPの安定的な取得が必須である。まずは σ_+ 、 σ_- 成分の取得時間差による実験条件の揺らぎ(装置の振動など)を排除するため、 σ_+ 、 σ_- 成分を空間的に分離してCCD検出器の異なる2領域で同時検出する系を構築した。これによりDCP測定誤差の低減に成功し、同時に数 μeV の高いエネルギー分解能を実現した。またNQIは結晶成長方向とほぼ同軸であることがこれまでの研究で分かったので、特に面内NSPを形成することでNQIの効果を吟味した。既存理論では電子g因子の符号が重要な役割を果たすため、Krebsらと同じ電子g因子符号を持つInAsおよび反対符号を持つInAlAs QDを用いた(主な発表論文等2,4,12)。

4. 研究成果

(1) NSPの完全偏極の機構として当初期待していた自発分極については、自発分極を証明するクリアな証拠は得ることができなかつたが、分極率 $\sim 80\%$ を得ることができた。完全偏極を達成するには電子・核スピンの角運動量転写(フリップ・フロップ)の効率だけでなく、NQIの主軸と結晶成長方向のずれによる核準位混合の解消と核スピン緩和レートの抑制が重要であることが分かった(主な発表論文等2,5,8)。

(2) 図2(a)に申請者が観測した異常ハルカーブを示す。NSPが無い場合のハルカーブ(ハッチング部分)と比較して、異常ハルカーブは大きな半値幅と臨界磁場の近傍で急峻なDCP変化を示すことに加え、外部磁場の掃引に対するヒステリシス特性を持つ。これは、面内NSPに起因する面内核磁場が、常に外部磁場を補償しながら成長することを示している。この面内核磁場は最大で1 T程度という非常に大きな値に及ぶ。さらに異常ハルカーブが電子g因子の符号に依らず観測される事を初めて確認した。この事実は既存の理論から外れており新たなNSPダイナミクスモデル構築の重要なヒントとなった。

その他、励起強度変調の実験からQD内の電子の存在確率が面内NSPの最大値を決定すること、高速偏光変調を伴う実験から面内NSP形成時間が0.5ミリ秒以下と速いこと、磁場の向きを結晶軸の周りで回転させた実験から、面内NSP形成の鍵であるNQIが混晶化による局所的な電場勾配ではなく、ナノ構造の内部歪に由来することを明らかにした。また図2(b)に示す様に、NQIの効果として面直NSPの固定とHFIの異方化を仮定した現象論的モデルを提案し、異常ハルカーブの特徴を定性的に再現することに成功した(主な発表論文等1,3,7)。

また、本研究の過程において、核スピンゆらぎの簡便な検出方法の開発(主な発表論文等2,8)と核スピンゆらぎが電子スピンドコヒーレンスに与える効果の検証(主な発表論文等6,9-11)を行うことができ、核スピンゆらぎの効果についての知見を得た。

以上の研究成果は、NQIが誘起する効果の解明に大きく寄与すると考えている。本研究で得た成果により、核四極子相互作用を介した核スピン分極と局在電子スピン制御や核スピン分極の3次元的な方向制御の道が拓けた。核四極子相互作用は、スピン揺らぎの根源である隣接核スピン間の双極子相互作用を封じるため、その制御により、核スピンバスの低減も期待できる等、半導体物性および量子情報処理分野に重要な知見を与えるものである。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計12件)

- 1 “Experimental studies on nuclear field generated orthogonal to electron spin in single self-assembled nanostructures”, R. Kaji, S. Yamamoto, R. Matsusaki, and S. Adachi, Japanese Journal of Applied Physics **58** SBBH10/1-6 (2019). (査読有り, DOI: 10.7567/1347-4065/aafe66)
- 2 “Direct evaluation of nuclear spin fluctuation by using nuclear spin switch in single quantum structures”, R. Kaji, R. Matsusaki, S. Yamamoto, and S. Adachi, Japanese Journal of Applied Physics **58** SBBH05/1-5 (2019). (査読有り, DOI: 10.7567/1347-4065/aafd94)

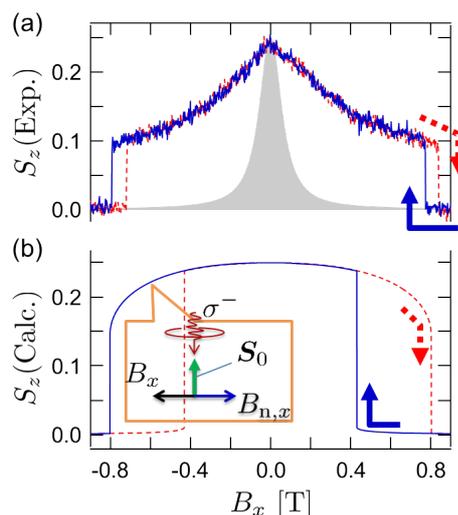


図2. (a) InAlAs QDの異常ハルカーブ。ハッチングはNSPが無い場合の通常のハルカーブ(計算)。(b) 提案モデルによる異常ハルカーブの再現。 $B_{n,x}$: 電子が感じる面内核磁場。

- 3 “Anomalous Hanle curves induced by in-plane nuclear field in single self-assembled InAlAs and InAs nanostructures”, S. Yamamoto, R. Matsusaki, R. Kaji, and S. Adachi, Journal of Physics: Conference Series (査読有り , accepted).
- 4 “Sign identification of electron and hole out-of-plane g factors by utilizing nuclear spin switch in single quantum nanostructures”, R. Matsusaki, R. Kaji, S. Yamamoto, and S. Adachi, cond-mat arXiv:1807.01413 (2018) <https://arxiv.org/abs/1807.01413> 査読無し ,
- 5 “Quadrupolar effect on nuclear spin depolarization in single self-assembled quantum dots”, R. Matsusaki, R. Kaji, S. Yamamoto, H. Sasakura, and S. Adachi, Applied Physics Express **11**, 085201/1-5 (2018). (査読有り , DOI: 10.7567/APEX.11.085201)
- 6 “Investigation of population dynamics in 1.54- μm telecom transitions of epitaxial $(\text{Er}_x\text{Sc}_{1-x})_2\text{O}_3$ thin layers for coherent population manipulation: weak excitation regime”, S. Adachi, Y. Kawakami, R. Kaji, T. Tawara, H. Omi, Applied Science **8**, 874/1-13 (2018). (査読有り , DOI: 10.3390/app8060874)
- 7 “In-plane nuclear field formation investigated in single self-assembled quantum dots”, S. Yamamoto, R. Matsusaki, R. Kaji, and S. Adachi, Physical Review. B **97**, 075309/1-8 (2018). (査読有り , DOI: 10.1103/PhysRevB.97.075309)
- 8 “Dynamic nuclear spin polarization in self-assembled quantum dots under zero magnetic field”, R. Matsusaki, R. Kaji, S. Yamamoto, H. Sasakura, and S. Adachi, cond-mat arXiv:1703.06046 (2017) <https://arxiv.org/abs/1703.06046> 査読無し
- 9 “Effect of isotopic purification on spectral hole narrowing in $^{167}\text{Er}^{3+}$ hyperfine transitions”, T. Tawara, G. Mariani, K. Shimizu, H. Omi, S. Adachi, and H. Gotoh, Applied Physics Express **10**, 042801/1-4 (2017). (査読有り , DOI: 10.7567/APEX.10.042801)
- 10 “Mechanism of concentration quenching in epitaxial $(\text{Er}_x\text{Sc}_{1-x})_2\text{O}_3$ thin layers”, T. Tawara, Y. Kawakami, H. Omi, R. Kaji, S. Adachi, and H. Gotoh, Optical Materials Express **7**, 1097-1104 (2017). (査読有り , DOI: 10.1364/OME.7.0010971)
- 11 “Excitation energy dependence of initial phase shift in Kerr rotation of resident electron spin polarization in a CdTe single quantum well”, L.-P. Yan, T. Takamura, R. Kaji, G. Karczewski, S. Takeyama, and S. Adachi, Physica Status Solidi B **254**, 1600449/1-6 (2017) (査読有り , DOI: 10.1002/pssb.201600449)
- 12 “Anisotropic nature of hole g-factor in individual InAs quantum rings”, R. Kaji, T. Tominaga, Y.-N. Wu, S.-J. Cheng, and S. Adachi, Physica Status Solidi B **254**, 1600486/1-7 (2017) (査読有り , DOI: 10.1002/pssb.201600486)

[学会発表](計 28 件)

- 1 “Modulation of nuclear quadrupole effect by a longitudinal magnetic field in transverse nuclear field formation” (oral WeD2-3), S. Yamamoto, T. Arakawa, R. Matsusaki, R. Kaji, and S. Adachi, The 46th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS) (Kasugano International Forum, Nara, Japan, 19-23 May, 2019).
- 2 “Evaluation of Rabi frequency and coherence time in the hyperfine structure of $^{167}\text{Er}^{3+}$ in Y_2SiO_5 through coherent transients”, M. Hiraishi, M. IJspeert, T. Tawara, S. Adachi, H. Omi, and H. Gotoh, The 46th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS) (Kasugano International Forum, Nara, Japan, 19-23 May, 2019).
- 3 “Nuclear spin switching in a single quantum dot” (invited), S. Adachi, The 3rd Japan-Taiwan International Engineering Forum (Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, 27 Feb.-01 Mar., 2019).
- 4 「単一量子ドットでの正孔 g 因子の歪みチューニングに向けたデバイスの作製と評価」(11p-M103-5)石田 太郎, 松崎 亮典, 鍛冶 怜奈, 小田島 聡, 海住 英生, 西井 準治, 足立 智, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会 (2019 年 3 月 9-12 日, 東工大 大岡山キャンパス)
- 5 “Modulation of Nuclear Quadrupole Effect by a Longitudinal Magnetic Field in Anomalous Hanle Curves”(11p-M101-13) (異常ハルルカーブで観る縦磁場による核四極子相互作用の変調効果) 山本 壮太, 荒川 拓也, 松崎 亮典, 鍛冶 怜奈, 足立 智, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会 (2019 年 3 月 9-12 日, 東工大 大岡山キャンパス)
- 6 「半導体単一量子ドットの核スピン分極双安定状態下における光子統計性」(10p-PA4-4) 大宮 寛太, 松崎 亮典, 藤澤 秀樹, 鍛冶 怜奈, 足立 智, 笹倉 弘理, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会 (2019 年 3 月 9-12 日, 東工大 大岡山キャンパス)
- 7 「 $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ のフォトンエコーによるコヒーレンス時間の評価」(10p-PA4-3) 平石 真也, Mark IJspeert, 俵 毅彦, 足立 智, 尾身 博雄, 後藤 秀樹, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会 (2019 年 3 月 9-12 日, 東工大 大岡山キャンパス)
- 8 「 $^{167}\text{Er}^{3+}$ 電子状態の光コヒーレントコントロール」(ポスター13-2) 平石 真也, Mark IJspeert, 俵 毅彦, 足立 智, 尾身 博雄, 後藤 秀樹, 第 39 回レーザー学会学術講演会 (2019 年 1 月 12-14 日, 東海大学 高輪キャンパス)

- 9 「単一量子ドット物性の歪みチューニングに向けたデバイスの作製と評価」(C-7)
石田 太郎, 松崎 亮典, 鍛冶 怜奈, 小田島 聡, 足立 智, 第 54 回応用物理学会北海道支部/第 15 回日本光学会北海道支部 合同学術講演会 (2019 年 1 月 5 6 日, 函館市勤労者福祉センター, 函館)
- 10 「液滴成長単一 GaAs(111)量子ドットの磁気発光特性」(C-6) 五十嵐 与樹, 松崎 亮典, 鍛冶 怜奈, 足立 智, 第 54 回応用物理学会北海道支部/第 15 回日本光学会北海道支部 合同学術講演会 (2019 年 1 月 5 6 日, 函館市勤労者福祉センター, 函館)
- 11 "Studies on anomalous Hanle effect observed in single self-assembled quantum dots" (oral), R. Kaji, S. Yamamoto, R. Matsusaki, and S. Adachi, The 50th International Conference on Solid State Devices and Materials: SSDM2018 (The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 09-13 September, 2018).
- 12 "A novel method for direct evaluation of nuclear spin fluctuation by using nuclear spin switch in quantum nanostructures" (poster), R. Kaji, R. Matsusaki, S. Yamamoto, and S. Adachi, The 50th International Conference on Solid State Devices and Materials: SSDM2018 (The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 09-13 September, 2018).
- 13 "Anomalous Hanle curves induced by in-plane nuclear field in single self-assembled InAlAs and InAs nanostructures" (poster PO108), S. Yamamoto, R. Matsusaki, R. Kaji, and S. Adachi, The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials: EXCON2018 (Kasugano International Forum, Nara, Japan, 08-13 July, 2018).
- 14 "Formation of nuclear field orthogonal to electron spin and nuclear quadrupole effects in self-assembled single quantum dots" (poster P119), S. Yamamoto, R. Matsusaki, R. Kaji, and S. Adachi, 50 years of optical orientation in semiconductors: From the original discovery to new horizons (Ecole Normale Supérieure, Paris, France, 18-19 June, 2018).
- 15 「単一量子ドットにおける電子・正孔 g 因子符号の判別」(17p-F314-11)
松崎 亮典, 山本 壮太, 鍛冶 怜奈, 笹倉 弘理, 足立 智, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会 (2018 年 3 月 17 20 日, 早稲田大学西早稲田キャンパス, 東京)
- 16 「単一量子ドットにおける核四極子効果と面内核磁場形成 II」(17p-F314-12)
山本 壮太, 松崎 亮典, 鍛冶 怜奈, 足立 智, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会 (2018 年 3 月 17 20 日, 早稲田大学西早稲田キャンパス, 東京)
- 17 「単一量子ドット中の面内核磁場形成における非同軸超微細相互作用の効果」(A-111 A-17), 山本 壮太, 松崎 亮典, 鍛冶 怜奈, 足立 智, 第 53 回応用物理学会北海道支部/第 14 回日本光学会北海道支部 合同学術講演会 (2018 年 1 月 6 7 日, 北海道大学学術交流会館, 札幌)
- 18 "Evaluations of the electron g-factor anisotropy and fluctuation of the Overhauser field in single quantum dots" (poster), R. Matsusaki, S. Yamamoto, R. Kaji, and S. Adachi, International School and Symposium on Nanoscale Transport and photonics (ISNTT2017) (NTT Atsugi R&D Center, Atsugi, Kanagawa, Japan, 13-17 November, 2017).
- 19 "In-plane nuclear field formation in individual InAlAs quantum dots: role of nuclear quadrupole effects" (poster), S. Yamamoto*, R. Matsusaki, R. Kaji, and S. Adachi, International School and Symposium on Nanoscale Transport and photonics (ISNTT2017) (NTT Atsugi R&D Center, Atsugi, Kanagawa, Japan, 13-17 November, 2017).
- 20 "State preparation and lifetime measurements through spectral hole burning in $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ " (poster), M. Ijspeert, M. Hiraishi, T. Tawara, K. Shimizu, H. Omi, S. Adachi, and H. Gotoh, International School and Symposium on Nanoscale Transport and photonics (ISNTT2017) (NTT Atsugi R&D Center, Atsugi, Kanagawa, Japan, 13-17 November, 2017).
- 21 "Formation of transverse nuclear field in single self-assembled quantum dots: role of quadrupolar splitting" (invited), S. Adachi, International Workshop on NanoScience and NanoOptics (Hokkaido University, Sapporo, Japan, 1-3 November, 2017).
- 22 "Population trapping through spectral hole burning in $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ " (oral), M. Ijspeert, G. Mariani, T. Tawara, K. Shimizu, H. Omi, S. Adachi, and H. Gotoh, International Conference on Solid-State Devices and Materials (SSDM2017) (Sendai International Center, Sendai, Japan, 19-22 September, 2017).
- 23 "Formation mechanism of in-plane Overhauser field in single self-assembled InAlAs quantum dots" (poster), S. Yamamoto, R. Matsusaki, R. Kaji, and S. Adachi, International Conference on Optics of Excitons in Confined Systems (University of Bath, Bath, UK, 10-15 September, 2017).
- 24 "Quadrupolar effect for nuclear spin depolarization in a single InAlAs quantum dot" (poster), R. Kaji, R. Matsusaki, S. Yamamoto, H. Sasakura, and S. Adachi, International Conference on Optics of Excitons in Confined Systems (University of Bath, Bath, UK, 10-15 September, 2017).
- 25 "A-system Initialisation through Spectral Hole Burning in $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ " (oral), M. Ijspeert, G. Mariani, T. Tawara, K. Shimizu, H. Omi, S. Adachi, and H. Gotoh, International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2017 (HSQ2017) (Zao, Miyagi, Japan, 10-13 September, 2017).

- 26 「Er³⁺超微細構造準位におけるL型3準位の初期化」(6p-A405-18)
M. IJspeert, G. Mariani, 俵 毅彦, 清水 薫, 尾身 博雄, 足立 智, 後藤 秀樹
第78回応用物理学会秋季学術講演会(2017年9月5-8日, 福岡国際会議場, 福岡)
- 27 「単一量子ドットにおける核四極子効果と面内核磁場形成」(6p-A405-14)
山本 壮太, 松崎 亮典, 鍛冶 怜奈, 足立 智
第78回応用物理学会秋季学術講演会(2017年9月5-8日, 福岡国際会議場, 福岡)
- 28 「単一量子ドットでの傾斜核四極子場による核スピン緩和」(6p-A405-13)
松崎 亮典, 山本 壮太, 鍛冶 怜奈, 笹倉 弘理, 足立 智
第78回応用物理学会秋季学術講演会(2017年9月5-8日, 福岡国際会議場, 福岡)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

http://labs.eng.hokudai.ac.jp/labo/ultrafast/Adachi/toppage_ja.html

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：笹倉 弘理

ローマ字氏名：SASAKURA, hirotaka

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。