

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01745

研究課題名(和文)量子ドットでの核スピン分極3重安定性の検証と核四極子効果を含む統一モデルの構築

研究課題名(英文)Verification of tristability of nuclear spin polarization in single quantum dot and construction of a unified model including nuclear quadrupole effect

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) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：縦磁場配置での核スピン分極の第3安定状態出現および横磁場配置での異常ハル効果の発生機構をそれぞれ特定し、任意の磁場配置での量子ドットにおける電子・核スピン結合系でのダイナミクスを明らかにするモデルを構築した。特に核四極子相互作用の主軸が結晶成長方向から傾斜し面内成分を持つことが異常ハル効果出現の鍵であることを明らかにした。また歪印加により核四極子相互作用の主軸の傾斜を調節できると考えられるため、歪印加デバイスを作製し、量子ドットでの発光エネルギー準位変化、AlGaAsバルクでの時間分解カー回転分光による歳差周波数変化を確認した。これらの成果は核四極子効果の制御に資すると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半導体量子ドットのような多数の原子核スピンに囲まれた1個の局在電子スピンから構成される電子・核スピン結合系では、量子演算、量子メモリ、単一光子源などの研究が精力的に推進されている。しかしこの系では構成する原子が核四極子相互作用を通じて核スピンおよび電子スピンのダイナミクスに影響するが、その詳細は不明であった。我々は独自に発見した核スピン分極の第3安定状態出現と異常ハル効果を手掛かりに発生機構をそれぞれ特定し、任意の磁場配置での電子・核スピン結合系でのダイナミクスを明らかにするモデルを構築した。これにより電子・核スピン結合系ダイナミクスの予測が可能になり、量子ドットの応用に大きく貢献した。

研究成果の概要(英文)：We have clarified the mechanism of the third stable state of nuclear spin polarization and the anomalous Hanle effect in the longitudinal and transverse magnetic field configurations, respectively, and constructed a model that can predict the dynamics of the electron-nuclear spin coupling system in quantum dots even under arbitrary magnetic field configurations. In particular, we found that the principal axis of the nuclear quadrupole interaction is tilted from the crystal growth direction and has an in-plane component, which is the key to the anomalous Hanle effect. Since the tilt of the principal axis of the nuclear quadrupole interaction can be modulated by applying strain, we fabricated a strain-applied device and confirmed the emission energy level change of quantum dots and the Larmor precession frequency change of bulk AlGaAs by time-resolved Kerr rotation spectroscopy. These results may contribute to the control of nuclear quadrupole effects.

研究分野：固体スピン物性

キーワード：超微細相互作用 核四極子相互作用 半導体量子ドット 電子・核スピン結合系 核スピンエンジニアリング

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、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

半導体量子ドット (QD) に局在する電子は、核スピン集団との間に働く接触型超微細相互作用 (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容易に実現し、QDには分極率~80%までの大きな核スピン分極 (NSP) を円偏光励起による電子スピンの光注入を通じて数十マイクロ秒で形成できる [Urbaszek *et al.*, *Rev. Mod. Phys.* **85**, 79-133 (2013)等].

NSPは良い孤立系であり、QD内電子を除去すればスピンメモリ時間は数時間に及ぶ。QD内局在電子は離散化準位や優れたスピンコヒーレンスにより、単一光子源や量子ビットへの応用が期待でき、更に核スピンを用いてメモリ機能を付与できる [Gangloff *et al.*, *Science* **364**, 62 (2019)等]. 同時に化合物半導体特有のバンドギャップ制御により通信波長帯光量子ビットおよび既存の光ファイバー網インフラとの親和性も高い。従って、QDは量子情報の演算・ストレージ・通信の全てのプラットフォームとなり得る。

図1に示す様に、QDに代表されるナノ構造ではHFIを介して1個の電子スピンと 10^4-10^5 個の核スピン集団が強く結合し、核磁場 B_n とKnight Field B_e として電子スピンとNSPにそれぞれ影響し、2つのスピン系は相互に発展する。すなわちスピン結合系では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と相互に分極を制御できるというポジティブな側面が共存する。従って、これまでに光、電(磁)場を組み合わせた電子スピンの精密操作は実証できている為、電子スピン制御を介して同程度の微細操作が核スピンにも可能なはずだが、複雑な物理の為にその量子状態制御は未だ研究途上である。量子状態制御や量子メモリ等の実現の為に、ナノ構造での電子・核スピン結合系固有の複雑な物理を解明していく必要がある。

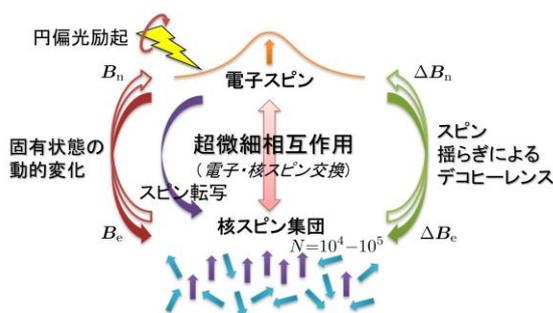


図1. 単一量子ドットにおける電子・核スピン結合系の概念図。 B_n : 核磁場, B_e : 電子による有効磁場, $\Delta B_n, \Delta B_e$: B_n, B_e の揺らぎ成分. 正孔スピンと核スピン間に作用する超微細相互作用は、電子・核スピン間に働く接触型超微細相互作用に比べて1桁以上小さい。

2. 研究の目的

本研究では、ナノ構造半導体における電子・核スピン結合系ダイナミクスの全容解明と統一モデルの構築を目的とする。世界に先んじて発見した核スピン分極の第3安定状態の出現 [Phys. Rev. B **101**, 245424/1-8 (2020)] と核四極子相互作用(NQI)の効果による大きな面内核スピン分極の形成 [Phys. Rev. B **97**, 075309/1-8 (2018), *Jpn. J. Appl. Phys.* **58**, SBBH10/1-6 (2019)] を手掛かりに、研究方法に示す歪印加等によって、これまで変調が困難であったQDパラメータを積極的に変調・制御し、ナノ構造での電子・核スピン結合系のダイナミクスの全容を解明する。

構築する統一モデルにより定量的議論が種々の磁場配置で可能になれば、電子・核スピン結合系の物理を再構築することができ、多くの未解明現象の解決に貢献できる。これらの研究により、新規スピンメモリ、核磁場の3次元自在制御、核スピンの量子状態制御などへの道が拓かれると確信している。

3. 研究の方法

我々は最近、次に示すQDでのNSPの2つの新しい現象を実験的に見出し、定性的ではあるが説明が可能なモデルをそれぞれに対し提案した。

・核スピン分極の第3安定状態の発見 (図2左) :

ナノ構造半導体における核スピン分極にはこれまで形成項と緩和項のバランスで決まる定常的な安定状態は2つしかないとされていたが、第3の安定状態 (図2左 (a) の Mid. branch) を実験的に発見した。双安定現象 (Bistability) が明確に2回起きており、それは3つの安定状態があることを示している。ただし、3安定状態が同時に存在する3重安定状態(Tristability)ではない。

・注入電子スピンと直交する大きな面内核スピン分極の形成 (図2右) :

従来の理論的枠組みでは不可能なはずの電子スピンと直交する大きな面内 NSP の形成を観測し、核四極子相互作用 (NQI) の効果を取り入れて、定性的ではあるが異常ハルカーブ (図2右(a) 示したサーカステント型の通常 (破線) とは大きく異なるハルカーブ) の説明に成功した。

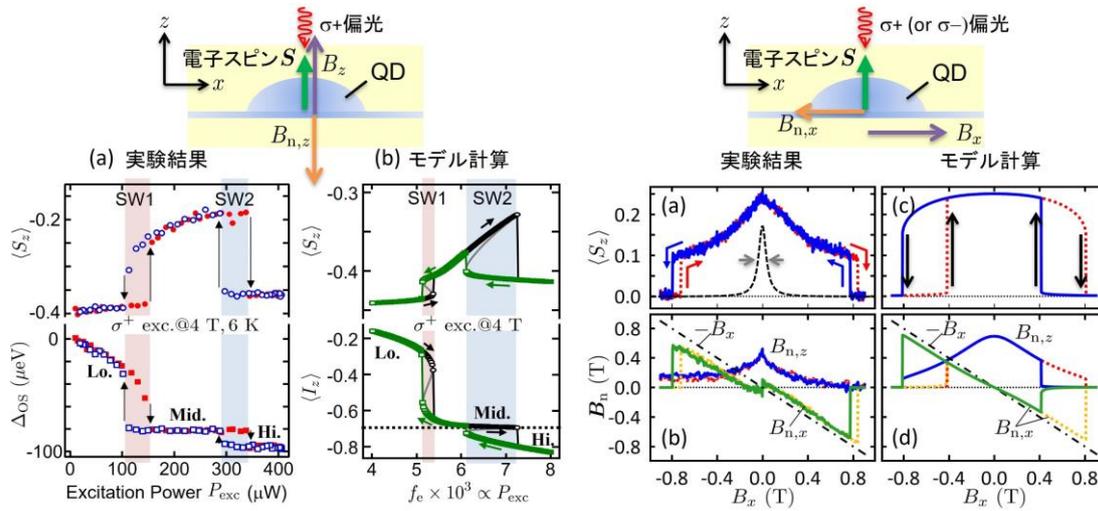


図 2: 核スピン分極での 2 つの新発見. 左: ダブル核スピンスイッチングによる第3安定状態 (Mid-branch) の発見 [Phys. Rev. B **101**, 245424/1-8 (2020)]. 右: 電子スピンと直交する大きな面内核スピン分極 [Phys. Rev. B **97**, 075309/1-8 (2018), Jpn. J. Appl. Phys. **58**, SBBH10/1-6 (2019)]. (a) の破線はスピン寿命のみで決まる本来のハルカーブ. 上段: QD と注入電子スピン, 外部磁場, 形成された核磁場の配置. それぞれ図の右は提案したモデル計算. 定性的には実験結果をよく説明できている. 用いた試料は単一 $\text{In}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ QD.

これら 2 つの実験結果は異なる磁場配置で観測され, それらを統一的に議論できるモデルは存在しなかった. まずは NQI の効果を取り入れるために, NQI の効果が大きいと考えられる横磁場配置において, これまで学術論文で発表した核の g 因子 (すなわち超微細相互作用係数 A) が面直と面内で異符号を持つという大きな仮定を回避して実験結果を説明することが可能かを, 時間分解発光測定を行うことで検証し(A), 縦磁場においても NQI の効果を含んだモデルで実験結果を再現 (B)することで, 電子・核スピン結合系ダイナミクスの統一モデルを構築する. 更に, 下記項目 C, D に挑戦し, 構築したモデルの検証を行う.

- A NQI変調下での異常ハルカーブ測定と面内NSP形成の時間分解測定
- B 上記の結果等を統一的に解釈可能な電子・核スピン結合系ダイナミクスモデルの構築
- C 電子・核スピン制御による核スピン分極(NSP)の3重安定性の検証
- D 歪印加デバイスの作製と歪印加によるNQIの変調効果

4. 研究成果

上記 A~D の研究成果の内, 紙面の関係から, 本研究で最も主張すべき成果 A, B についてのみ, 主要な結果を記述する.

核の g 因子 (すなわち超微細相互作用係数 A) が面直と面内で異符号を持つという大胆な仮定をせずに, 異常ハル効果発現の物理原因を探るため, 核四極子相互作用(NQI)の主軸分布を考慮した新規モデルを考案した. NQI の主軸分布を試料面内にあるとした場合と試料に垂直 (結晶成長方向) にあるとした場合の両極端での計算結果 (図4) と比較し, 「印加横磁場を面内核磁場で相殺する」という異常ハル効果の本質は NQI の主軸の試料面内に分布する成分が原因となっていることを明らかにした. 以前は実験において観測されていた横磁場掃引時の核磁場の z 成分の緩やかな減衰 (図3(c)下) が 異常ハル効果発現の物理原因解明の手掛かりとして着目していたが [Phys. Rev. B **97**, 075309/1-8 (2018)], これは新規モデルによる計算結果からは NQI の主軸分布の z 成分に由来するもので, 「印加横磁場を面内核磁場で相殺する」という異常ハル効果の本質には関与しないことを明らかにした. この成果は以下の学術論文に発表した.

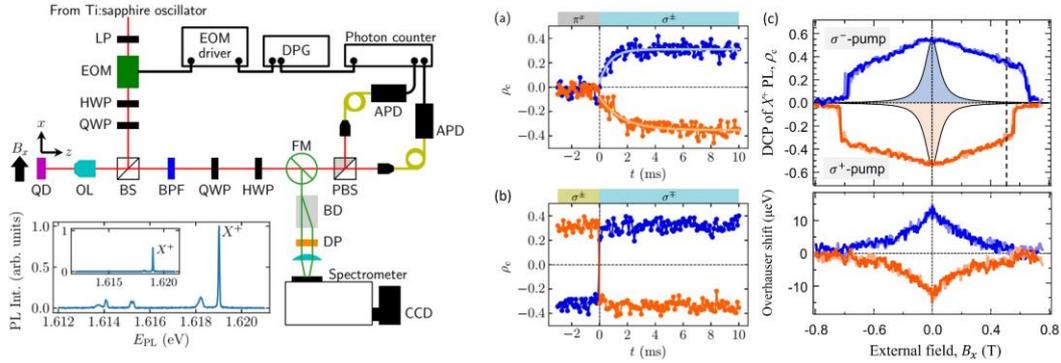


図3. 左：時間分解発光測定光学系と単一 QD 発光スペクトル。挿入図はバンドパスフィルターで切り出した正の荷電励起子発光スペクトル。右：(a) 直線偏光励起から円偏光励起へ切り替えた場合の発光円偏光度 ρ_c の時間変化。(b) 核場が飽和した状態での励起円偏光を反転した場合の発光円偏光度 ρ_c の時間変化。(c) 時間積分測定モードで観測される異常ハルカーブの円偏光度 (上) とオーバースhift (下)。(a), (b)は(c)の点線で示す磁場値で行った。

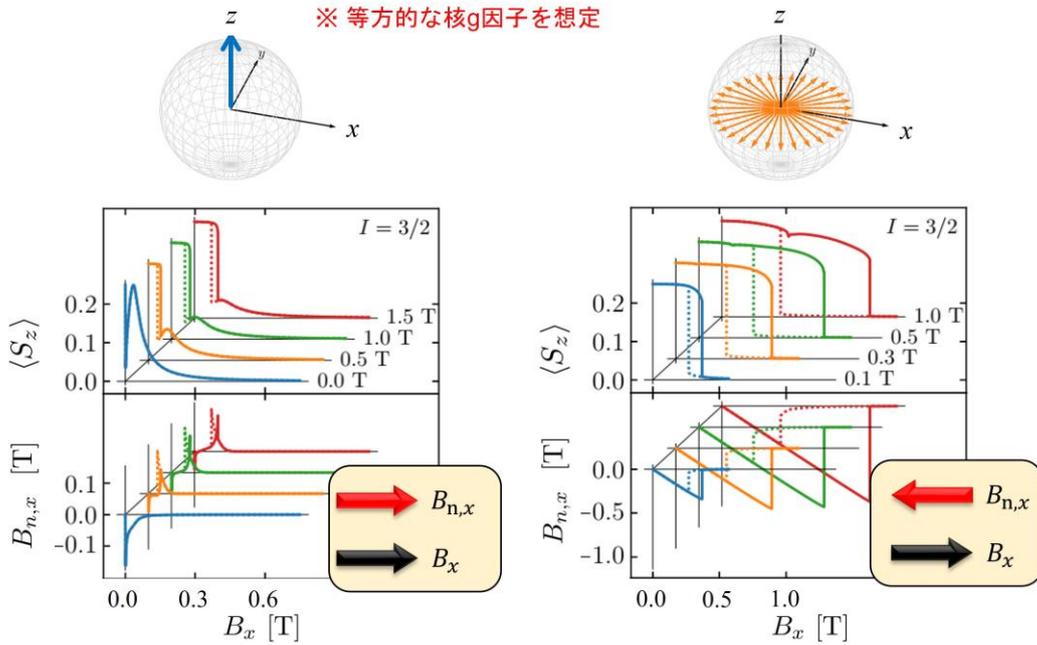


図4. NQIの軸の向きの違いによる電子スピン分極と核磁場の面内成分の印加磁場依存性の計算結果。左：すべての核のNQIの軸がz方向を向いている場合，右：個々の核の軸は面内に分布している場合。

上記の画期的な成果は、次に示す異常ハルカーブでの時間分解発光測定からも支持される。図3左に示す様に、横磁場配置において、単一 QD からの正の荷電励起子(X+)の発光を2つのAPDを用いて時間分解相関測定を行った。X+は1個の電子スピンとスピン1重項の2個の正孔スピン対から構成されるため、電子スピンの反転が正孔との再結合による発光の円偏光度に反映される。従って、X+では発光の円偏光度 ρ_c と電子スピン分極 $\langle S_z \rangle$ の間には、 $\langle S_z \rangle = \rho_c/2$ の関係が維持される。右(a)に示すように、直線偏光励起(負の時間)から時間原点で円偏光励起に変更した場合、円偏光度 ρ_c が1 ms程度でそれぞれの飽和値に到達していることが分かる。高い円偏光度は電子スピンの磁場による歳差運動が抑制されていることを示しており、円偏光度が飽和している時間領域では、核磁場の面内成分 $B_{n,x}$ と印加横磁場 B_x (=0.5 T)が相殺している($B_{n,x}+B_x=0$)状態である。実測した立ち上がり時間は核スピン分極(NSP)の形成時間であり、ここには示していないが B_x を0.25 Tから0.5 Tへの増加と共にほぼ線形にNSP形成時間は伸長した。一方、(b)に示す様に、励起偏光を $\sigma+(-)$ から $\sigma-(+)$ へ時間原点で切り替えた場合、測定系の時間分

解能 $\sim 1 \mu\text{s}$ 以下で高速に ρ_c が大きさ $|\rho_c|(\sim 0.4)$ を維持したまま変化している。 ρ_c の符号が反転していることは、核磁場の面内成分 $B_{n,x}$ が反転していることを示しており、その反転が (a)に示した NSP 形成時間より3桁以上短いタイムスケールで起こることが初めて明らかになった。これらの結果は、単一 QD 発光の異常ハンル効果の初めての時間分解測定というだけに留まらず、次に示す NQI の主軸の傾斜を考慮した新しいモデルを考案する契機となった。図 3 (a)は古いモデル [Phys. Rev. B 97, 075309/1-8 (2018)]でも再現できるが、図 3 (b)での高速な円偏光度変化は再現できず、古いモデルは間違った仮定に基づいていることが判明したからである。

次に最も重要であると後に判明した NQI の主軸の向きについて考察した。NQI の主軸の方向は核スピン分極の固定軸になることは過去の研究から判明しており [例えば PRL 99, 037401 (2007)], その主軸は結晶成長方向 (z 方向) に平行であると長らく信じられてきた。そこで、これまで信じられてきた様に、すべての核の NQI の主軸が z 方向を向いている場合 (左) と個々の核の NQI の主軸が面内に分布している場合 (右) について、等方的な核 g 因子を仮定した計算を行った。ここでは、古いモデルで行った面直・面内で符号を変えるほどの異方的な核 g 因子の仮定は用いていない。

左の場合は面内核磁場成分 $B_{n,x}$ が印加磁場 B_x と同じ方向に形成されるのに対し、右の場合には、 $B_{n,x}$ が B_x とは逆向きに形成されていることが分かる。そのため $\langle S_z \rangle (= \rho_c/2)$ が大きな B_x まで維持される図 3 (c)上に示した異常ハンルカーブの実験結果が再現できている。この2つの計算結果は、図 3 (c)上の異常ハンルカーブにおいて観測された「印加横磁場を形成される面内核磁場で相殺する」という異常ハンル効果の本質は、NQI の主軸の試料面内に分布する成分が原因となっていることを示している。また、古いモデルの考案時に最重要を考えた図 3 (c)下に示す横磁場掃引時の核磁場の z 成分の緩やかな減衰は、NQI の主軸の z 方向成分が在ることから起こることが明らかとなった。

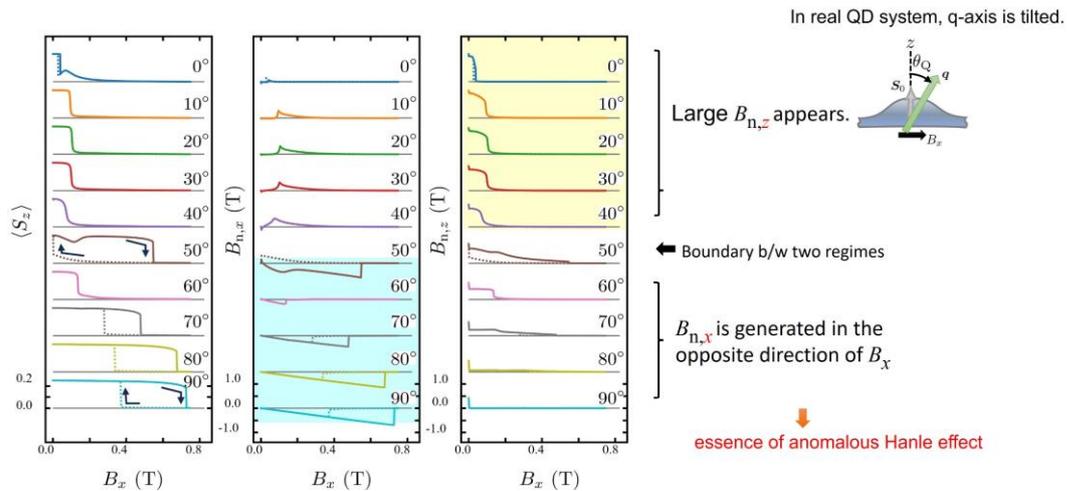


図 5. ハンルカーブ $\langle S_z \rangle$ 、核磁場の面内成分 $B_{n,x}$ 及び面直成分 $B_{n,z}$ の NQI の主軸 q の傾斜角 θ_Q 依存性。簡単化のため、すべての核は $I=3/2$ を持つとしている。実線と点線は、図中に矢印で示す磁場の掃引方向の違いを示す。

最後に、NQI の主軸が傾斜しており、その傾斜角 θ_Q を徐々に変えた場合の計算結果を図 5 に示す。実際の QD では、NQI の主軸 q は図 5 右上に示すように傾斜していると考えられる。 $\theta_Q = 0^\circ$ では q の面内成分は零であるため、異常ハンル効果は発生しない。 $0^\circ < \theta_Q < 50^\circ$ では、ハンルカーブが幾分広がっているが、 $B_{n,x}$ の計算結果が示す様に、異常ハンル効果の本質である横磁場の面内核磁場による相殺で生じているわけではなく、 $B_{n,z}$ の計算結果が示す様に z 方向に形成された核磁場成分によって電子スピン分極 $\langle S_z \rangle$ が低磁場領域で維持されていることで生じている。 $\theta_Q > 50^\circ$ の領域では、面内核磁場 $B_{n,x}$ が印加磁場と逆向きに発生し、異常ハンル効果が出現していることがよく分かる。 $\theta_Q = 50^\circ$ 付近が面内核磁場 $B_{n,x}$ と面直核磁場 $B_{n,z}$ のどちらが重要となるかの2つの領域の境界となっている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 S. Yasui, M. Hiraishi, A. Ishizawa, H. Omi, T. Inaba, X. Xu, R. Kaji, S. Adachi, T. Tawara	4. 巻 1
2. 論文標題 Creation of high-resolution atomic frequency comb and optimization of pulse sequence for high-efficiency quantum memory in 167Er:Y2SiO5	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Continuum	6. 最初と最後の頁 1896-1908
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OPTCON.457429	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 S. Yasui, M. Hiraishi, A. Ishizawa, H. Omi, R. Kaji, S. Adachi, and T. Tawara	4. 巻 29
2. 論文標題 Precise spectroscopy of 167Er:Y2SiO5 based on laser frequency stabilization using a fiber laser comb	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 27137-27148
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.433002	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 S. Yamamoto, R. Kaji, H. Sasakura, and S. Adachi	4. 巻 60
2. 論文標題 Double nuclear spin switching in single quantum dots	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SBBH07/1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/abd709	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 S. Yamamoto, R. Kaji, and S. Adachi	4. 巻 108
2. 論文標題 Anomalous Hanle effect considered in time-resolved measurements and numerical simulations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 054422/1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.108.054422	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 Yasui Shoichiro, Inaba Tomohiro, Ishizawa Atsushi, Hitachi Kenichi, Omi Hiroo, Matsuura Kyuma, Kaji Reina, Tawara Takehiko, Adachi Satoru, Xu Xuejun, Sanada Haruki	4. 巻 3
2. 論文標題 Efficient operation of atomic frequency comb optical memory using an optical frequency comb in 167Er3+:Y2SiO5	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Optics Continuum	6. 最初と最後の頁 833 ~ 833
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OPTCON.525926	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

[学会発表] 計35件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 鍛冶 怜奈, 陳ジュアン, 足立 智
2. 発表標題 (111)単一量子ドットにおける価電子帯混合の効果: 発光の偏光状態と 正孔 g 因子の変化
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 李 梓榕, 山本 壮太, 鍛冶 怜奈, 足立 智
2. 発表標題 ナノ構造半導体での超微細相互作用の相関時間の磁場依存性
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安井 翔一郎, 日達 研一, 尾身 博雄, 稲葉 智宏, Xuejun Xu, 鍛冶 怜奈, 眞田 治樹, 足立 智, 俵 毅彦
2. 発表標題 通信波長帯Atomic Frequency Combによる Time bin qubitの量子メモリ実証
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松浦 求磨, 安井 翔一郎, 鍛冶 怜奈, 俵 毅彦, 足立 智
2. 発表標題 167Er ³⁺ :Y ₂ SiO ₅ におけるスピン状態保存の為の長コヒーレンス準位の探索
3. 学会等名 第58回応用物理学会北海道支部/第19回日本光学会北海道支部 合同学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 李 梓榕, 山本 壮太, 鍛冶 怜奈, 足立 智
2. 発表標題 単一InAlAs量子ドットでの電子・核スピン相関時間の磁場依存性
3. 学会等名 第58回応用物理学会北海道支部/第19回日本光学会北海道支部 合同学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 沈 安東, 鍛冶 怜奈, 足立 智
2. 発表標題 全光核磁気共鳴によるAlGaAsバルクでの核分極ダイナミクスの研究
3. 学会等名 第58回応用物理学会北海道支部/第19回日本光学会北海道支部 合同学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Kaji, S. Yamamoto, and S. Adachi
2. 発表標題 Time-resolved measurements of electron-nuclear spin dynamics via anomalous Hanle effect in a single semiconductor quantum dot
3. 学会等名 The 2022 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Yasui, M. Hiraishi, A. Ishizawa, H. Omi, T. Inaba, X. Xu, R. Kaji, S. Adachi, T. Tawara
2. 発表標題 Remarkable improvement of atomic-frequency-comb memory efficiency by comb transfer method in 167Er ³⁺ :Y ₂ SiO ₅ under zero magnetic field
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 拓真, 松崎 善太郎, 尾身 博雄, 安井 翔一郎, Xuejun Xu, 稲葉 智宏, 足立 智, 俵 毅彦
2. 発表標題 167Er:Y ₂ SiO ₅ 結晶の作製と光学特性評価
3. 学会等名 第77回応用物理学会東北支部学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安井 翔一郎, 平石 真也, 石澤 淳, 尾身 博雄, 稲葉 智宏, Xuejun Xu, 鍛冶 怜奈, 足立 智, 俵 毅彦
2. 発表標題 Comb Transfer 法による Atomic Frequency Comb 量子メモリの高効率化
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安井 翔一郎, 平石 真也, 石澤 淳, 尾身 博雄, 稲葉 智宏, Xuejun Xu, 鍛冶 怜奈, 足立 智, 俵 毅彦
2. 発表標題 167Er ³⁺ :Y ₂ SiO ₅ におけるAtomic Frequency Comb多重量子メモリプロトコルの実証
3. 学会等名 第57回応用物理学会北海道支部/第18回日本光学会北海道支部 合同学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Yasui, M. Hiraishi, A. Ishizawa, H. Omi, T. Inaba, X. Xu, R. Kaji, S. Adachi, T. Tawara
2. 発表標題 Remarkable improvement of atomic-frequency-comb memory efficiency by comb transfer method in 167Er3+:Y2SiO5 under zero magnetic field
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO:2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Yasui, M. Hiraishi, A. Ishizawa, H. Omi, R. Kaji, S. Adachi, T. Tawara
2. 発表標題 Frequency and time domain measurements of 167Er3+:Y2SiO5 by stabilizing the optical frequency using a fiber laser comb
3. 学会等名 International Symposium on Novel maTerials and quantum Technologies (ISNTT2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Yasui, M. Hiraishi, A. Ishizawa, H. Omi, R. Kaji, S. Adachi, T. Tawara
2. 発表標題 Evaluation of homogeneous linewidth of 167Er3+:Y2SiO5 in frequency domain measurement using laser stabilization with optical frequency comb
3. 学会等名 The 2021 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 依 毅彦, 平石 真也, 稲葉 智宏, 徐 学俊, 太田 竜一, 足立 智, 尾身 博雄
2. 発表標題 量子情報プラットフォームとしてのEr添加固体材料の開発
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本 壮太, 鍛治 怜奈, 笹倉 弘理, 足立 智
2. 発表標題 半導体量子ドットでの核スピン分極の第3安定状態と3重安定性
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安井 翔一郎, 平石 真也, 石澤 淳, 尾身 博雄, 稲葉 智宏, Xuejun Xu, 鍛治 怜奈, 足立 智, 俵 毅彦
2. 発表標題 167Er ³⁺ :Y ₂ SiO ₅ における零磁場下での通信波長帯Atomic Frequency Comb時間多重量子メモリプロトコルの実証
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安井 翔一郎, 平石 真也, 石澤 淳, 尾身 博雄, 稲葉 智宏, Xuejun Xu, 鍛治 怜奈, 足立 智, 俵 毅彦
2. 発表標題 167Er ³⁺ :Y ₂ SiO ₅ における Atomic Frequency Comb多重量子メモリプロトコルの実証
3. 学会等名 第57回応用物理学会北海道支部/第18回日本光学会北海道支部 合同学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野添 胡桃, 鳥井 純平, 鍛治 怜奈, 小田島 聡, 足立 智
2. 発表標題 外部歪みによる単一量子ドット発光特性の変化
3. 学会等名 第57回応用物理学会北海道支部/第18回日本光学会北海道支部 合同学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤 圭吾, 沈 安東, 安井 翔一郎, 山本 壮太, 鍛治 怜奈, 足立 智
2. 発表標題 時間分解力一回転分光で観るバルク AlGaAsでの大きな核磁場形成
3. 学会等名 第57回応用物理学会北海道支部/第18回日本光学会北海道支部 合同学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鍛治 怜奈, 山本 壮太, 足立 智
2. 発表標題 n-GaAsバルクにおける全光核磁気共鳴信号の検出
3. 学会等名 第57回応用物理学会北海道支部/第18回日本光学会北海道支部 合同学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安井 翔一郎, 稲葉 智宏, 石澤 淳, 日達 研一, 尾身 博雄, 松浦求磨, 鍛治 怜奈, 依 毅彦, 足立 智, Xuejun Xu, 眞田 治樹
2. 発表標題 低濃度167Er ³⁺ :Y ₂ SiO ₅ におけるAtomic frequency comb量子メモリの高効率化
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会 (2024年3月22-25日, 東京都市大世田谷キャンパス) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 松浦 求磨, 安井 翔一郎, 鍛治 怜奈, 依 毅彦, 足立 智
2. 発表標題 167Er ³⁺ :Y ₂ SiO ₅ 結晶でのスピン状態保存時間のErイオン濃度依存性
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会 (2024年3月22-25日, 東京都市大世田谷キャンパス)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 鍛冶 怜奈, 山本 壮太, 足立 智
2. 発表標題 ナノ構造半導体における面内核磁場形成ダイナミクスと 2 重双安定現象
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第44回年次大会 (2024年1月16-19日, 日本科学未来館, 東京国際交流会館プラザ平成) (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 山本 壮太, 鍛冶 怜奈, 笹倉 弘理, 足立 智
2. 発表標題 単一量子ドットにおける核スピン分極の光生成
3. 学会等名 スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク (Spin-RNJ) シンポジウム(2024年3月17-18日, 東北大学 片平キャンパス さくらホール)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 A. Shen, J. Chen, R. Kaji, T. Uemura, and S. Adachi
2. 発表標題 Slowly generated anomalously large nuclear field in bulk n-AlGaAs
3. 学会等名 The 27th Symposium on the Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS-27) (2024年3月16-17日, 東北大学 片平キャンパス)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田端孝成, 鍛冶 怜奈, 小田島聡, 足立 智
2. 発表標題 歪印加デバイスの作製と単一 QD 発光エネルギー変化
3. 学会等名 第59回応用物理学会北海道支部/第20回日本光学会北海道支部 合同学術講演会 (2024年1月6-7日, 北海道大学)
4. 発表年 2024年

1 . 発表者名 S. Odashima, K. Tabata, R. Kaji
2 . 発表標題 Fabrication of the QD nanopillar photon emitter and PL spectral tuning by piezoelectric external force
3 . 学会等名 36th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2023) (Keio Plaza Hotel Sapporo, Sapporo, Japan, Nov. 14-17, 2023) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 S. Yasui, T. Inaba, K. Hitachi, A. Ishizawa, R. Kaji, T. Tawara, S. Adachi, X. Xu, H. Sanada
2 . 発表標題 Optical detection of trace amounts of Er ions in silicon-based rare earth oxide thin film waveguides
3 . 学会等名 The 2023 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2023) (Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan, 5-8 September, 2023) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 S. Adachi, S. Yamamoto, R. Kaji, H. Sasakura
2 . 発表標題 Impact of nuclear quadrupole interaction in anomalous Hanle effect
3 . 学会等名 The 22nd International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON22) (Agora Conference Center, Munster, Germany, 14-18 August, 2023) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 S. Yasui, T. Inaba, A. Ishizawa, K. Hitachi, H. Omi, R. Kaji, T. Tawara, S. Adachi, X. Xu, H. Sanada
2 . 発表標題 Development of comb transfer method for high efficiency atomic frequency comb quantum memory
3 . 学会等名 The 22nd International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON22) (Agora Conference Center, Munster, Germany, 14-18 August, 2023) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Kaji, S. Yamamoto, Z.-R. Li, H. Sasakura, and S. Adachi
2. 発表標題 Emergence of the third stable nuclear state due to the reaction of electron spin relaxation via hyperfine interaction
3. 学会等名 The 22nd International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON22) (Agora Conference Center, Munster, Germany, 14-18 August, 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鍛冶 怜奈, 山本 壮太, 足立 智
2. 発表標題 時間分解ハルル測定で観る面内核磁場形成における核四極子効果
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会 (2023年9月19 23日, 熊本城ホール)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 A. Shen, R. Kaji, T. Uemura, S. Adachi
2. 発表標題 Nuclear Spin Dynamics of Bulk AlGaAs studied by Time-Resolved Kerr Rotation Technique
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会 (2023年9月19 23日, 熊本市国際交流会館)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松浦 求磨, 安井 翔一郎, 鍛冶 怜奈, 俵 毅彦, 足立 智
2. 発表標題 167Er3+:Y2SiO5におけるZEF0Z遷移の利用によるスピン状態保存時間の伸長
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会 (2023年9月19 23日, 熊本城ホール)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

極限量子光学研究室ホームページ
https://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/UFQ0/adachi_ja.html

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
研究分担者	俵 毅彦 (Tawara Takehiko) (40393798)	日本大学・工学部・教授 (32665)	
研究分担者	鍛冶 怜奈 (Kaji Reina) (40640751)	北海道大学・工学研究院・准教授 (10101)	
研究分担者	笹倉 弘理 (Sasakura Hirotaka) (90374595)	北海道大学・工学研究院・准教授 (10101)	

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
---------	---------