

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18996

研究課題名（和文）ダイヤモンド伝導キャリアスピndeバイスの新規創製と物理開拓

研究課題名（英文）Development and pioneering physics of devices with conduction carrier spins in diamond

研究代表者

小寺 哲夫（Tetsuo, Kodera）

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：00466856

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：将来的にダイヤモンド量子構造中の伝導キャリアのスピnde輸送を実現し、スピndeダイナミクスに関わる根本の物理を解明するため、その基盤技術を開発した。素子については、構造検討、素子設計を行い、物理の解明に向けては、国内外の研究者らとの議論や第一原理計算も含めた理論的アプローチを進めることで、電子状態に関する理解を深めた。測定系の構築については、高周波系を導入し、順調に進めることができ、シリコン系素子を用いてこの測定系の構築が正しく行えたことを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、量子構造におけるスピndeダイナミクスに関わる根本の物理解明に向けた、萌芽的な研究に位置づけられる。高周波系を導入した測定系の構築について、シリコン系素子を用いて正しく行えたことを確認しただけでなく、量子構造のポテンシャルをゲート電極によって調整し、ソースドレイン間を流れる電流を測定することで、スピndeブロックを観測し、スピndeダイナミクスに関わる根本の物理を解明するための要素技術を開発できた。

研究成果の概要（英文）：We have developed the basic technology to realize spin transport of conduction carriers in diamond quantum structures and to elucidate the fundamental physics related to the spin dynamics in the future. For device development, we examined and designed the device structures, and for the elucidation of physics, we promoted theoretical approaches such as discussions with domestic and foreign researchers and first-principles calculations, and deepened our understanding of electronic states. Regarding the construction of the measurement system, we successfully introduced a high-frequency system, and confirmed that the construction of this measurement system was correctly performed using silicon-based devices.

研究分野：ナノ構造物理

キーワード：量子ドット 量子情報 量子デバイス スピndeデバイス

1. 研究開始当初の背景

量子計算機が実現されれば、現在の高速計算機では計算不能な問題を解くことができると期待されている。研究開始当初は、半導体を用いた量子コンピュータ研究は、特にシリコン系において世界的に急速に進展し、企業と大学がタイアップし、集積化に向けた開発競争が始まっていた。一方で、その他の半導体(例えば、ゲルマニウムやダイヤモンド)の伝導キャリアスピンを量子ビットに応用する研究は、未開拓であった。また、ダイヤモンドは窒素空孔センタ(NVセンタ)を利用した量子センサや量子通信応用が期待され、研究が盛んとなっていたが、量子構造中の伝導キャリアスピンの物理は全くの未解明であった。本研究を進めることにより、ダイヤモンド伝導キャリアスピンをを用いた量子ビットを実現できれば、核スピンの相互作用もスピン軌道相互作用も小さいため、シリコンよりもスピンコヒーレンス時間が長いことが期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、将来的にダイヤモンド量子構造中の伝導キャリアのスピン輸送を実現し、そのスピンドYNAMIKSに関わる根本の物理を解明するため、その基盤技術を開発することとした。我々がシリコンを用いて進めてきた最近の研究において、スピン軌道相互作用によるスピン緩和を示唆する現象が観測された。炭素はシリコンよりも原子質量が小さいことに起因してスピン軌道相互作用が小さいと考えられ、キャリアのスピンコヒーレンス時間がシリコンよりも長いと期待される。本研究は、スピンドYNAMIKSに関わる根本の物理解明に向けた、萌芽的な研究に位置づけられる。補助事業期間中の研究実施計画の項目としては、素子作製と評価、物理の解明を挙げた。また、物理の解明のための測定系を構築とした。素子作製については、構造検討、素子設計を進めることとし、物理の解明に向けては、国内外の研究者らとの議論、第一原理計算も含めた理論的アプローチを進めることで、電子状態に関する理解することとした。また、測定系の構築については、スピンドYNAMIKSに関わる根本の物理を解明するために高周波系を導入することとした。

3. 研究の方法

研究の方法として、素子構造検討、素子設計については、シリコン量子ドットを作製してきた知見を反映させた。また物理の解明に向けては、国内外の研究者らとの議論、第一原理計算も含めた理論的アプローチを進めた。第一原理計算の計算プログラムとしては、Quantum ATKを使用し、欠陥のないダイヤモンドに対して表面終端種(炭素、水素、酸素)、物理吸着分子($H_2O + O_2$)の有無を変えた異なるモデルについて、構造最適化を行った。その後、射影局所状態密度(PLDOS)計算を行った。そのうえで、各モデルの中にNV⁻¹センターを形成し、バンド構造計算を行い、NVセンターのエネルギー構造を明らかにした。次に、計算プログラムをThe Vienna Ab initio Simulation Package (VASP)に変更し、先ほどのモデルに対して基底状態及び励起状態での全エネルギーを計算することで、配位座標モデルを描き、結晶中の欠陥の種類及び電荷状態を特定できるZero Phonon Line (ZPL)を計算した。

測定系の構築については、スピンドYNAMIKS測定に必要となる高周波系を導入し、シリコン系素子を用いて、この測定系の構築が正しく行えたことを確認することとした。2重量子ドットのポテンシャルをゲート電極によって調整し、ソースドレイン間を流れる電流を測定することで、スピンプロッケードを実現し、その磁場依存性を詳細に調べることで、スピン緩和要因や緩和時間を評価することとした。また、スピンプロッケード状態の量子ドットに高周波が意図通りに印加されていることを電気伝導特性から確認することとした。

4. 研究成果

物理の解明に向けては、国内外の研究者らとの議論、第一原理計算も含めた理論的アプローチを進めることで、電子状態に関する理解が深めることができた。第一原理計算においては、(111)水素終端ダイヤモンドのPLDOSを求めたところ、物理吸着分子がある場合でのみおよそ2 eVの上向きバンドベンディングが見られた。(111)水素終端ダイヤモンド中のNVセンターの電荷状態を求めるためにZPLを計算する際には、物理吸着分子があるモデルを使用する必要があることがわかった。

測定系の構築については、スピンドYNAMIKSを測定するための高周波系を導入し、完成することができた。冷凍機内の高周波ラインは、室温部からの熱の流入を抑えつつ高周波信号を極低温下の量子ドットに印加する必要があるため、適切な線材の同軸線とアッテネータを取り付けた。また、必要な制御を行えるように、室温部のエレクトロニクス(信号発生器やデジタイザ等)を制御するプログラムを作成した。これらの測定系の構築が正しく行えたことを確認するためにシリコン系素子を用いて電気伝導特性評価と高周波応答特性評価を行った。測定温度300 mKにおいて、2重量子ドットのポテンシャルをゲート電極によって調整し、ソースドレイン間を流れる

電流を測定することで、スピンプロケードを観測した。スピンプロケードとは、パウリの排他原理によって量子ドット間の電子輸送が抑制される現象である。このスピンプロケードはスピン量子ビット応用において、スピン状態の初期化や読み出しのための重要な要素技術である。また、スピンプロケード状態でわずかに流れる電流（漏れ電流）の磁場依存性を詳細に調べることで、スピン緩和要因が主としてスピン軌道相互作用によることと、その緩和時間についても明らかにすることができた。さらに、マイクロ波を用いて、スピンプロケード状態にある量子ドット中のスピンの回転操作を行うことができた。マイクロ波はスピン軌道相互作用を介すことで、スピンにとっては有効交流磁場として作用する。外部磁場に比例する正孔スピンのゼーマンエネルギーに対応する周波数の交流電場が印加されたとき、電流ピークが観測された。これは、有効交流磁場によるスピン共鳴で正孔スピンの回転し、スピンプロケードの漏れ電流が生じたためである。この結果により、マイクロ波領域の高周波が極低温下の量子ドットに印加できていることが確認され、スピンドYNAMICSを調べるためのスピン回転操作に成功したと言える。

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 S. Hiraoka, K. Horibe, R. Ishihara, S. Oda and T. Koder	4. 巻 117
2. 論文標題 Physically defined silicon triple quantum dots charged with few electrons in metal-oxide-semiconductor structures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 74001-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0010906	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 N. Shimatani, Y. Yamaoka, R. Ishihara, A. Andreev, D. A. Williams, S. Oda, and T. Koder	4. 巻 117
2. 論文標題 Temperature dependence of hole transport properties through physically defined silicon quantum dots” (Editor's pick)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 94001-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0010981	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 R. Mizokuchi, M. Tadokoro and T. Koder	4. 巻 13
2. 論文標題 Detection of tunneling events in physically defined silicon quantum dot using single-shot measurements improved by numerical treatments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Express	6. 最初と最後の頁 121004-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abc923	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. Bugu, F. Ozaydin and T. Koder	4. 巻 10
2. 論文標題 Surpassing the classical limit in magic square game with distant quantum dots coupled to optical cavities	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sci. Rep.	6. 最初と最後の頁 22202-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-79295-x	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 R. Mizokuchi, S. Bugu, M. Hirayama, J. Yoneda, T. Koder	4. 巻 11
2. 論文標題 Radio-frequency single electron transistors in physically defined silicon quantum dots with a sensitive phase response	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sci. Rep.	6. 最初と最後の頁 5863-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-85231-4	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 S. Bugu, S. Nishiyama, K. Kato, Y. Liu, T. Mori, T. Koder	4. 巻 60
2. 論文標題 RF reflectometry for readout of charge transition in a physically defined p-channel MOS silicon quantum dot	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 SBB107-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abeac1	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. Bugu, F. Ozaydin, T. Ferrus, and T. Koder	4. 巻 10
2. 論文標題 Preparing Multipartite Entangled Spin Qubits via Pauli Spin Blockade	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sci. Rep.	6. 最初と最後の頁 3481-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-60299-6	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13件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 T. Koder
2. 発表標題 Silicon quantum dot devices for spin-based quantum computing
3. 学会等名 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop 2020 (SNW 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Bugu, S. Nishiyama, K. Kato, Y. Liu, T. Mori, T. Kodera
2. 発表標題 Readout of Charge States in a Physically Defined PMOS Silicon Quantum Dot via RF Reflectometry
3. 学会等名 2020 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小寺哲夫
2. 発表標題 シリコン量子コンピュータデバイス技術
3. 学会等名 第224回応用物理学会シリコンテクノロジー分科会 研究集会 「量子コンピュータにおける半導体・デバイステクノロジー」オンライン開催 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小寺哲夫
2. 発表標題 シリコンスピン量子ビットの集積に向けた研究
3. 学会等名 第25回半導体におけるスピン工学の基礎と応用 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小寺哲夫
2. 発表標題 族半導体量子ビット研究の動向と展望
3. 学会等名 科研費 ゲルマニウム系量子スピン研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小寺哲夫
2. 発表標題 半導体量子ピットの研究動向と展望
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会、シンポジウム「スピンを利用した量子技術の最前線 - 量子デバイス開発から新材料探索まで -」 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S.Ota, S. Hiraoka, R. Mizokuchi, T. Kodera
2. 発表標題 Observation of bipolar Pauli spin blockade and the few-electron regime in a silicon linearly triple quantum dot
3. 学会等名 Topical Conference on Quantum Computing 2019 (TCQC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Mizokuchi, S. Bugu, M. Hirayama, M. Tadokoro, T. Kodera
2. 発表標題 RF reflectometry on physically defined triangular triple quantum dot
3. 学会等名 Topical Conference on Quantum Computing 2019 (TCQC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Tashiro, R. Mizokuchi, H. Wei, H. Takahashi, M. Hirayama, S. Nishiyama, N. Shimatani, Y. Yamaoka and T. Kodera
2. 発表標題 Study on measurement of p-type silicon double quantum dots with FPGA
3. 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2019 (HQS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 依田 大地、ムルガナタン マノハラ、カリクンナン アフサル、小寺 哲夫、水田 博
2. 発表標題 異なる表面終端を持つダイヤモンドスラブ中のNV-1センターの第一原理解析
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 溝口 来成、Bugu Sinan、田所 雅大、小寺 哲夫
2. 発表標題 物理的に形成された量子ドットを用いたRF反射測定
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田所 雅大、溝口 来成、小寺 哲夫
2. 発表標題 三角形状に並べた三重量子ドットの電流特性の磁場依存性
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西山 伸平、小林 瑞基、溝口 来成、小寺 哲夫
2. 発表標題 シリコン量子ドットの高帯域測定に向けた極低温アンプの評価
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京工業大学 小寺研究室 (Kodera Laboratory)
<http://www.quantum.ee.e.titech.ac.jp/>

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