

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K15114

研究課題名（和文）ゲルマニウム重い正孔スピン量子ビットの開発とスピン軌道相互作用の制御による最適化

研究課題名（英文）Development of heavy-hole spin qubit in germanium and its optimization by controlling spin-orbit interaction

研究代表者

溝口 来成（Mizokuchi, Raisei）

東京工業大学・工学院・特任助教

研究者番号：90848772

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：ゲルマニウムナノ構造中の重い正孔スピンを用いることで、簡素な構造を持ち高速かつ長寿命な量子ビットが実現できると期待されている。本研究ではこのような量子ビットの実現に向け、ゲルマニウム量子ドット構造の実現と量子ビット測定技術の開発が目的となる。具体的には、Ge/SiGeヘテロ構造基板を利用した量子デバイスの作製プロセスの立ち上げを行い、Hall barデバイスと量子ドットデバイスの作製を行った。また、量子ビット実現に向けてRF波を利用した高速読み出し測定系の構築を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、ゲルマニウム中の重い正孔に着目し量子ビットの実現を目指すという、量子コンピュータ実現に向けた基盤的な研究を行った。この中で、ゲルマニウム量子デバイスの作製に成功している。これは、今後の高性能なゲルマニウムスピン量子ビットの実現に貢献する重要な成果である。並行して、高速なスピン読み出しを可能にするRF反射測定の最適化条件の確立という、他のスピン量子ビット系へも適用できる学術的意義の大きい成果も挙げている。

研究成果の概要（英文）：The utilization of heavy-hole spins in germanium nanostructures holds the potential to achieve simple yet high-speed and long-lived qubits. In this study, our objective is to realize such quantum bits by focusing on the implementation of germanium quantum dot structures and the development of qubit measurement techniques. Specifically, we initiated the fabrication process of quantum devices using Ge/SiGe heterostructures and successfully created Hall bar devices and quantum dot devices. Furthermore, we constructed a measurement system for high-speed readout using RF waves, aiming towards the realization of qubits.

研究分野：ナノ構造デバイス

キーワード：ゲルマニウム 量子ドット

## 1. 研究開始当初の背景

他の量子ビットに比べ、構造の寸法を格段に小さくできる半導体スピン量子ビットは、実用的な量子コンピュータに向けた大規模集積化に有望と考えられている。材料にシリコンやゲルマニウムのような IV 族半導体を用いると、外乱となる核スピンを持たない同位体でほとんどが構成されているため、長いコヒーレンス時間を持つ高性能な量子ビットの実現が期待される。実際にシリコン量子ドットスピン量子ビットでは長寿命、高忠実度な量子ビットが実現されている。しかしながら、シリコン量子ドット中でのスピン操作は、スピン共鳴のために量子ドット近傍に堆積された微小磁石やアンテナのような専用の外部構造を必要としており、将来の集積化には構造の簡素化が望まれる。一方、スピン軌道相互作用を介したスピン操作は、電荷の動きに伴って生じる内部有効磁場を利用することで余分な構造なしにスピン操作が可能になる。半導体中の正孔は、価電子帯バンドのミキシングにより大きなスピン軌道相互作用を持つため、シリコン正孔スピン量子ビットにおいてこのような操作が利用されてきた。原子数の大きい材料において、より強いスピン軌道相互作用が期待されること、また、面内方向の有効質量がより軽く顕著な量子効果が現れることから、ゲルマニウム中の重い正孔が近年注目を集めていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、ゲルマニウム中の重い正孔を用いた量子ビットの実現に向けたデバイスの開発と量子ビット実現に向けた要素技術の開発を目的としている。この目的に向け、電場による制御が比較的容易な、構造の反転対象性の破れによるスピン軌道相互作用に着目する。この制御により量子ビットの高性能化が可能になると期待される。

## 3. 研究の方法

まず、量子ビットとして機能するゲルマニウム量子ドットデバイスの作製を行う。絶縁膜が堆積された Ge/SiGe ヘテロ構造上に電子線露光により微細ゲート構造を作製し、局所的なポテンシャル変調を可能にすることで、スピン軌道相互作用の制御が可能な構造の作製を行う。このようなデバイス作製を行うためデバイス作製プロセスの立ち上げから始める。次に作製したデバイスを極低温下で測定し、電場を変えることで制御しつつ量子ドットの評価を行う。並行して、RF 反射測定のような量子ビット測定技術の開発を行う。

## 4. 研究成果

まず、ゲルマニウム量子ドットデバイスの作製に向けて、デバイス作製の条件出しを行った。本研究のゲルマニウム量子ドットデバイスは Ge/SiGe ヘテロ構造基板に作製した。量子ドットデバイス作製のために、エッチングによるメサの形成、オーミック電極の堆積、ゲート絶縁膜の堆積、ゲート電極の堆積を行う。それぞれのプロセスについて、作製条件の最適化を行った(図1)。例えば、ゲート絶縁膜の堆積では、堆積前にクリーニングプロセスを追加することで、絶縁破壊電圧の向上を行った。また、作製したデバイスを測定すると、基板上で電極間のリークが生じることがわかったため、その抑制のためメサ構造の工夫を行った。

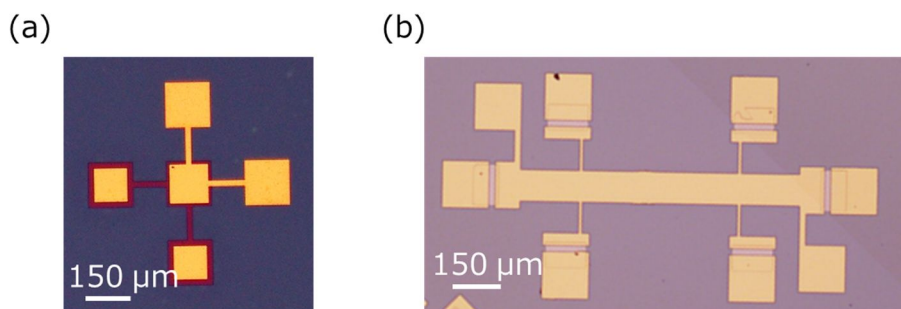


図1 (a)テスト用のデバイス構造。(b)ホール効果デバイス。

このようなプロセスによって、デバイスを作製した。量子ドットの作製や測定に先立って、基本的なデバイス構造に問題がないかの確認や基板自体の評価を行うため、Ge/SiGe ヘテロ構造基板にホール効果デバイスを作製し、極低温下で測定した(図2)。測定では、まず、ゲルマニウム量子井戸中に正孔を誘起できるか確認するためゲート電圧を掃引し、期待通り FET 動作を観測した。続いて十分正孔を誘起する電圧条件において、面直磁場を印加・掃引し、ホール測定を行った。結果として、ランダウ準位の形成を示す明瞭な SdH 振動と量子ホール効果の観測に成功した。ゼロ磁場近傍の特性から移動度を評価し、 $10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 程度の高い移動度が期待通り得られていることを確認した。さらに温度依存性を調べることで、期待される通りの小さな有効質量を持つことを確認した。これらの結果は、量子ドットを形成しスピン量子ビットを実現するのに十

分な性能の基板であることを示している。ゼロ磁場近傍の特性をより詳細に測定することで、スピン軌道相互作用の効果による弱反局在によるコンダクタンス変化が観測できると考えられる。異なるゲート電圧においてこの弱反局在について調べることでスピン軌道相互作用の効果調べることが可能になる。

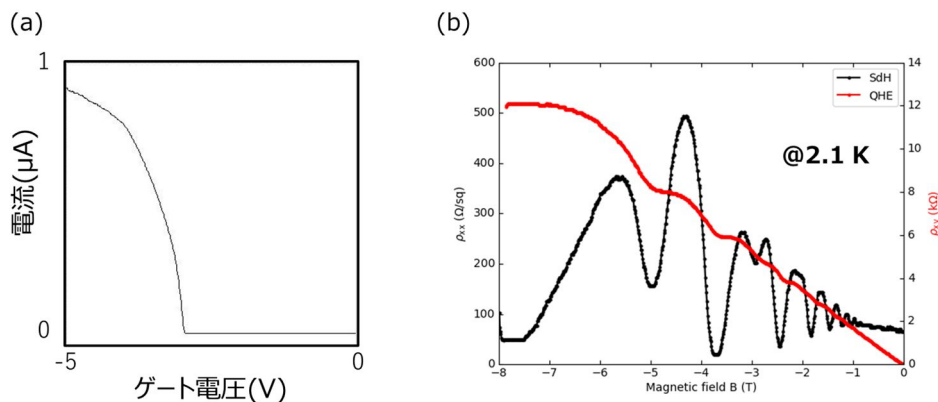


図2 ゲート構造を持つホール効果デバイスの低温評価

続いて、ゲルマニウムスピン量子ビット実現に向け、量子ドットデバイスも作製し、低温下で測定を行った(図3)。量子ドットデバイスは、ホール効果デバイスとほぼ同様の作製プロセスにより作製できる。ホール効果デバイスとの違いとして、ナノサイズの面内量子閉じ込めを実現するために、微小ゲートの作製が必要になる。この作製のため、電子線露光や金属蒸着の条件を最適化し、設計通りの微小ゲート構造が作製できることを確かめた。また、この微小ゲートが堆積された量子ドットデバイスを液体ヘリウム中で測定することで、FET動作を確認できた。不明瞭ながらピーク状の電流特性が現れており、よりゲート構造を最適化することで量子ドットとして動作すると考えられる。

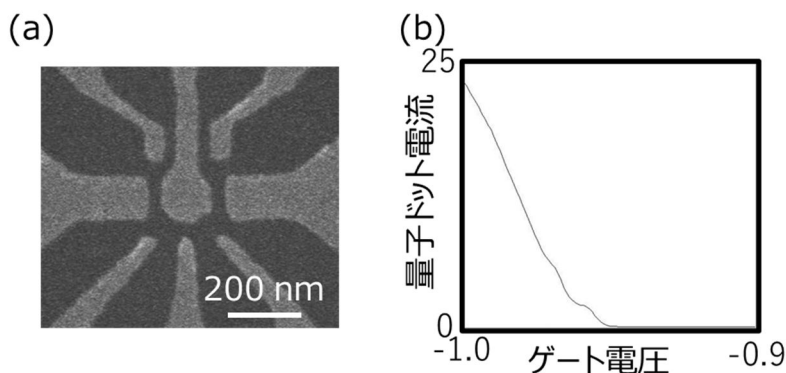


図3 量子ドットデバイスの低温評価

並行して、別の量子ドットデバイスを利用し、スピン量子ビット実現に向けた要素技術の開発、特に、RF 反射測定と呼ばれる高速読み出し技術の開発を行った(図4)。この技術では、量子ビット近傍に集積された、大きなインピーダンスを持つ量子ドットセンサにLCの整合回路を接続することで、スピン状態に対応する微小なインピーダンス変化を反射率から高感度に読み出す。測定結果では、センサのインピーダンス変化に対応して、反射率振幅と位相の変化の観測に成功した。特に位相変化では、通常では観測されないような大きな位相変化を観測した。この結果を説明するため、寄生成分を考慮した等価回路を考え、良いインピーダンスマッチングと周波数離調がこの大きな位相信号の要因となっていることを明らかにした。このような技術などと上記の量子ドット構造を組み合わせることでゲルマニウム正孔スピン量子ビットが実現できると期待される。

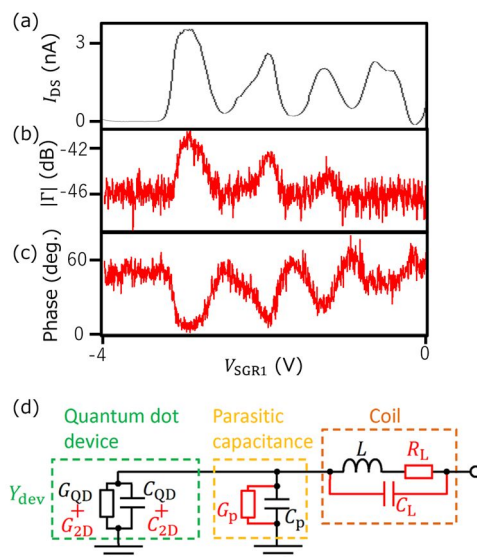


図4 RF 反射測定

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Machida Masato, Mizokuchi Raisei, Yoneda Jun, Tomura Takashi, Kodera Tetsuo	4. 巻 62
2. 論文標題 Mixed-mode RF reflectometry of quantum dots for reduction of crosstalk effects	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SC1086-1 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acbb0e	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 溝口 来成、米田 淳、小寺 哲夫	4. 巻 J105-C
2. 論文標題 シリコン量子ビット技術と集積化に向けた研究動向	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 C	6. 最初と最後の頁 227 ~ 234
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transelej.2021JC10017	査読の有無 無
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 Mizokuchi Raisei, Bugu Sinan, Hirayama Masaru, Yoneda Jun, Kodera Tetsuo	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 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 5863
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 -

〔学会発表〕 計22件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 S. I. Ibad, H. Takahashi, S. Nishiyama, K. Kato, Y. Liu, S. Murakami, T. Mori, R. Mizokuchi, J. Yoneda, T. Kodera
2. 発表標題 Stabilizing method of a double quantum dot towards long-term and stable spin-qubit operation
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 町田 理人, 溝口 来成, 米田 淳, 戸村 崇, 小寺 哲夫
2. 発表標題 ミックスモード伝送によるRF反射測定のクロストーク低減
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 中越 一真, 高橋 洋貴, 溝口 来成, 米田 淳, 小寺 哲夫
2. 発表標題 pMOS シリコン量子ドットにおける電荷ノイズのスペクトル評価
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 二谷 時緒, 溝口 来成, 神岡 純, 米田 淳, 小寺 哲夫
2. 発表標題 スピン量子ビット読み出し回路高密度化に向けた極低温アクティブインダクタに関する研究
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中越 一真, 土屋 龍太, 峰 利之, 久元 大, 水野 弘之, 溝口 来成, 米田 淳, 小寺 哲夫
2. 発表標題 pMOSシリコン量子ドットにおける電荷ノイズの温度依存性評価
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松田 凌,神岡 純,溝口 来成,米田 淳,小寺 哲夫
2. 発表標題 RF反射測定の性能向上に向けた量子ドットのSパラメータ測定と整合回路の設計
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉川 拓弥,鈴木 優作,Ibad Sayyid Irsyadul,西山 伸平,加藤 公彦,柳 永勳,村上 重則,森 貴洋,溝口 来成,米田 淳,小寺 哲夫
2. 発表標題 物理形成量子ドット中のシリコン正孔スピンの時間制御操作と動作温度の向上
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Machida,R. Mizokuchi,J. Yoneda,T. Tomura,T. Kodera
2. 発表標題 Mixed-mode RF reflectometry for reduction of crosstalk effects
3. 学会等名 2022 International Conference on Solid Device and Materials (SSDM 2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 C. Wen,H. Takahashi,S. S. Ibad,S. Nishiyama,K. Kato,Y. Liu,S. Murakami,T. Mori,R. Mizokuchi,J. Yoneda,T. Kodera
2. 発表標題 Long-term characteristic stabilization of a semiconductor double quantum dot based on a multi-dimensional gradient descent technique
3. 学会等名 2022 International Conference on Solid Device and Materials (SSDM 2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Nakagoe, R. Tsuchiya, T. Mine, D. Hisamoto, H. Mizuno, R. Mizokuchi, J. Yoneda, T. Kodera
2. 発表標題 Temperature dependence of charge noise in a pMOS quantum dot
3. 学会等名 2022 Silicon Quantum Electronisc Wrokshop
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 溝口 来成, 坂本 剛, 近藤 知宏, 松岡 竜太郎, 土屋 龍太, 峰 利之, 久本 大, 水野 弘之, 米田 淳, 小寺 哲夫
2. 発表標題 多数電子シリコン量子ドット中の電子スピンの磁場依存性
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 中越 一真, 荒川 雄登, 松岡 竜太郎, 土屋 龍太, 峰 利之, 久本 大, 水野 弘之, 溝口 来成, 米田 淳, 小寺 哲夫
2. 発表標題 シリコン量子ドットにおけるデチューニングノイズの特性評価
3. 学会等名 第70回応用物理学会秋春学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 荒川 雄登, 中越 一真, 松岡 竜太郎, 土屋 龍太, 峰 利之, 久本 大, 水野 弘之, 溝口 来成, 米田 淳, 小寺 哲夫
2. 発表標題 高周波反射測定を用いたnMOSシリコン量子ドットの電荷ノイズ評価
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 近藤 知宏, 溝口 来成, 米田 淳, 小寺 哲夫
2. 発表標題 モデルベース強化学習による量子ドットの自動調整
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 松田 凌, 神岡 純, 溝口 来成, 米田 淳, 小寺 哲夫
2. 発表標題 物理形成量子ドットにおけるRF反射測定に適した単段整合回路の設計・評価
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 Raisei Mizokuchi, Masaru Hirayama, Shimpei Nishiyama, Kimihiko Kato, Yongxun Liu, Shigenori Murakami, Takahiro Mori, Jun Yoneda, Tetsuo Kodera
2. 発表標題 Equivalent Circuit Analysis of RF Reflectometry of Physically Defined Quantum Dot Systems
3. 学会等名 24th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems/20th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (EP2DS-24/MSS-20 Joint Conference) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaru Hirayama, Raisei Mizokuchi, Masahiro Tadokoro, Yuki Takeda, Shimpei Nishiyama, Kimihiko Kato, Yongxun Liu, Shigenori Murakami, Takahiro Mori, Jun Yoneda, Tetsuo Kodera
2. 発表標題 Phase-encoded radio-frequency reflectometry for parallel readout of quantum dot states
3. 学会等名 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 町田 理人, 溝口 来成, 米田 淳, 戸村 崇, 小寺 哲夫
2. 発表標題 ミックスモード伝送によるRF反射測定のクロストーク低減
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 Sayyid Irsyadul Ibad, Hiroki Takahashi, Shimpei Nishiyama, Kimihiko Kato, Yongxun Liu, Shigenori Murakami, Takahiro Mori, Raisei Mizokuchi, Jun Yoneda, Tetsuo Kodera
2. 発表標題 Stabilizing method of a double quantum dot towards long-term and stable spin-qubit operation
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 中越 一真, 高橋 洋貴, 溝口 来成, 米田 淳, 小寺 哲夫
2. 発表標題 pMOS シリコン量子ドットにおける電荷ノイズのスペクトル評価
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 溝口 来成, 西山 伸平, 加藤 公彦, 柳 永勲, 村上 重則, 森 貴洋, 米田 淳, 小寺 哲夫
2. 発表標題 Sensitivity characteristics of RF charge sensors based on p-type silicon quantum dots
3. 学会等名 Spin Camp 11
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 溝口 来成、西山 伸平、加藤 公彦、柳 永勲、村 上 重則、森 貴洋、米田 淳、小寺 哲夫
2. 発表標題 P型物理形成シリコン量子ドットRF電荷センサの感度特性評価
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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