

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01156

研究課題名（和文）半導体量子ドット・機械振動子複合構造の量子極限到達を目指した超伝導回路の開発

研究課題名（英文）Superconducting electronics for quantum measurements in a semiconductor quantum dot mechanical resonator hybrid system

研究代表者

岡崎 雄馬（Okazaki, Yuma）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：60738277

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：電気機械振動子は中空に支持した板バネ構造であり、その振動モードは調和振動子とみなせ、力などを高感度に検出するセンサとして利用できることが知られる。本研究では、機械振動子の振動モードの高感度測定を目指した周辺エレクトロニクス回路の性能向上を目指し超伝導回路や低温電気測定技術の開発を行った。また機械振動子を利用した実際の計測応用のデモンストレーションとして、機械振動モードを利用して核スピンを検出する新たな原理の実証で成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

機械振動子は高いQ値を持つ調和振動子とみなすことができ、その振動状態は高感度なセンサとして利用できる。したがって、機械振動子の振動モードを高感度に検出する実験手法の開発は、様々な物理量(力や磁気)を高感度に検出する実験技術の基盤技術になる。本研究では、超伝導エレクトロニクスを利用して機械振動子からの電気信号を高感度に検出する技術の開発につながる。多くの科学計測において測定対象の物理量は、一度電気量に変換し測定することから、電気計測技術の測定精度向上は、広範囲の研究開発の基盤となり、日本の科学研究開発を下支えする。

研究成果の概要（英文）：Electromechanical resonators are a suspended plate spring structure, whose vibration modes can be regarded as a harmonic oscillator. Their resonator modes can be used as sensors to detect various kinds of physical quantities such as mechanical forces with high sensitivity. In this research, superconducting circuits and low-temperature electrical measurement techniques were developed to improve the sensitivities for detecting the oscillations of mechanical resonators. In addition, as a demonstration of practical applications of mechanical oscillators, we demonstrated a new principle for detecting nuclear spins using mechanical vibration modes.

研究分野：物性物理学

キーワード：電気機械振動子 超伝導エレクトロニクス ジョセフソン接合 核磁気共鳴 核スピン 核音響共鳴

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。

1. 研究開始当初の背景

2010年、サイエンス誌が選出する”Breakthrough of the Year”にカリフォルニア工科大Clerendグループの研究「世界初の量子機械」が選ばれ話題を呼んだ。この研究は、長さ数十 μm の板バネ構造(機械振動子)を極低温に冷却し熱振動を抑制することによって、量子力学的な調和振動子の観測に成功したものであり、数十 μm という巨視的物体が量子力学に従うことを実証したものである。今後、巨視的量子トンネル効果の観測といった量子論の実験や、量子振動子を利用した理論限界感度での物理計測の実現などの発展が期待される。

申請者は2012年より半導体GaAsヘテロ構造から作製した機械振動子に量子ドットを埋め込み相互作用させた複合ナノ構造を研究してきた(図1)。半導体量子ドットとは、半導体中の伝導電子を数百ナノメートル領域に閉じ込めたナノ構造である。周囲の電場環境に敏感な量子ドットをセンサーとして利用し、 10^{-14}m という極めて小さな機械振動を検出することに成功した。さらに、量子ドット中の電子状態が機械振動子へ反作用することによって、共振周波数やQ値が変化する様子を世界で初めて観測した。この実験では、振動子は量子極限に達しない古典的なものであったが、量子ドットから機械振動子への相互作用を確認できたことは、今後ミクロな電子とマクロな機械振動子の間の量子エンタングルメントの実証やレーザーのアナロジーである量子ドットフォノンレーザーの実現といった様々な研究へ発展する可能性を開いた結果として意義がある。

申請者の研究は機械振動子の古典的な領域での議論にとどまっていたため、ミクロな電子と巨視的な振動子の量子重ね合わせ状態の実現には至っておらず、量子的な領域に関する基礎的な知見が得られていない。またその実験に必要な量子制御・計測技術も実現されていない。さらに、このような量子極限感度に達した機械振動子は、高感度な物理計測に応用できると考えられているが、実際に何の計測に使用するかは未開拓であり、今後の研究展開に期待される。

2. 研究の目的

振動子が古典的である理由は2つある。(1) 機械振動子の共振周波数がMHz程度であり1フォノン当たりのエネルギーは温度換算で50 μK 程度である。そのため、測定温度(80mK)において熱励起されてしまい量子振動が見えなかった。(2) 本実験で用いた測定手法が量子振動という極めて微小な振幅を検出できる感度に達していなかった。今後、複合構造の量子極限に期待されている様々な物理現象の観測・制御には、振動子のさらなる冷却と量子化振動の検出という2つの技術的課題を克服する必要がある。しかし半導体複合構造の量子極限状態を観測した研究は未踏領域であり、それを実現する技術基盤の開発が必要である。本研究の目的は、機械振動子の振動状態を高感度に検出するための超伝導回路技術を開発することである。また、機械振動子を具体的な物理計測応用に使用し、どのような物理計測へと発展できるかその基盤を構築する。

3. 研究の方法

本研究では、目標である量子極限到達を実現するために、熱励起を抑制する振動子の冷却、および量子振動を検出可能な高感度振動検出を実現するための超伝導回路を設計し、作製のための微細加工装置の立ち上げなどを行う。冷却といっても μK の温度域であり、通常の希釈冷凍機などでは到達不可能である。本研究では、超伝導共振回路を用いた振動子冷却法を半導体複合構造に取り入れる。これは先行研究[Teufel et al. Nature (2011)]で金属板の機械振動子の量子極限到達に成功しており、別の系では実績がある。図2にセットアップの模式図を記載した。まず振動子を冷却するために、超伝導体でキャパシタとインダクタを形成することによってマイクロ波共振器(LC共振器)を作製し、振動子と非線形結合を導入する。機械振動子とLC共振器の各共振周波数の差周波数に等しいマイクロ波を入射すると、非線形効果であるアンチストークス過程によって振動モードが冷却され、やがて量子基底状態に到達できる。次に量子振動を検出可能な信号増幅方法を実現するために、ジョセフソン接合を利用した各種増幅回路の実装を行う。このような実験を行うためには、ジョセフソン接合を利用する超伝導回路を実装するための素子作製技術の開発を行う必要がある。超伝導回路を作製するための蒸着装置類の開発とそれを使用した素子作製の条件出し、ならびに無冷媒冷凍機を用いた電気測定セットアップの構築やその動作検証などである。また、機械振動子を用いた計測応用の例として、本研究では核スピンの制御検出実験を行う。機械振動子を強磁場下に配置することで、核スピンと機械振動モードが結合するが、その様子をモニタリングするために抵抗検出NMRと呼ばれる高感度NMRを機械振動子と組み合わせた実験を行った。

4. 研究成果

(1) 超伝導エレクトロニクス開発のための微細加工技術の開発

本研究で使用する超伝導エレクトロニクスの素子開発には、ジョセフソン接合と呼ばれる超伝導体でできた電極2つを弱いトンネル接合で結合した素子が基本となる。このような、素子作製には、アルミニウムの斜め蒸着と酸素雰囲気中での自然酸化膜形成による方式が一般的に用いられている。図1に、斜め蒸着と自然酸化膜形成による超伝導接合作製のプロセスを图示した。アルミニウムを酸素雰囲気中で自然酸化してできる酸化膜は、非常に安定であることが知られ酸素の分圧と暴露時間によってトンネル接合の強度を微調整できる。

このような超伝導接合は、超高真空チャンバーを用いた蒸着装置に基盤を傾斜するための機構、自然酸化を行う酸化チャンバーを有する真空蒸着装置の開発が必要である。図2は本研究で開発した蒸着装置の写真である。サンプルを交換する際のロードロックチャンバーには、マスフローコントローラをつけアルゴン、酸素を導入できるようになっている。トランスファーロードを使用して大気中に暴露することなく、サンプルを蒸着室とロードロック室を行き来できるため、図1に示す工程を外に取り出して大気暴露することなく実行できる。また、途中に大気暴露する工程が入る複数回のアルミニウム蒸着時に、アルミニウム自然酸化膜を除去して良好なコンタクトを形成する場合がある。その際に、表面酸化膜を除去するためのアルゴンミリングをロードロック室に取り付けた。開発した、蒸着装置を使用してサンプル作製の条件出しを行っている。蒸着条件や酸化条件、アルゴンミリングなどのパラメータを振って素子作製の最適化などを行っている。またこのような微細加工技術を用いて作製される超伝導エレクトロニクスの低温電気測定応用の実験実証の一環として、市販の超伝導回路を使用した抵抗ブリッジの開発とその実証を行なっている。

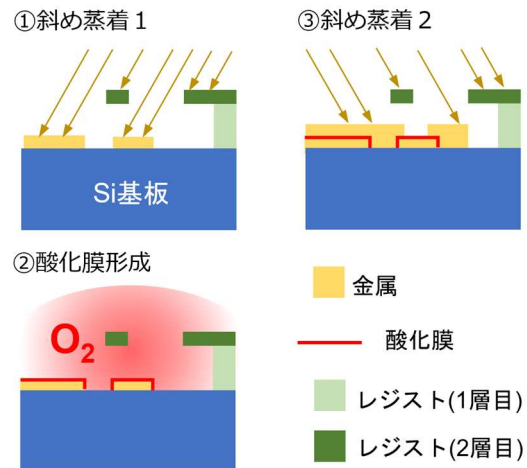


図1：斜め蒸着と自然酸化によるジョセフソン接合の製作工程



図2：斜め蒸着機構と酸化室（ロードロック室）付き真空蒸着装置の写真

(2) 機械振動子を用いた核スピンの状態制御と核音響共鳴計測への展開

機械振動子を用いた物理計測応用のデモンストレーションの一環として、核スピンの制御・計測に関する実験実証を行った。本研究で使用した機械振動子はGaAsで製作されており、どちらも100%の天然存在比で核スピンを有する。振動に伴う機械歪は原子核周りの化学結合状態や電子分布を変化させるため、原子核の自転運動である核スピンと機械振動は結合する。この結合は四重極相互作用と知れられており、バルクの材料に音波を照射した際の音波吸収（核音響共鳴）として知られていた。しかし、バルク結晶における音波の制御計測は効率が悪く核音響共鳴の感度もそれによって低いのが課題であった。機械振動子は高いQ値を持つため、その分、核と音波の結合強度もQ倍され、機械振動子を用いることで高効率に核スピンと音波（機械振動）の結合を制御できる。本研究でも、図3のように、機械振動子の基底振動に伴うひずみが最も強くなる指示部において抵抗検出核磁気共鳴法による共鳴測定を行ったところ、機械振動に伴う核磁気共鳴周波数のシフトが観測さ

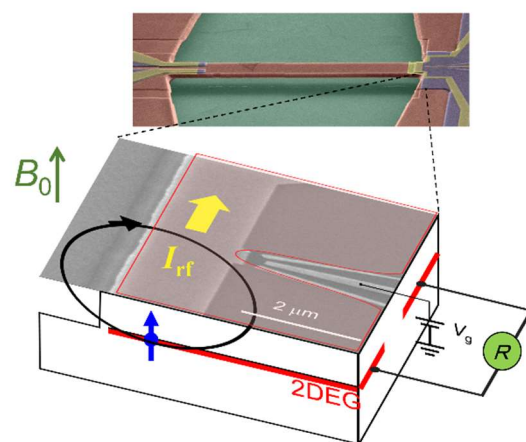


図3：機械振動を用いた核スピン制御実験の模式図。右上機械振動子(長さ 50 μm)のSEM写真。下図機械振動子指示部の拡大。抵抗検出NMRのセットアップ。

れた。この周波数シフトは原子分光で知られるACシュタルク効果のアナロジーによって説明できることを理論的な計算によって示した。この成果は論文などの成果になったほか、ハイブリッド構造に関する書籍の出版など成果をまとめた。

上記の実験では、機械振動を用いた核スピンの検出には至らなかった。その原因は、核スピンの共鳴周波数と機械振動子の周波数が不一致であったためであると考えている。さらにこの2つの周波数を一致させることができれば、より高効率で両者を結合し、振動子を介した核スピンの検出が可能になると期待される。図3のような板バネ構造の振動子では高々数 MHz の共振周波数を実現するのが限界であり、本目的には適さない。より高い共振周波数の機械振動子デバイスの作製のため、表面弾性波と呼ばれる物体表面を伝搬する振動モードにブラッグ反射機構を取り付けたデバイスを用いる方法を提案している。現在その様なデバイス(図4)を作製し、機械振動を介した核スピンの検出をめざした研究を行っている。

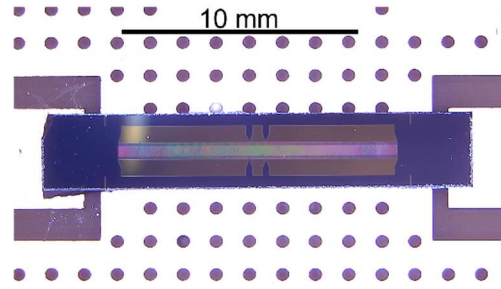


図4：機械振動子を用いた核スピンの検出に向けた表面弾性波共振器構造写真

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Okazaki Yuma, Oe Takehiko, Kawamura Minoru, Yoshimi Ryutarō, Nakamura Shuji, Takada Shintaro, Mogi Masataka, Takahashi Kei S., Tsukazaki Atsushi, Kawasaki Masashi, Tokura Yoshinori, Kaneko Nobu-Hisa	4. 巻 18
2. 論文標題 Quantum anomalous Hall effect with a permanent magnet defines a quantum resistance standard	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 25 ~ 29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-021-01424-8	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 Okazaki Yuma, Oe Takehiko, Kawamura Minoru, Yoshimi Ryutarō, Nakamura Shuji, Takada Shintaro, Mogi Masataka, Takahashi Kei S., Tsukazaki Atsushi, Kawasaki Masashi, Tokura Yoshinori, Kaneko Nobu-Hisa	4. 巻 116
2. 論文標題 Precise resistance measurement of quantum anomalous Hall effect in magnetic heterostructure film of topological insulator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 143101 ~ 143101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5145172	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 Yuma Okazaki, Imran Mahboob, Koji Onomitsu, Satoshi Sasaki, Shuji Nakamura, Nobu-Hisa Kaneko and Hiroshi Yamaguchi	4. 巻 9
2. 論文標題 Nuclear spin manipulation via electromechanical phonons	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2993
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-018-05463-3	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 Shota Norimoto, Shuji Nakamura, Yuma Okazaki, Tomonori Arakawa, Kenichi Asano, Koji Onomitsu, Kensuke Kobayashi and Nobu-Hisa Kaneko,	4. 巻 97
2. 論文標題 Fano effect in the transport of an artificial molecule	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 195313
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.195313	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 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 岡崎雄馬, 大江武彦, 川村稔, 吉見龍太郎, 中村秀司, 高田真太郎, 茂木将孝, 高橋圭, 塚崎敦, 川崎雅司, 十倉好紀, 金子晋久
2. 発表標題 磁性トポロジカル絶縁体 $\text{Cr}_x(\text{Bi}, \text{Sb})_{2-x}\text{Te}_3$ における量子異常ホール効果の標準応用に向けた普遍性検証
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡崎雄馬, 中村秀司, 小野満恒二, 金子晋久
2. 発表標題 Digital processing with single electrons for arbitrary waveform generation of current
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shota Norimoto, Shuji Nakamura, Yuma Okazaki, Tomonori Arakawa, Kenichi Asano, Koji Onomitsu, Kensuke Kobayashi, Nobu-Hisa Kaneko
2. 発表標題 Fano effect in the transport of an artificial molecule
3. 学会等名 34th International Conference on the physics of semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Okazaki, T. Oe, M. Kawamura, R. Yoshimi, S. Nakamura, S. Takada, M. Mogi, K. S. Takahashi, A. Tsukazaki, M. Kawasaki, Y. Tokura and N.-H. Kaneko
2. 発表標題 Precise transport measurements of the quantum anomalous Hall effect in Cr-doped $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$ magnetic topological insulator
3. 学会等名 10th International School and Conference on Physics and Applications of Spin Phenomena in Solids (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Okazaki
2. 発表標題 Phonon-electron-nuclear spin hybrid system in an electromechanical resonator
3. 学会等名 8th Summer School on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Okazaki, T. Oe, M. Kawamura, R. Yoshimi, S. Nakamura, S. Takada, M. Mogi, K. S. Takahashi, A. Tsukazaki, M. Kawasaki, Y. Tokura and N.-H. Kaneko
2. 発表標題 Precise transport measurements of the quantum anomalous Hall effect in Cr-doped (Bi,Sb) ₂ Te ₃ magnetic topological insulator
3. 学会等名 8th Summer School on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡崎雄馬, 大江武彦, 川村稔, 吉見龍太郎, 中村秀司, 高田真太郎, 茂木将孝, 高橋圭, 塚崎敦, 川崎雅司, 十倉好紀, 金子晋久
2. 発表標題 磁性トポロジカル絶縁体Cr(Bi,Sb) ₂ Te ₃ における量子異常ホール効果の精密抵抗測定
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三澤哲郎, 福山康弘, 岡崎雄馬, 中村秀司, 名坂成昭, 金子晋久, 浦野千春, 笹川崇男
2. 発表標題 デュアルゲートデバイスによるトポロジカル絶縁体表面の磁気輸送特性制御
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡崎雄馬
2. 発表標題 歪を介したメカニカル素子と核スピンの動的結合と計測応用
3. 学会等名 2019年第66回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡崎雄馬, 大江武彦, 中村秀司, 高田真太郎, 金子晋久
2. 発表標題 ホイートストンブリッジ回路による量子ホール抵抗値の精密比較測定系の構築
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三澤哲郎, 福山康弘, 中村秀司, 岡崎雄馬, 浦野千春, 金子晋久
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体 $\text{Sn}_0.02\text{Bi}_{1.08}\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}_i$ における表面電子輸送特性のゲート制御
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Yuma Okazaki and Hiroshi Yamaguchi, Y. Hirayama Eds., K. Ishibashi Eds., K. Nemoto Eds.	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 347
3. 書名 Hybrid Quantum Systems	

〔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
---------	---------