

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02215

研究課題名（和文）自己双対性を用いた超伝導量子ビットと電流標準素子の開発

研究課題名（英文）Superconducting qubits and current standard devices using self-duality

研究代表者

牧瀬 圭正（Kazumasa, Makise）

国立天文台・先端技術センター・准教授

研究者番号：60363321

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：我々は、ナノワイヤーと島からなる一連の窒化ニオブチタン（NbTiN）ナノ構造について、磁場中での輸送特性を調べた。ナノ構造が2次元薄膜から1次元ナノワイヤになるにつれて超伝導が強化されるのに対応し、負の磁気抵抗と臨界電流の増加が確認された。温度依存性抵抗実験では、ナノワイヤー部分に由来する位相すべり機構により、低温で抵抗がブロードになることも確認された。さらに、島状構造を持つナノワイヤでは、リトルパークスの振動のような挙動も観測された。これは、超伝導秩序変数の異なる2つの相が共存していると考察した。結果として、この構造を用いることによって単層膜でも量子素子に応用の可能性を示している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導量子コンピュータの集積回路を構成する基本素子はジョセフソン接合と呼ばれる薄い絶縁体を超伝導体で挟んだトンネル接合である。回路として動作させるには配線層やグランドプレーン、絶縁層が必要なため、構造によっては10層程度の積層構造になり、回路を作製するために高度なプロセス技術が必要である。そこでジョセフソン接合に依存しない単層膜による集積化を実現し、超伝導量子回路の集積化を飛躍的に向上させる。

研究成果の概要（英文）：We studied transport properties in magnetic fields on series of niobium titanium nitride (NbTiN) nano structure, which is consist of nanowires and small islands. Corresponding to the enhancement of superconductivity as the nanostructures cross over from 2 dimensional thin films to 1 dimensional nanowires, we confirm a negative magnetoresistance and the increases of a critical current. From the temperature dependence resistance experiments, we observe resistive tails at low temperatures due to phase slip mechanisms originate from nanowire parts. Additionally we also observed Little-Parks oscillation like behavior for nanowire with island structure. This means coexistence of two different phases of superconducting order parameter. As a result, this structure shows the possibility of application to quantum devices even with a single-layer film.

研究分野：超伝導デバイス

キーワード：超伝導-絶縁体転移 量子位相すべり 量子細線

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

すべての状態が重ね合わせで表現できる量子コンピュータでは1量子ビットで0と1の両方を同時に表現でき、すべての状態は1入力のみで表現される。ビット数が増えれば増えるほど、すなわち問題数が増え、複雑になるほど量子コンピュータはその真価を発揮する。そこで超伝導量子ビットを使ったコンピューティングシステムに大きな期待が寄せられている。量子ゲート型と呼ばれる量子ビットを使った量子コンピュータではわずか49超伝導量子ビットで古典コンピュータの性能を凌駕する事が理論的に予想され、IBMやインテル、グーグル、マイクロソフトといったIT企業やアメリカ、ヨーロッパそして中国ではすでに国家プロジェクトもすでに立ち上がり、日本でもQ-leapやNEDOのIoT横断等の国家プロジェクトが次々に走り出し、その開発競争は激化の一途をたどっている。

2. 研究の目的

超伝導量子コンピュータの集積回路を構成する基本素子はジョセフソン接合と呼ばれる薄い絶縁体を超伝導体で挟んだトンネル接合である。回路として動作させるには配線層やグランドプレーン、絶縁層が必要なため、構造によっては10層程度の積層構造になり、回路を作製するために高度なプロセス技術が必要である。量子超越性を備えた量子コンピュータでは49量子ビットとはいったが、エラー訂正等のデータの健全性を考慮すると集積規模は1億個の量子ビットを実装する必要との試算もあり、その技術開発は困難を極め、集積規模で動作させるには数十年規模の研究開発が必要とされている。そこでジョセフソン接合に依存しない新しい原理に基づく量子ビット素子開発の必要性も容易に予想される。しかし現状ではアルミニウムジョセフソン接合を用いた量子ビットが主流となっており、積層による集積化はかなり難しく、アルミに変わる材料は見出されていない。もしジョセフソン接合のような積層のトンネル接合デバイスに替わる単層薄膜デバイスやナノワイヤによるデバイスが出来れば、集積化を飛躍的に向上できる。

3. 研究の方法

我々は高集積化可能な量子ビットさらに電流標準にも応用可能なデバイスとして超伝導量子細線双対デバイスを提案する。これは超伝導量子細線がジョセフソン接合と双対関係にあることを利用している。Maxwell方程式では電場と磁場の関係を入れ替えても、その方程式の関係が成り立つ。これが双対関係の一例である。ジョセフソン接合の絶縁体と絶縁基板上に作製された超伝導細線は、「絶縁体

超伝導細線」と互いに役割が入れ替わった双対関係にある。双対性では超伝導オーダーパラメータの位相とクーパー対の粒子数の正準変換によってその状態を記述するハミルトニアンが同じ形で記述できる。これはジョセフソン接合の電子対(クーパー対)のトンネリングが、超伝導細線では量子磁束のトンネリングに対応している。双対関係は「超伝導細線素子はジョセフソン接合素子と同様の動作ができることを示している。さらに単層膜を微細加工して1次元化させるだけで、集積回路化できる

るのでプロセスは簡素化できる。すなわち、微細加工も現状の半導体プロセス技術をそのまま流用可能であるため、汎用性に関しても大きな期待が持てる。しかし、実験的に、この双対関係を実証するに特性の膜が必要である。このように超伝導QPSの研究は基礎科学的にも応用的にも調べられているが、細線の作製としてカーボンナノチューブを使ったテンプレート方もあるが、デバイス応用には向かない。そこで提案者らは電子線リソとエッチングによる微細加工プロセスを最適化し、QPSに由来する超伝導-絶縁体(SI)転移を直流輸送特性から検証し、QPSの観測に特化した新しい超伝導薄膜材料を開発する必要がある。本提案で双対性を検証しデバイスが実現できれば、ジョセフソン接合が電圧標準や電荷量子ビットとして用いられるのに対して、量子電流標準化やQPS量子ビットへの応用展開を検討した。

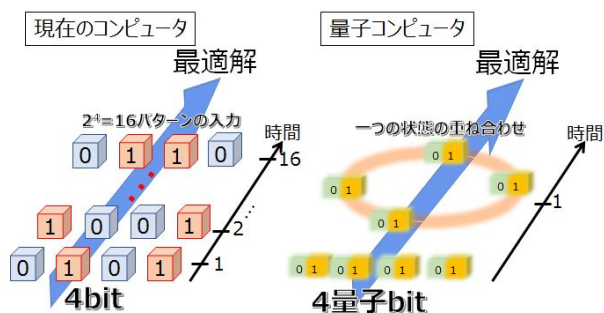


図1 古典と量子コンピュータの演算方式の比較

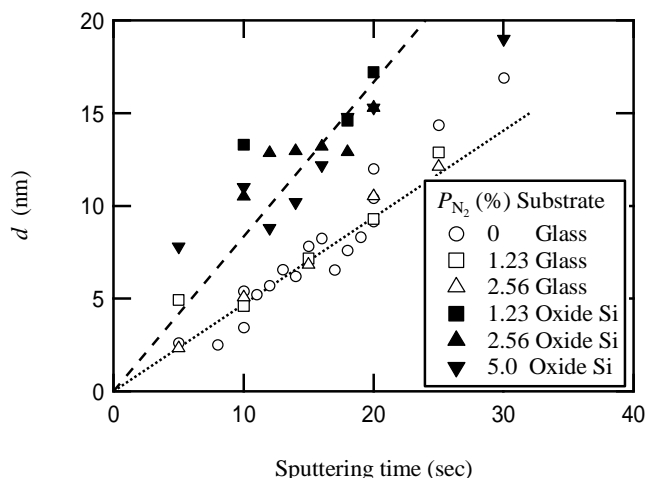


図2 基板および窒素分圧を変えたときの成膜時間にたいする膜厚

4. 研究成果

QPS を誘起させるために必要とされる高インピーダンス(高面抵抗)な超伝導薄膜について探索と検証を行った。QPS の観測には常伝導状態の時の面抵抗の値が大きい方がよい。それはQPS エネルギーの大きさは面抵抗値の大きさが量子抵抗に近づくほど大きくなるためである。Nb や Al 等の単一金属はコヒーレンス長が長く、微細加工の点で有利であるが、面抵抗値が低く、酸化による劣化が著しい。QPS で実績のある酸化インジウムは酸化による劣化の影響は小さいが、熱耐性が弱く、プロセスで必要とされる熱処理温度でインジウムの析出がおこり、位相すべりの再現実験が困難である。そこで熱

や劣化に耐性のある窒化物超伝導薄膜を候補としている。もちろん多くの研究機関で窒化チタンや窒化ニオブを用いた QPS 実験が行われている。しかしインピーダンスが結晶化により低くなり、目的とする膜を得るのが困難である。そこで位相すべりの観測に向けて新奇な薄膜である窒化モリブデン-レニウム (MoReN) の開発と最適化を進めた。MoReN の成膜は反応性 RF スパッタリング法を用いた。ターゲットは Mo75%Re25%のターは超伝導細線内で量子位相すべり(QPS)を実現させる必要がある。QPS とは以下の事である。超伝導細線内の一部で量子揺らぎに寄与が大きくなり、超伝導性が抑制された領域(位相すべり中心)が生じる。しかし両端で生じる超伝導電流は電流保存則を満たす必要があるため、その抑制された領域で位相がすべることによって保存則を満たそうとするが、磁束の量子化に伴う位相の一価性により位相が 2π だけ滑る。この位相すべりは熱揺らぎによっても生じるが、特に極低温では量子揺らぎによっても生じる。これが QPS である。QPS が 2π の周期のポロジカルプロテクトであるため、熱や電磁波に対して堅牢である。この堅牢性が超伝導量子ビットのデコヒーレンスを抑える可能性も指摘されている。この現象の観測には超伝導コヒーレンス長と呼ばれる特性長まで細線の幅を細くする必要があり、その特性長は材料によっては数十 nm になるため、極限的な微細加工が必要である。また加工プロセスや結晶粒のサイズの影響で細線に欠陥が生じ、超伝導性が失われる。このような不均質領域は量子化磁束のピン止めとして働き、QPS を抑制し、デバイスへの応用に大きな障害となる。また QPS を起こすためのエネルギーは細線のインダクタンスにも関与することが理論的に分かっており、線の形状因子や面抵抗に比例関係にある。そのため最適な面抵抗値を膜が必要とされる。それはクーパ対に対応する常伝度抵抗が量子抵抗をもつ材料の選択である。QPS おこすエネルギーは量子面抵抗で最大となるので、その特性にあった超伝導ゲットを用いた。薄膜の面抵抗を制御するためにスパッタ時のガスの Ar と N₂ を変え、いくつかの条件で成膜を行った。膜厚は XRR および接触式の膜厚計を用い、膜の組成について EPMA による分析を行った。成膜した膜はメタルマスクによって 4 端子にパターンニングした。電気抵抗測定は直流 4 端子法により 2-300K の間で温度を変化させ、超伝導転移温度や残留抵抗比の測定を行った。また臨界磁場やコヒーレンス長を見積もるために 0 - 7T の磁場範囲での測定を行った。

図 2 に成膜時間に対して膜厚をプロットしたものを示す。基板はガラス基板と熱酸化基板で比較し、N₂ の分圧比も変えて成膜した。その結果ガラス基板上のものは成膜時間に対して膜厚は比例している。膜構造は XRD の分析からアモルファスであることも分かった。

この膜の低温測定を行い、面抵抗の超伝導転移温度依存性を調べ、超伝導-絶縁体転移を起こす臨界面抵抗を調べた。結果を図 3 に示す。膜厚が十分に厚く、面抵抗が小さいところではおよそ 8K で超伝導転移を示す。そこで膜厚を薄くし、乱れを強くして面抵抗を増加させると転移温度が徐々に減少した。また成膜時の窒素分圧が 10%を超えると 2K までの測定範囲では超伝導転移を示さなくなった。窒素分圧に対して超伝導特性や輸送特性がどのように影響を受けるか詳細に調べるために

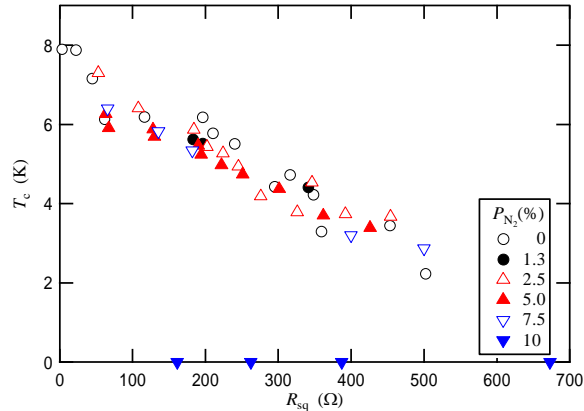


図 3 膜の面抵抗に対する超伝導転移温度依存性

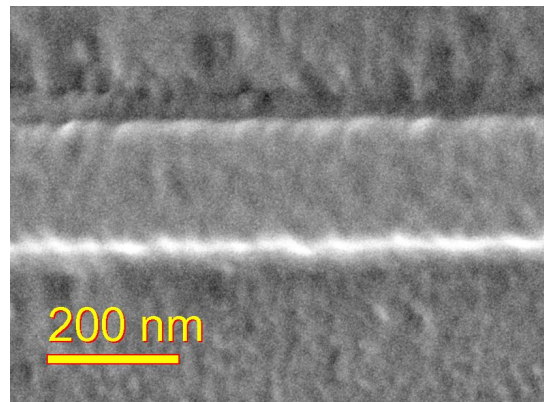


図 4 NbN ナノワイヤーの電子顕微鏡写真

磁場中での磁気抵抗特性も調べた。その結果、成膜時の窒素分圧が増加するにつれてコヒーレンス長が長くなった。加えて拡散係数も長くなっている。この振る舞いに関しては膜がアモルファスであることから窒素が増加するにつれて乱れが一様となり膜内の均一性が向上したものと考えている。そこで、この結果を乱れによる電子間相互作用の影響と考慮して理論と比較したところ良い一致が得られた。しかしフィッティングパラメータとなる平均自由行程が想定よりも2桁小さい。この理由については構造を詳細にしらべることによって明らかにする。一方で臨界面抵抗は700 Ω と量子抵抗のおよそ1/10程度であり、QPSを検証するには小さいことが分かった。これは超伝導-絶縁体転移が位相の揺らぎではなく、振幅の揺らぎによるものであり、超伝導の抑制はボゾン局在に由来するものではないことを示している。よってこの抵抗値ではQPSを観測するには困難である。今後はReの組成比を変えて、より面抵抗の大きい膜の作製条件と検討している。

次に我々はNbN膜をナノ細線に加工し、特性を調べた。図4はその加工後の写真である。膜厚は10nmであり、細線幅は200nm、長さは500 μ mである。その抵抗温度特性の結果を図5に示す。細線幅はそれぞれ100nm, 200nm, 300nmである。超伝導転移の上がり始めは細線幅によらずおよそ10Kで起こるが、細線幅が100nmのものは転移が落ち切らずブロードになる。このブロードな転移は位相すべりがおきていると考え、理論との比較では一致が見られた。そこでMoReNと同じく窒素濃度や膜厚を変化させた時に1次元による超伝導-絶縁体転移が観測されるかを調べた。その結果を図7に示す。横軸は温度であり、縦軸は規格化するために抵抗を線の長さで割ったもの(線抵抗)でプロットした。線抵抗が大きくなるにつれて抵抗の転移は徐々に低温側でブロードになる。さらに線抵抗が増加すると低温で温度に対して一定となる領域が存在する。これは2次元薄膜の超伝導-絶縁体転移でも同様な振る舞いが報告されている。この振る舞いは異常金属層またはボーズ金属と解釈されており、クーパー対は残っているが、局在しているため不確定性により位相が発散し、それが電気伝導を担っていると考えられている。確かにこれ以上の領域では超伝導的な抵抗の減少が見られなくなる。よって我々は位相すべりが局在的なコヒーレントな状態に変化したと考察した。そこでこの細線に磁場を印可し、磁気抵抗の振る舞いについて調べた。

0.5T以上の高磁場では磁場の増加にともない超伝導性は単調に抑制され、磁気抵抗は常伝導状態へと変化していく。しかしながら、低磁場では完全に反対称のR(H)挙動が観察される。図6は、w=100nmのナノワイヤの結果である。磁場に対して逆対称な交流駆動力の整流は、渦運動のラチェット効果の特徴的である。直流電流の印可による測定であるが、1kHz以下の交流電流においても同様な振る舞いが見られている。図6の結果はこのような挙動は、酸化インジウムナノワイヤでも報告されている。このワイヤでは、同時に磁気振動が観測されている。振動の周期は約0.05Tである。小さな中空円筒のリトルパークス(LP)振動は、超伝導磁束量子 Φ_0 の整数倍、すなわち $H = (s/4)\pi n \Phi_0 / w$ で見積もられる。ここでsは中空円筒の直径、nは整数である。 $\Delta H = 0.05T$ の結果では、dはおおよそ50nmである。この値は、私たちが設計したワイヤ断面積33nmに近い。転移温度以下では温度を下げると曲線の振幅が大きくなる。そこで図6のピークの値を、温度の逆数に対する最大抵抗 R_m の対数として、図7のようにプロットした。T_c以下では、Tを下げるとR_mは増加

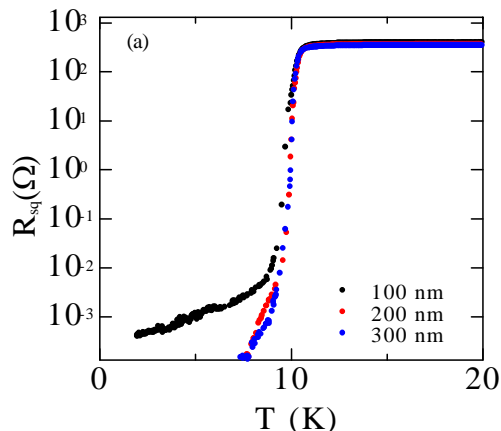


図5 NbN ナノワイヤの抵抗温度特性

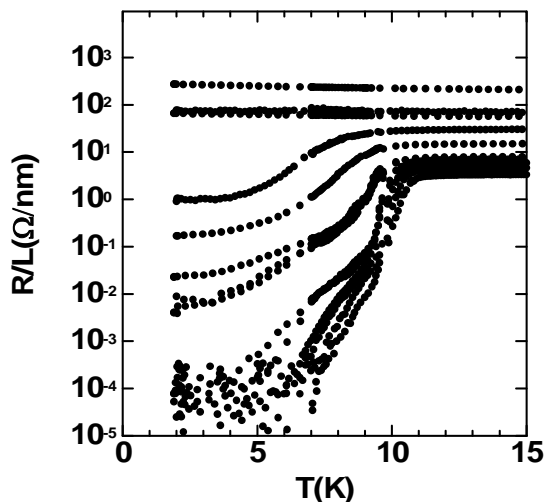


図6 NbN ナノワイヤの線抵抗の温度特性

する。しかし、ある温度で抵抗値は徐々に飽和し、温度に依存しなくなる。 $R_m(T)$ の飽和は、渦の運動が熱による励起から量子トンネルへのクロスオーバーを示唆している。これは図 6 のコヒーレントな振る舞いの解釈と矛盾しない。

現在高周波を照射できる環境下での測定系の整備を進めており、電流シャピロの観測に向けて研究を進めている。

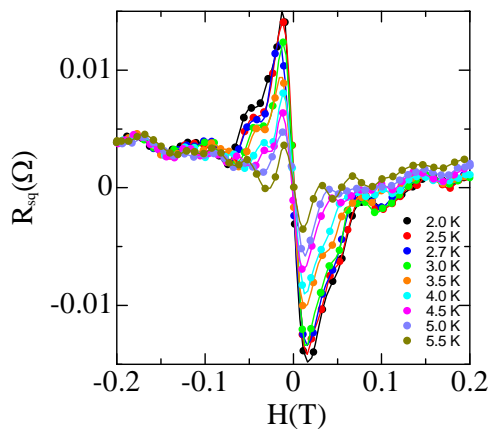


図7 NbN ナノワイヤーの磁気抵抗

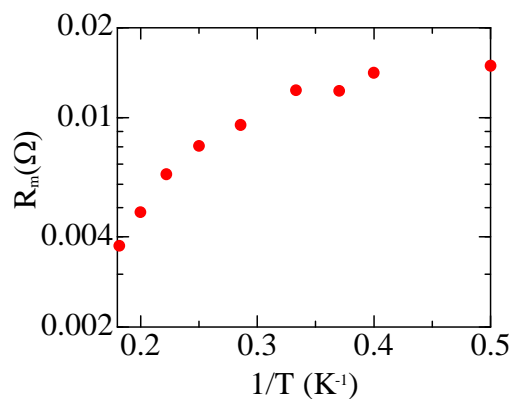


図 8 抵抗の最大値に対して温度の逆数のプロット

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 0件）

1. 著者名 Feng Wei, Kikuchi Katsuya, Hidaka Mutsuo, Yamamori Hirotake, Araga Yuuki, Makise Kazumasa, Kawabata Shiro	4. 巻 118
2. 論文標題 Thermal management of a 3D packaging structure for superconducting quantum annealing machines	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 174004 ~ 174004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0039822	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 UZAWA Yoshinori, KROUG Matthias, KOJIMA Takafumi, TAKEDA Masanori, MAKISE Kazumasa, EZAKI Shohei, SHAN Wenlei, MIYACHI Akihira, FUJII Yasunori, TERAJI Hirotake	4. 巻 E104.C
2. 論文標題 Development of Superconducting Devices Supporting Radio Astronomy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 411 ~ 421
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2020SUI0003	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 Miyakawa Kazuki, Takata Hiroki, Yamaguchi Taishi, Inagaki Yuji, Makise Kazumasa, Kawae Tatsuya	4. 巻 15
2. 論文標題 Hydrogen-impurity-induced conductance peaks in constriction type Josephson junctions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 013002 ~ 013002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac42ff	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 Uzawa, Y ; Saito, S ; Qiu, W ; Makise, K ; Kojima, T ; Wang, Z	4. 巻 199
2. 論文標題 Optical and Tunneling Studies of Energy Gap in Superconducting Niobium Nitride Films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JOURNAL OF LOW TEMPERATURE PHYSICS	6. 最初と最後の頁 143-148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-019-02324-1	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16件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 増井翔 小嶋崇文 牧瀬 圭正 小川英夫 大西利和 鶴澤佳徳
2. 発表標題 周波数コンバータを用いたマイクロ波帯アイソレータの原理確認実験
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 川上 彰、鶴澤 佳徳、牧瀬 圭正
2. 発表標題 SISミキサ増幅器励起用100 GHz帯ジョセフソンアレイ発振器
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 小嶋崇文 牧瀬圭正 江崎翔平 田村友範 宮地晃平 単文磊 金子慶子 坂井了 今田大皓 上水和田 増井翔 鶴澤佳徳
2. 発表標題 2030年代のミリ波サブミリ波電波天文学に向けたSISデバイスの研究と高感度受信機の開発
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 浦出芳郎 薬師寺啓 辻本学 山田隆宏 牧瀬圭正 水林亘 猪股邦宏
2. 発表標題 Nbバッファ層を用いた超伝導Ta膜のマイクロ波特性評価
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 才田大輔 牧瀬圭正 日高睦夫
2. 発表標題 超伝導磁束量子ビットを利用したInterconnectionにおける結合調整に関する検討
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 牧瀬圭正
2. 発表標題 超伝導量子コンピュータの社会実装に向けた量子回路の集積化技術～材料開発および3次元実装について～
3. 学会等名 56th IEEE EPS Japan Chapter Evening Meeting (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Uzawa, T. Kojima, K. Makise, A. Kawakami, Y. Kozuki, S. Masui, and W. Shan
2. 発表標題 Development of an SIS Mixer-based Low-noise Amplifier Amenable to Josephson Oscillator Pumping
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2022 (ASC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sho Masui; Takafumi Kojima; Yoshinori Uzawa; Kazumasa Makise; Hideo Ogawa; Toshikazu Onishi
2. 発表標題 Proof of Concept Experiment on a Wideband Microwave Gyration with Two Superconductor Insulator Superconductor-Based Mixers
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2022 (ASC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Makise
2. 発表標題 Asymmetric behavior of weak magnetic fields in nitride superconducting nanowires
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fusao Ichikawa, Hiroki Takeda, Kohei Matsuo, Kazumasa Makise, Bunju Shinozaki
2. 発表標題 Nitrogen Dependence of Superconducting Properties in MoReN thin films
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazumasa Makise
2. 発表標題 3D packaging technology for superconducting circuits
3. 学会等名 The 35th International Symposium on Superconductivity (ISS2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 牧瀬 圭正
2. 発表標題 超伝導量子細線の位相すべり現象とデバイス開発
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林嵩, 牧瀬圭正, 永沢秀一, 日高睦夫, 武田健太, 野入亮人, 中島峻, 樽茶清悟
2. 発表標題 Siスピン量子ビット測定に適した超伝導増幅器の試作と評価
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小嶋 崇文、鶴澤 佳徳、上月 雄人、藤井 泰範、牧瀬 圭正、単 文磊
2. 発表標題 ミリ波アイソレータを用いたSIS増幅器のマイクロ波性能
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

1. 発表者名 才田 大輔、日高 睦夫、牧瀬 圭正、平山 文紀、山梨 裕希
2. 発表標題 量子アニーリングにおける単位格子間接続用量子ビットの動作検討
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 田中 雅光、山下 太郎、藤巻 朗、牧瀬 圭正、永沢 秀一、日高 睦夫
2. 発表標題 25kA/cm ² Nb/Al/AlO _x /Al/Nb接合を用いた単一磁束量子シフトレジスタの170GHz動作
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

〔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
研究 分 担 者	篠崎 文重 (Shinozaki Bunju) (80117126)	九州大学・理学研究院・名誉教授 (17102)	

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