

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04538

研究課題名(和文) ジョセフソン電流の2次元磁界変調特性を使った超伝導量子干渉計ホログラム

研究課題名(英文) SQUID holography of two-dimensional magnetic modulation characteristics of Josephson current

研究代表者

中山 明芳(nakayama, akiyoshi)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号：90183524

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：「超伝導電子波のホログラムは可能か？」をテーマに超伝導量子干渉計で超伝導電子波のホログラムを観測した。この超伝導量子干渉計の酸化膜バリアと平行に加える外部磁界を2次元(Hx,Hy)で走査する。超伝導量子干渉計を流れる超伝導電流IcのIc-(Hx,Hy)磁界特性上に縞模様が現れる。こうして得たIc-(Hx,Hy)磁界特性上の縞模様はいわば「超伝導量子干渉計によるホログラム」であり、左右の接合の磁気特性の差異の情報を精密に有している。ニオブウムを超伝導金属として超伝導量子干渉計を製作し液体ヘリウム中で測定することで「超伝導電子波のホログラム」が得られることを実験的に検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「超伝導電子波のホログラムは可能か？」をテーマに超伝導量子干渉計で超伝導電子波のホログラムを観測した。この超伝導量子干渉計の酸化膜バリアと平行に加える外部磁界を2次元(Hx,Hy)で走査すると超伝導量子干渉計を流れる超伝導電流IcのIc-(Hx,Hy)磁界特性上に縞模様ホログラムが現れる。「超伝導電子波のホログラム」が得られることを実験的に検証した意義は大きい。特にIc-(Hx,Hy)磁界変調特性が地図の等高線図的な詳しい情報を持ち、両方の接合についての磁氣的知見が得られるところが独創的である。

研究成果の概要(英文)：We have made superconducting quantum interference devices(SQUIDs). Modulation characteristics of Josephson current through vertical type SQUID by scanning 2-D external magnetic field has been studied. By this new method we have successfully obtained the hologram for SQUID, where hologram has detailed magnetic information of two junctions of SQUID.

研究分野：電子デバイス

キーワード：超伝導 超伝導量子干渉計 SQUID ジョセフソン素子 DCジョセフソン効果 ホログラム SQUIDホログラフィー

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

(1-1) レーザー光を使った干渉計では、例えば左下図 1 に示すようにレーザー光を 2 つのビームに分け、片方のビームのみ例として「飛行機周りの高速気流」中を通し、その後 2 つのビームを干渉させる。この結果右下のスクリーン上に、干渉縞のホログラムが得られ、飛行機の周りの気流の様子が視覚的にわかりやすい映像として観測できる。また、「高速気流中の飛行機」を透明プラスチック等に置き換えればプラスチック中でのストレス状態がやはり視覚的にわかりやすく縞模様となって得られる。

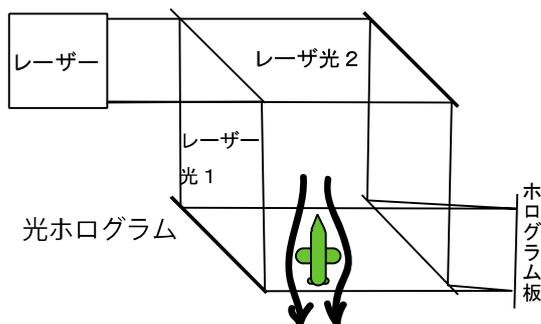


図 1 光ホログラム (気流観察図)

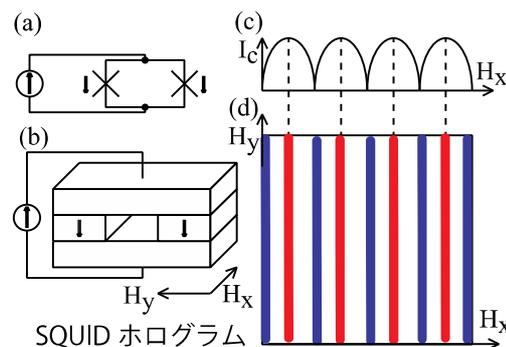


図 2 SQUID ホログラム

このような干渉計構造はレーザー光のみでなく、光源の波面が揃ってコヒーレンス性が良ければ、他の光源を使う事もできると考えている。たとえば光に換えて電子線等の利用である。

(1-2) 超伝導体中の電子波も電子がある一定の位相に揃っている。光源を超伝導体中の電子波に置き換えできると考える。本研究ではコヒーレンスのよい波として超伝導電子波を考え、実験的に検証するものである。

2. 研究の目的

レーザー光に変わるものが、超伝導量子干渉計では超伝導電子波であり、上の図 2 (a,b)のように超伝導接合を 2 個超伝導体で並列接続し、縦型超伝導量子干渉計を作製する。「超伝導電子波のホログラムは可能か？」をテーマに超伝導量子干渉計で超伝導電子波のホログラムを観測する。この干渉計の中央の穴に平行な外部磁界 H_x を加えると、図 2 (c)のように超伝導電流 I_c の磁界 H_x 依存の特性は、穴に鎖交する磁束量子の数に対応する周期により周期的に変調する。素子の接合面内で外部磁界 (H_x, H_y) ベクトルを 2 方向に走査すると、穴方向の H_x に垂直な外部磁界 H_y については素子の 1 個の変調と同じ周期になり、ゆっくり変調する。このようにして、図 2 (d)のように超伝導電流の $I_c - (H_x, H_y)$ 磁界特性上に縞模様が見れる。こうして得た $I_c - (H_x, H_y)$ 磁界特性上の縞模様はいわば「超伝導量子干渉計によるホログラム」であり、左右の接合の磁気特性の差異の情報を精密に有している。特に $I_c - (H_x, H_y)$ 磁界変調特性が図 2 (d)のように地図の等高線図的な詳しい情報を持ち、両方の接合についての磁氣的知見が得られるところが独創的である。このようにして「超伝導電子波のホログラム」が得られることを実験的に検証するのが本研究の目的である。

3. 研究の方法

ニオブウム金属を超伝導体としたトンネル型の超伝導接合を研究室では長年設計し製作してきた実績がある。この研究でニオブウム (Nb) 金属を使用して超伝導トンネル素子を製作する。超伝導体ニオブウム金属を超伝導体とするとき、最も組合せとして適切と考えられている酸化アルミニウムをバリアとして使用する。さらに酸化アルミニウム薄膜バリアの他に強磁性体薄膜バリアも検討し真空中の直流放電法での強磁性体薄膜の作製を試みた。

(1) これまで Nb/AlO_x/Nb 超伝導接合を直流スパッタリング法で作製し、零電圧で流せる接合電流の臨界値 I_c の 2 次元磁界変調 $I_c-(H_x, H_y)$ 特性を調べてきた。まず、現有のスパッタリング装置を使い、ニオブウムを超伝導電極、アルミニウムの酸化膜をバリアに持つ、Nb/AlO_x/Nb 接合から構成される SQUID 素子を作成する。

(2) このとき、現有のスパッタリング装置の酸化室に、本研究予算で購入したターボ分子ポンプを追加接続し、トンネルバリアの作成開始時点のバックグラウンド真空度を高真空にして、良質な酸化膜および急峻な電極/酸化膜[Nb/AlO_x]界面を得る。

(3) 液体ヘリウムにより Nb/AlO_x/Nb 超伝導接合 SQUID 素子を 4.2K まで冷却し、上下 Nb 電極が超伝導状態での超伝導トンネル電流の臨界値 I_c を計測し、外部磁界 (H_x, H_y) ベクトルを走査して $I_c-(H_x, H_y)$ 磁界特性を得る。

(4) 垂直磁界の大きさを徐々に増やすことで、磁束捕獲点を SQUID 中心にずらしていき、対応して $I_c-(H_x, H_y)$ 磁界特性上の分枝特異点が移動していく様子を実験的に確認すべく、 $I_c-(H_x, H_y)$ 磁界特性を詳しく測定する。このとき、磁束捕獲場所が徐々に変わるための垂直磁界の印加方法[増加ステップ幅、正負で加えるか、正方向のみで加えるかの違い]を検討する。垂直磁界特性は履歴現象を伴うことに留意する。

(5) 接合間隔 L が長いと SQUID 変調周期が短くなり、その分測定に時間が必要になる。接合間隔 L を変えた SQUID を数種類作製し、最適なパラメータを見出す。

(6) 現在 1600 点の電流電圧特性観察に約 40 分必要である。測定方法および測定プログラムを改良して、この測定時間短縮をおこなう。

(7) 磁気特性を調べたい未知の被測定右側接合のバリアと使用するため、Ni, Co, Fe, パーマロイの薄膜の堆積も試みる。

(8) 素子作製過程で膜に傷等が生じた場合にはその傷の場所に磁束捕獲が生じやすい。また、その場合に傷位置と、特異点位置の対応関係を実験的に調べる。SQUID の下部電極の端の方から磁束は侵入しやすい。実際に SQUID に垂直な磁界も外部から加えてホログラムの観測をおこなう。

4. 研究成果

(1) 素子作製のための真空装置の改良

超伝導素子としてニオブウム (Nb) を超伝導電極として、アルミニウム (Al) を純酸素中で酸化したアルミニウム酸化膜 (AlO_x) とする Nb/AlO_x/Nb トンネル型超伝導ジョセフソン素子と、縦型超伝導量子干渉計の作製のためのスパッタリング条件、酸化条件について検討した。特に、ニオブウムは酸素等の不純物ガスを取り込みやすいので、

スパッタリング装置をターボ分子ポンプおよびドライポンプのオイルフリー真空系で排気し、到達真空度の改良をおこなった。さらにイオンポンプとチタンサブリメーションポンプを有するスパッタリング装置による素子作製も試みた。

(2) 素子を構成するアルミニウム酸化膜のアルミニウムの厚さについての最適化

超伝導ジョセフソン素子の作製の最適化をおこなった。アルミニウムの厚さをパラメータにとって、Nb/Al-Oxide/Nb 超伝導接合を作製した。

アルミニウムの厚さを 5nm, 25nm, 50nm, 100nm, 200nm と変え、他のニオブウムの堆積を含む超伝導接合作製条件は同じにして、Nb/Al-Oxide/Nb 超伝導接合を作製した。このように作製した超伝導接合はいずれも超伝導電流が流れ、外部磁界に対してその臨界値 I_c が変調する dc ジョセフソン効果を示した。Nb/Al-Oxide/Nb 超伝導接合の接合面と平行に加える外部磁場を接合面内で 2 次元的に走査して、 $I_c - (H_x, H_y)$ 変調特性を詳しく調べた。その結果、5nm の場合が最もギャップ電圧の 2.4mV 以下の準粒子電流が少なく、25nm, 50nm, 100nm と膜厚が増えるに伴い、この 2.4mV 以下の準粒子電流の増加が観測されたが、変調特性はフラウンホーファーパターンの特性を示した。最も厚い 200nm のアルミニウム膜厚を有する素子は変調特性も特異で、2 次より高いピークが不明瞭で、外部磁界がない場合の超伝導電流も他の条件のものより減少した。5nm のアルミニウム膜厚が最適と判断された。

(3) 素子を構成する下部電極のニオブウム膜厚に対する素子の磁束捕獲特性の変化

次に素子を構成する下部電極のニオブウム膜厚を 100nm, 500nm, 1000nm と変えて素子を製作した。各々の素子について垂直に磁界を加えて、さらに接合面内で外部磁界を 2 次元走査して $I_c - (H_x, H_y)$ 変調特性を詳しく調べた。加える垂直磁界 H_z の大きさを増やしていくと、顕著に $I_c - (H_x, H_y)$ 変調特性が (H_x, H_y) 平面内でずれ始める閾値の H_z の大きさは、下部電極のニオブウム膜厚に依存することが分かった。測定結果から下部電極ニオブウム膜厚が 100nm では $H_z = 400$ A/m, 500nm では $H_z = 2000$ A/m, 1000nm では $H_z = 2700$ A/m から、 $I_c - (H_x, H_y)$ 変調特性がずれ始める特性となった。下部電極の膜厚が厚い方が磁束量子の侵入が起こりにくいという分かりやすい結果が得られた。

(4) 素子の位置による変調特性の変化

ニオブウム金属電極を広く堆積し、その同じ電極を下部の超伝導体電極とする Nb/Al-Oxide/Nb 超伝導接合を多数個作製した。下部電極の端の方から中央へと A 素子、B 素子、C 素子、D 素子と名付ける。どの素子も水平磁界の加えてない位置での臨界電流は、垂直磁界に対してフラウンホーファー的に振動して減少していった。その結果、超伝導電流が 10% に減少する時の垂直磁界の大きさは下部電極に対する素子の位置に依存し、下部電極端の A 素子で 30A/m, B 素子で 80A/m, C 素子で 150A/m, 中央よりの D 素子で 400A/m と、 $I_c - (H_x, H_y)$ 変調特性がシフトし始める垂直磁界 H_z の臨界値は増えていった。磁束量子が下部電極の端から侵入し中央へ向かって入り込んでいくと考える事により、この特性は説明される。

(5) 強磁性体のバリア

トンネルバリアとしては通常のアルミニウム酸化膜の他に強磁性体のバリアをスパッタリング法で堆積する方法も研究した。強磁性体のバリアとしては、鉄、ニッケル、コバルト、鉄とニッケルの合金であるパーマロイ合金 (80% と 50% パーマロイの両方) の堆積を試みた。特に薄膜中で磁化の強さ M と磁界の強さ H の比である透磁率の高い鉄、コバルト、パーマロイ合金で、試料台側にも永久磁石を置くことによる直

流電圧スパッタリング方式を開発し、通常の1 Pa前後の圧力で約300 Vの電圧によるDC放電堆積法を見つけた。

(6) SQUIDの干渉縞ホログラフィー

SQUID構造での $I_c - (H_x, H_y)$ 変調特性ホログラフィーを観測した。下部電極ニオブウム/アルミニウム酸化膜/上部部電極電極/ワイヤリング電極の構成で製作したSQUID構造において、バリア面と平行な磁界を2次元に走査し2次元磁界に対する超伝導電流の変調特性を得た。Nb/Al-Oxide/Nb超伝導接合を下部電極同士及び上のワイヤリング電極同士をニオブウム電極で並列接続して、縦型構造のSQUID素子を製作した。単一の素子のプロセスと同じく、上部電極までのNb/Al-Oxide/Nb超伝導接合を陽極酸化法で接合の位置決めをおこない、その上にワイヤリング電極を堆積しケミカルエッチング法でパターンニングする。こうして2接合を下側は下部電極で上側はワイヤリング電極で並列接続し、縦型構造のSQUID素子を得た。この縦構造のSQUIDも液体ヘリウム温度まで冷却し、バリア面内で外部磁界を2次元走査する事で縞状変調パターンを得ることができた。さらにこの素子に垂直に磁界を加えた場合に縞状変調パターンの枝が分かれることを確認する事ができた。このようにしてSQUID構造は「2次元磁界走査に対する超伝導電流変調特性」上に縞状の変調特性を有することを確認し、さらにその縞構造の分枝構造も測定した。

縞状変調パターンには接合自体の周期の大きな第一の変調パターンとSQUIDの変調パターンに加えて第3の変調パターンが重なった結果も得られた。素子を顕微鏡観察して、SQUID構造の横に追加して第3の短絡接合ができていて、この第3の接合が関与した変調が第3の変調パターンになっているという仮説を得た。さらにその位置から第3の変調パターン周期と向きを数値解析し、測定結果の周期と向きによく一致することを見出した。

2接合dc-SQUIDのシミュレーションもおこなった。コンピュータによる数値解析もおこない、この縞構造の分枝構造の位置とSQUID構造のトンネル素子の実空間での磁束量子の捕獲位置が対応することをシミュレーションでも確認した。この数値解析においては、下部電極側に磁束量子が捕獲されたとして、上下の超伝導体のオーダーパラメータの差を磁束量子の周りで2回転させて接合を下向きに流れる超伝導電流を計算した。このとき左接合には捕獲された磁束がなく、右接合のみ磁束量子を1個捕獲しているとして計算した。この捕獲された位置を少しずつずらしていくことで、縞の分枝点の位置もずれていくことが解析できた。

以上 成果報告書

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Kazuki Kobayashi, Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Norimichi Watanabe	4. 巻 579
2. 論文標題 Influence of the Al thickness of Nb/Al-AlOx/Nb Josephson junction on the magnetic field dependence of the Josephson current	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physica C: Superconductivity and its applications	6. 最初と最後の頁 1353754-1,6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physc.2020.1353754	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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 N. Watanabe, S. Abe and A. Nakayama
2. 発表標題 Measurement of Two-Dimensional Magnetic Field Dependence of Josephson Current through Nb/Al-AlOx/Nb Josephson Junction
3. 学会等名 13th Superconducting SFQ VLSI Workshop (Yokohama, 2020.1) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊 騎通, 阿部 晋, 中山 明芳
2. 発表標題 Nb/Al-AlOx/Nbジョセフソン接合を流れるジョセフソン電流の垂直磁界依存性
3. 学会等名 2019年日本表面真空学会学術講演会（つくば, 2019.10）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡邊 騎通, 名取 あす加, 阿部 晋, 中山 明芳
2. 発表標題 ジョセフソン電流の二次元磁界変調特性と垂直磁界依存性
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会（北海道, 2019.9）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林 一樹, 中山 明芳, 阿部 晋, 渡邊 騎通
2. 発表標題 Nb/Al-AlOx/Nbジョセフソン接合におけるAl層の膜厚がジョセフソン電流の磁界依存性に与える影響
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会 (北海道, 2019.9)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江花 昭哉シヨーン, 中山 明芳, 阿部 晋, 渡邊 騎通
2. 発表標題 Nb/Al-AlOx/Nbジョセフソン接合とdc-SQUIDを流れる超伝導電流の二次元磁界変調特性
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会ソサイエティ大会 (大阪, 2019.9)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 彦坂 卓哉, 中山 明芳, 阿部 晋, 渡邊 騎通
2. 発表標題 磁束トラップがNb超伝導トンネル接合に流れるジョセフソン電流に与える影響
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会ソサイエティ大会 (大阪, 2019.9)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Watanabe, A. Natori, C.-P. Chen and A. Nakayama
2. 発表標題 Perpendicular magnetic field dependence of the Josephson current
3. 学会等名 14th European Conference on Applied Superconductivity (Glasgow, 2019.9) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Watanabe, S. Atsumi, S. Abe and A. Nakayama
2. 発表標題 Two-dimensional magnetic field dependence of the dc-SQUID
3. 学会等名 14th European Conference on Applied Superconductivity (Glasgow, 2019.9) (国際学会)
4. 発表年 2019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	穴田 哲夫 (anada tetsuo) (20260987)	神奈川大学・付置研究所・名誉教授 (32702)	
研究 分担者	渡邊 騎通 (watanabe norimichi) (60533776)	神奈川大学・工学部・助教 (32702)	

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