

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420347

研究課題名(和文) マイクロ波等価回路による超伝導デバイスの高周波解析と実証

研究課題名(英文) High-frequency analysis of superconducting device by using microwave equivalent circuit

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) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：ニオブウム(Nb)超伝導薄膜とアルミニウム(Al)薄膜を使い、Nb/Al-oxide/Nb構造のジョセフソントンネル素子を製作した。このNb超伝導接合を通して、4.2Kのヘリウム温度では電流が流れても電圧は生じることではなく、この超伝導電流の臨界値は外部から加えた磁界により変調できる。この超伝導接合の電流電圧特性では、超伝導電流と有限電圧での共振電流ステップを観察できる。超伝導接合のトンネル酸化膜中で、外部磁界に垂直にマイクロ波が伝搬する。このマイクロ波の周波数は電圧値に比例する(50GHz---0.1mV)。この共振電流ステップを、マイクロ波平面回路モデルで説明することに成功した。

研究成果の概要(英文)：By using niobium (Nb) superconducting material and aluminum (Al) metal, we have fabricated Nb/Al-oxide/Nb Josephson tunnel junctions. Though Nb/Al-oxide/Nb superconducting junctions a current can flow without voltage drop at liquid helium temperature (4.2K), where the critical current value can be modulated by an external magnetic field. In the current-voltage characteristics of this superconducting junction, both the superconducting current and the resonant current steps at a finite voltage can be observed. The microwave would propagate perpendicular direction to an external magnetic field inside the junction tunnel-oxide region. The microwave frequency is proportional to the voltage value (50GHz---0.1mV). We can explain these phenomena using our new plain microwave circuit model.

研究分野：超伝導デバイス

キーワード：超伝導 トンネル素子 ジョセフソン接合 マイクロ波回路 磁界変調特性

1. 研究開始当初の背景

極めて薄い酸化膜を2枚の超伝導電極で挟んだサンドイッチ構造は、超伝導トンネル接合となる。超伝導トンネル接合は、外部磁界に極めて敏感であり、高感度な磁束計として使われている。電子波が片側の電極からこの極めて薄い酸化膜を染み入り、逆側の電極に到達でき、「トンネル効果」と呼ばれる現象が観測される。このトンネル効果により電流が流れても、両電極間に電圧が生じず、ある臨界値 I_c まで超伝導電流が流れることになる。この臨界値 I_c を越えると2枚の超伝導電極間には電圧が生じる。超伝導接合に外部から磁界を加えた場合、マイクロ波が接合内に励起され、接合の電流-電圧特性にはステップが見れる。超伝導接合をマイクロ波高周波領域まで深く理解し、応用するためには、この現象を説明するモデルが必要である。

2. 研究の目的

本研究では超伝導トンネル素子及び超伝導量子干渉計を製作し、液体ヘリウム温度(絶対温度 4.2K)で非線形の電気的特性(電流 I -電圧 V 特性)を測定する。有限電圧 V で、外部から磁界を加えたときには、この有限電圧 V に比例したマイクロ波(0.1mV→50GHz)の電磁波が磁界と垂直に励振され、 I - V 特性上に共振ステップとして観察される。マイクロ波平面回路モデルを作り、この現象を説明する。

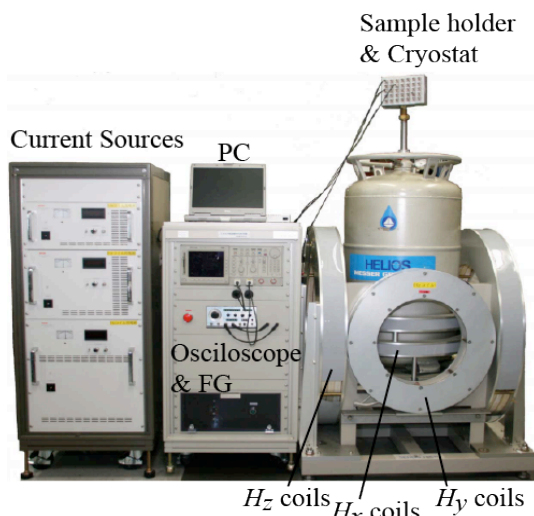


図1 超伝導接合の磁界測定装置

液体ヘリウム中の超伝導接合の長方形のそれぞれの辺に平行に H_x 、 H_y 成分を有する磁界 H を外部よりヘルムホルツコイルを使い加えることができる。加えることのできる H_x 磁界、 H_y 磁界の最大値は 3000A/m、 H_z 磁界の最大値は 8000A/m である。^①

3. 研究の方法

本研究で使う超伝導接合はサンドイッチ構造のトンネル接合である。素子製作のために、現有のマグネトロンスパッタリング装置を使った。ニオブウム堆積用チェンバー内でシリコン基板上にまず下部超伝導電極用ニ

オブウム薄膜を堆積する。その後、アルミニウム堆積用チェンバーに移動し、アルミニウム薄膜を堆積する。次に酸化室まで試料台を戻して、純酸素中30分間酸化して、アルミニウム薄膜の表面にトンネル酸化膜を形成する。その後上部ニオブウム薄膜を堆積して上部の超伝導電極として、サンドイッチ構造にする。接合形状は溶液中の陽極酸化法により厚い酸化膜を接合周囲に形成することで決定する。正方形接合、長方形接合等を製作した。

磁界特性測定装置を図1に示す。円形コイル[ヘルムホルツコイル]を3対使い、 H_x 、 H_y 、 H_z 方向の外部磁界を生成する。パーソナルコンピュータにより GPIB 制御された直流電源によりコイルに電流を流すと、その電流に比例して磁界が生じる。プログラムファイルであらかじめ設定したアルゴリズムにより、外部磁界を正確に生成し、デジタルオシロスコープで電流-電圧特性を計測することが可能となる。

4. 研究成果

(1) 長方形接合の特性

本研究では長方形形状の超伝導接合について詳しく調べた。図2は長方形接合の面内で種々の向きに磁界を加えた時の、接合内の接合電流の空間分布である。外部磁界の向きと垂直に、電流分布は空間変調する。図3は長方形接合でのジョセフソン接合電流の外部磁界変調特性である。正方形の場合と同様に、辺に平行な H_x 、 H_y 2方向にフラウンホーファーパターンとなり、図2から数値計算で得られた結果はこの実験結果をよく説明することができた。図4は有限電圧での接合のマイクロ波共振ステップの様子を示す。共振電圧 V_r をパラメータとして、図4で定義された共振ステップの高さの外部磁界依存性を示したのが図5であり、共振電圧 V_r は

(a) $V_r=0.16mV$ [80GHz](b) $V_r=0.20mV$ [100GHz]

(c) $V_r=0.24mV$ [120GHz](d) $V_r=0.28mV$ [140GHz]

である。[]内は各電圧に対応する共振マイクロ波電磁波の周波数を示す。測定したサンドイッチ構造の接合は、酸化膜を上下から超伝導体薄膜で挟んだ構造をしている。外部磁界を接合面に加えたとき、接合に加えた電圧(共振電圧 V_r)に比例するマイクロ波が励振されて、外部磁界と垂直な向きに接合内を伝搬する。伝搬したマイクロ波は接合端[接合の外周]で反射するので、サンドイッチ接合は一種の共振器として動作する。有限電圧での接合内マイクロ波共振の電圧が図5(c)に示す $V_r=0.24mV$ では、120GHzのマイクロ波が接合内で励振される。超伝導体の下電極は基準面として等価回路のアース側とし、図6に示すように、分布するL素子で電極の超伝導体を表し、上下の電極間に、ジョセフソン接合(図中x印)と浮遊容量Cの並列回路要素を入れ「平面回路型のマイクロ波領域の等価回路」を得た。この等価回路により、図(c)

の (α_1-2) 及び (β_1-4) で示すマイクロ波共振が説明できるようになった。

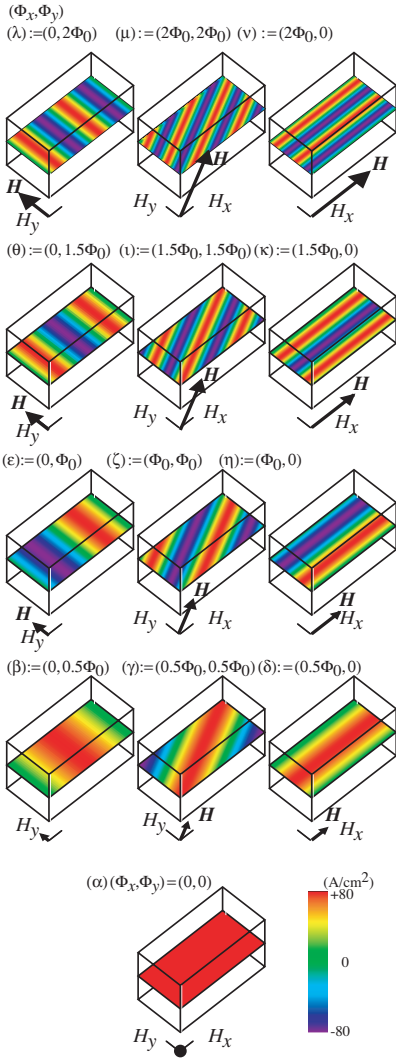


図2 長方形接合内のジョセフソン接合電流の分布^②

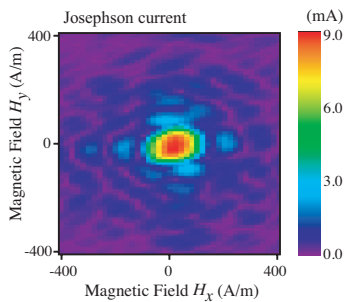


図3 長方形接合内のジョセフソン接合電流の分布^②

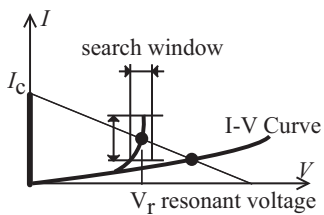


図4 接合の共振ステップ^②

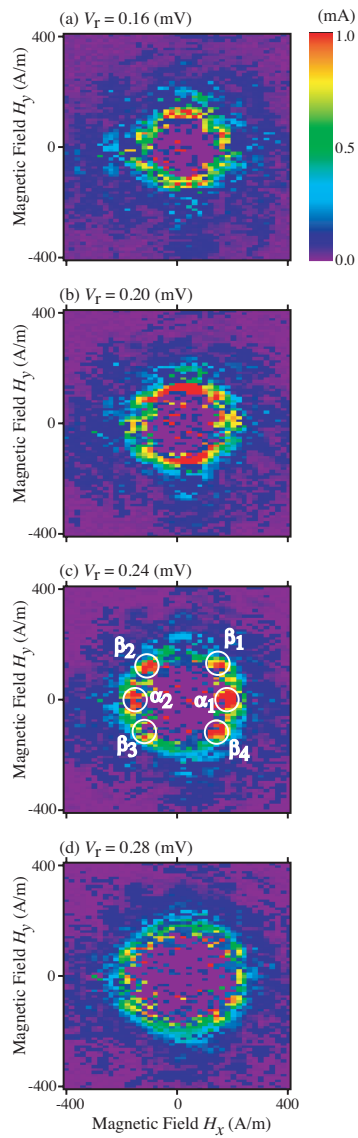


図5 有限電圧での接合内マイクロ波共振によるステップの外部磁界依存性^②

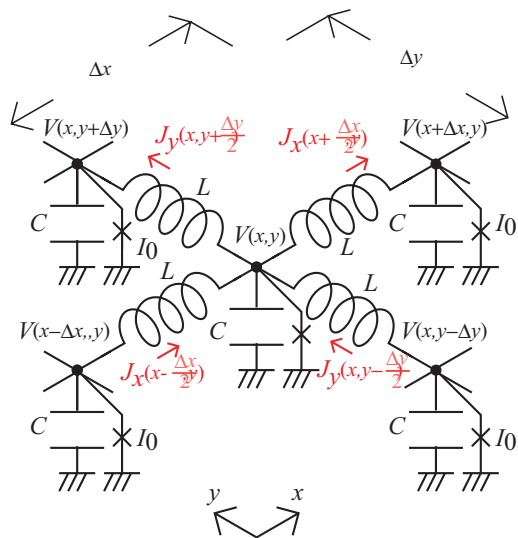


図6 分布するL,C及び超伝導接合I0要素からなる等価マイクロ波平面回路^②

(2)超伝導量子干渉計の特性

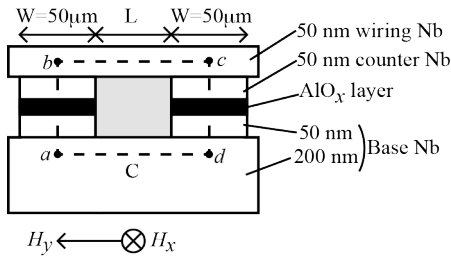


図 7 超伝導量子干渉計^①

超伝導接合が左右にあり、上側電極同士、下側電極同士を超伝導体でつなぐと、干渉計の構造となる。このようにして本研究で製作した超伝導量子干渉計を図 7 に示す。外部磁界の H_x, H_y 成分の向きは単一接合の場合と同じで、接合の辺に平行である。特に H_x 成分は干渉計のループ C と鎖交する磁束を決める成分となる。

図 8 に超伝導量子干渉計を流れる超伝導電流の磁界特性を示す。干渉計を構成する接合間の距離 L を変えており、図の (a1) (a2) は $L=50 \mu\text{m}$ 、(b1) (b2) は $L=150 \mu\text{m}$ 、(c1) (c2) は $L=250 \mu\text{m}$ の場合である。(a1)、(b1)、(c1) は I_c-H_x 特性を示しており、干渉計ループ C に垂直な H_x 磁界成分については高感度で、超伝導電流 I_c が変調される様子がわかる。 H_x 磁界が -800 から $+800 \text{ A/m}$ の範囲での変調周期の数は、接合間距離 L に対して一次関数的に増加する。

図 8 より外部磁界 H_y の変える範囲を拡大して測定した結果を示した図 9 では、 $-800 < H_x < 800 \text{ A/m}$ 、 $-800 < H_y < 800 \text{ A/m}$ の領域での円形接合 [図 9 左列]、超伝導量子干渉計 ($L=150 \mu\text{m}$) [図 9 中央列]、超伝導量子干渉計 ($L=250 \mu\text{m}$) [図 9 右列] の磁界特性を示す。図中 (a) は超伝導電流の特性、(b) より (e) は共振電圧を (b) $V_r=0.12 \text{ mV}$ より (e) 0.24 mV まで変えたときのマイクロ波共振ステップの磁界特性を示す。

次にこのマイクロ波共振ステップを説明する等価回路を考える。干渉計の左右の接合部領域では、「ジョセフソン電流」と「浮遊容量 C を充電する電流」および「電極内電流 J の発散」の 3 項の和は零であり、式で書くと $I_0 \sin \gamma + C \partial V / \partial t = -\text{div} J$ の形の電荷保存の式になる。干渉計中央の超伝導接続部領域では厚い酸化膜の両端であるためジョセフソン電流は流れず、浮遊容量 C を充電する電流も極めて小さく、電荷保存の式は $\text{div} J=0$ と簡単になる。モデルの垂直面内のループについてのファラデーの電磁誘導の法則の式は $L \partial V / \partial t = -\text{grad} V$ となる。ただし、これらの式に使われる、 div と grad は通常の 3 次元でなく、 x - y 面内で 2 次元で定義する。

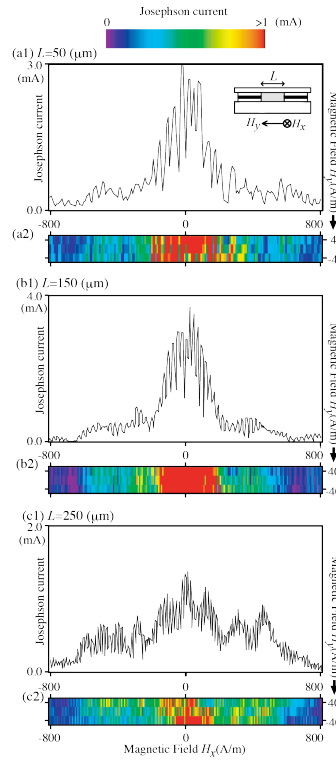


図 8 超伝導量子干渉計を流れる超伝導電流の磁界特性^①

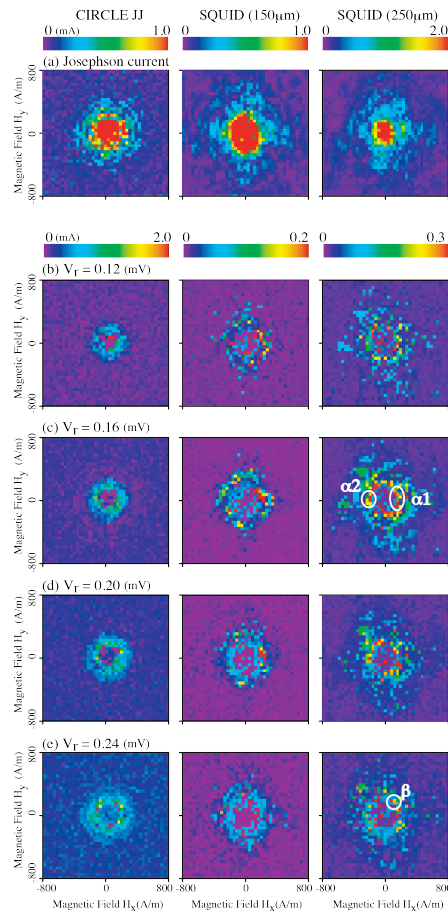


図 9 超伝導量子干渉計を流れる超伝導電流の磁界特性^①

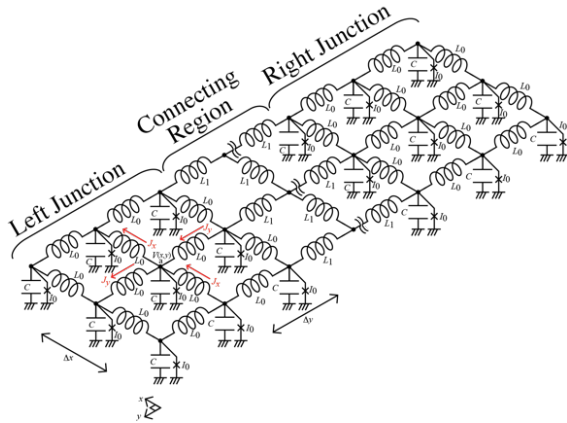
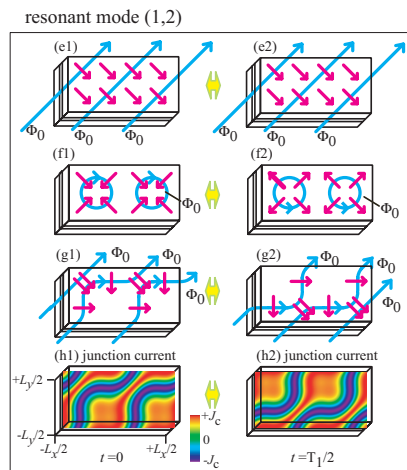
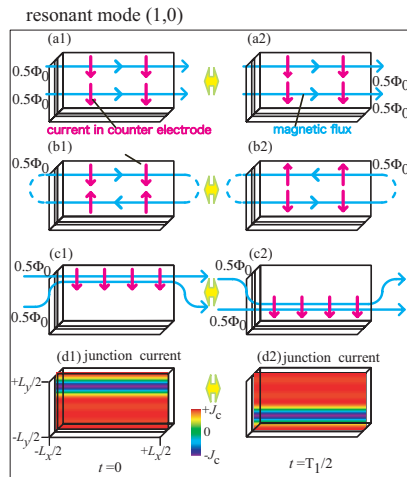


図10 超伝導量子干渉計のマイクロ波平面回路モデル^①

磁界特性の測定において H_x と H_y は +800 A/m から -800 A/m まで変えている。特に H_x 成分の値を減らす途中で、干渉計ループに鎖交する磁束 Φ が $\Phi = (N+1)\Phi_0$ から $\Phi = N\Phi_0$ へ減る過程では、多くの時間で左接合位相差 γ_L と右接合位相差 γ_R のそれぞれの時間平均した値は同期して増加する。図10のマイクロ波平面回路モデルを使い、マイクロ波共振モードを考える。図9(c)の $(\alpha 1)$ $(\alpha 2)$ で示されたところで、 $(n_x, n_y) = (1, 0)$ と $(-1, 0)$ の共振モードが観察される。ここで対 (n_x, n_y) の n_x と n_y はそれぞれ x と y 方向に各接合を鎖交する磁束量子の数を示す。図9(c)で $(\alpha 1)$ で示されるモード $(1, 0)$ のときの接合の磁束分布と接合電流分布を図11(a-d)に示す。左側(a1-d1)は $t=0$ のときで、右側(a2-d2)は $t=T_1/2$ [ただし T_1 は共振の周期] のときの分布である。上側電極の下表面の電極電流と下側電極の上表面の電極電流は同じ大きさで向きが反対であるので、上側電極の下表面の電極電流 J を説明する。図11では接合バリア領域を x 方向に磁界が貫いていて、共振がなければ電極電流 J_1 は一様で、上部電極の下表面を右方向 ($-y$ 方向) に流れ、反磁性電流として上部電極への磁界侵入を防いでいる。モード $(1, 0)$ 共振状態自体の定在波は、 y 方向に空間変化して各接合内に一波長分立つことになる。両接合の分布は同じなので、左接合側で説明すると、共振状態自体に対応する電極電流 J_2 は、 $t=0$ のとき各接合領域内向きに、 $t=T_1/2$ のときは外向きに流れる向きであるとする。 $t=0$ のときは、電流の和 $J = J_1 + J_2$ は接合の左半分領域 [$L_y/2 > y > 0$] では右向きに流れ、接合の右半分領域 [$L_y/2 > y > 0$] では J はほぼ零である。磁界分布は不均一であり磁束は接合の左半分に偏り磁束量子1個分貫いている。 $t=T_1/2$ のときは、電流の和 $J = J_1 + J_2$ は接合の右半分領域 [$L_y/2 > y > 0$] では右向きに流れ、接合の左半分領域 [$L_y/2 > y > 0$] では J はほぼ零である。 $t=T_1/2$ のときは、磁束は接合の右半分に磁束量



子1個分貫いている。

図11 超伝導量子干渉計のマイクロ波平面回路モデル^①

次に図5(c)で $(\beta 1-4)$ で示されるモード $(1, 1)$ のときの接合の磁束分布と接合電流分布を図11(e-h)に示す。左側(e1-h1)は $t=0$ のときで、右側(e2-h2)は $t=T_2/2$ [ただし T_2 は共振の周期] のときの分布である。外部磁界は図(e1-2)で斜め右上向きである。共振 $(1, 1)$ モード自体では、 $t=0$ のとき1磁束量子が各接合内で時計回りにあり、電極電流 J_2 は各接合の中心へと流れる。 $t=T_2/2$ のときは1磁束量子が反時計回りにあり、電極電流 J_2 は各接合で中心から外向きである。実際の磁束分布は、外部磁界と共振状態の磁界の和であり、図(g1-2)のように $t=0$ では磁束線は各接合で左上側に曲がり、 $t=T_2/2$ では磁束線は各接合で右下側に曲がる。接合電流も磁束分布と位相差分布から図(h1-2)のように求まる。この $(1, 1)$ 共振モードでも、正の向きに流れる電流の赤領域がそれと逆向きの青領域よりも各接合において広いので、全電流は正の向きになる。このように、マイクロ波の平面回路モデルを使うことで、共振モードが解析でき、素子特性の有限電圧での特性を説明できるようになった。

[引用文献] 引用文献①は発表 [雑誌論文] の④、引用文献②は発表 [雑誌論文] の②

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① A. Nakayama, S. Abe, W. Watanabe, “Deviation from Fraunhofer-type modulation of Josephson current through niobium tunnel junctions by applying vertical magnetic field”, IEEE Trans. on Appl. Supercon., 2016[査読有] (掲載決定済み)
 - ② A. Nakayama, S. Abe, Y. Nishi and N. Watanabe, “Two-dimensional magnetic field dependence of zero and finite voltage steps in current-voltage characteristics of superconducting quantum interference devices”, *Microelectron. Eng.* vol.146, pp.19-25, 1 Oct. 2015[査読有]
<http://doi:10.1016/j.mee.2015.02.019>
 - ③ N.Watanabe, S. Abe and A. Nakayama, “Modulation of a Josephson Current Through a Nb/Al-AlOx/Nb Josephson Junction by a Parallel Magnetic Field and a Perpendicular Magnetic Field”, J. Appl. Phys., vol. 116, No. 3, 033920-1-4, 21 July 2014[査読有]
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4890838>
 - ④ A. Nakayama, S. Abe, and N. Watanabe, “Two-dimensional magnetic field dependence of zero and finite voltage steps in current-voltage characteristics of rectangular shape niobium tunnel junctions”, *Microelectron. Eng.* vol.108, pp.163-168, Aug. 2013[査読有]
<http://doi:10.1016/j.mee.2013.01.056>
 - ⑤ A. Nakayama, S. Abe, N. Watanabe and Y. Okabe, “Anomalous modulation characteristics of DC Josephson current through niobium tunnel junction by applying external magnetic field 4000 A/m in perpendicular direction”, *Microelectron. Eng.*, vol.108, pp93-98, August 2013[査読有]
<http://doi:10.1016/j.mee.2013.02.091>
- [学会発表] (計 5 件)
- ① A. Nakayama, S. Abe, W. Watanabe, “Deviation from Fraunhofer-type modulation of Josephson current through niobium tunnel junctions by applying vertical magnetic field”, 12th European Conference on Applied Superconductivity, Lyon Congress Center, France, September 8th, 2015
 - ② A. Nakayama, S. Abe,

“Two-dimensional magnetic field modulation of current-voltage characteristics of various shape tunnel junctions and superconducting quantum interference devices”, 12th European Conference on Applied Superconductivity, Lyon Congress Center, France, September 7th, 2015

- ③ A. Nakayama, S. Abe, W. Watanabe, “Deviation from Fraunhofer-type modulation of Josephson current through niobium tunnel junctions by applying vertical magnetic field Hz more than 4000 A/m”, 9th International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured Materials (NANOSMAT), Nano-348, Trinity College Dublin, Republic of Ireland, September 9th, 2014
- ④ A. Nakayama, S. Abe, W. Watanabe, Y. Nishi, Y. Okabe, “Two-Dimensional Magnetic Field Dependence of Zero and Finite Voltage Steps in Current-Voltage Characteristics of Superconducting Quantum Interference Devices”, 9th International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured Materials (NANOSMAT), Nano-347, Trinity College Dublin, Republic of Ireland, September 9th, 2014
- ⑤ A. Nakayama, S. Abe, and N. Watanabe, “Two-Dimensional Magnetic Field Dependence of Josephson Current and Finite Voltage Steps in Current-Voltage Characteristics of Various Shape Niobium Tunnel Junctions and Superconducting Quantum Interference Devices”, 19th International Vacuum Congress, Congress Center, Paris, France, September 11th, 2013

[その他] ホームページ(神奈川大学大学院)
<http://www.gen.kanagawa-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

阿部 晋 (ABE Susumu)

神奈川大学・工学部・准教授

研究者番号：10333147

穴田 哲夫 (ANADA Tetsuo)

神奈川大学・工学部・教授(2016年4月

より名誉教授)

研究者番号：20260987