

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 8 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21560372

研究課題名（和文） バリア層に点磁性体を有する超伝導接合の評価と三端子素子応用に向けての基礎研究

研究課題名（英文） Evaluation of Superconducting Junctions with Magnetic Point and Fundamental Study for Three Terminal Devices

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

研究成果の概要（和文）：

ニオブウム薄膜およびニッケル薄膜を強力磁石を使ったマグネトロンスパッタリング法で堆積している。ニオブウム用およびニッケル用スパッタリング真空チェンバーを真空トンネルで接続し、試料を運ぶことにより、ニオブウム/バリア/ニッケル/ニオブウムのサンドイッチ構造が製作できるようになった。電圧降下のおこらない超伝導ジョセフソン電流と、有限電圧での共振電流ステップを観察し、正方形接合の各辺に平行な H_x, H_y 磁界の2次元面に対するそれらの依存性を測定した。

研究成果の概要（英文）：

We are able to deposit the nickel thin films by magnetron sputtering in high vacuum system. The niobium/oxide-barrier/nickel/niobium sandwich structure was obtained by connecting the sputtering chambers using vacuum tunnel in which samples can be carried from one chamber to another without breaking the vacuum. We also measured the Josephson current and finite voltage steps of the superconducting junctions and evaluated the two-dimensional magnetic field dependence of these steps.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,900,000	1,170,000	5,070,000

研究分野：電気電子工学

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：超伝導、磁性体、三端子素子、磁界制御、点状磁性体、異種接合、超伝導電流ヒステリシス特性

1. 研究開始当初の背景

超伝導素子は、低消費電力、高速性、および磁界に対する高感度な特徴を持つ。私たちの研究グループでは、超伝導材料としてニオブウムに注目し、下の図1に示すよ

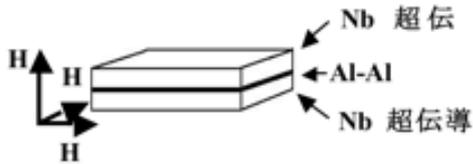


図1 ジョセフソン電流と外部磁界の関係。 H_x, H_y 磁界を接合面に平行に、 H_z 磁界を接合面に垂直に印加。

うな Nb/Al-AlO_x/Nb 構造のジョセフソン接合を研究してきた。この超伝導接合の二次元磁界変調特性は、後で詳しく述べるように簡単なモデルでの計算で、接合の辺に平行な H_x および H_y 磁界に対してそれぞれ $(\sin H_x)/H_x$ 及び $(\sin H_y)/H_y$ のフラウンホーファータン依存性を示し、図2(a)のような依存性となる。実際の測定においては、主に磁束トラップによると思われる原因で、超伝導接合の二次元磁界変調特性は、理想的な依存性とは異なる特性をしばしば観測

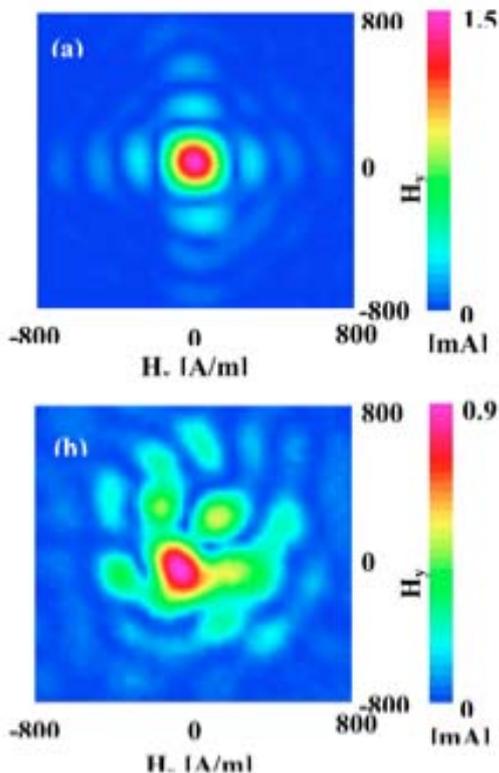


図2 磁束トラップによるジョセフソン電流の二次元磁界変調特性の変化。(a)は、 $H_x=H_y=0$ のとき $I_c=1.4$ mA (b)は、 $H_x=H_y=0$ のとき $I_c=0.4$ mA

している。すなわち、この図2(a)は、超伝

導薄膜に磁束がトラップされていないときの超伝導接合の二次元磁界変調特性であるといえる。図2(b)は、外部磁界を印加していない状態で、磁束トラップにより超伝導電流が減少してしまっているときに測定した超伝導接合の二次元磁界変調特性である。超伝導薄膜に磁束がトラップされているときは、接合の辺に平行な H_x と H_y の二方向へのフラウンホーファータン依存性が観測されず、これらのフラウンホーファータンがくずれてしまい、メインピークも (H_x, H_y) 平面の原点からシフトしてしまっている。このように、超伝導体に磁束がトラップされてしまうと、超伝導デバイスの磁界特性は履歴を持ち大きく変わる可能性がある。

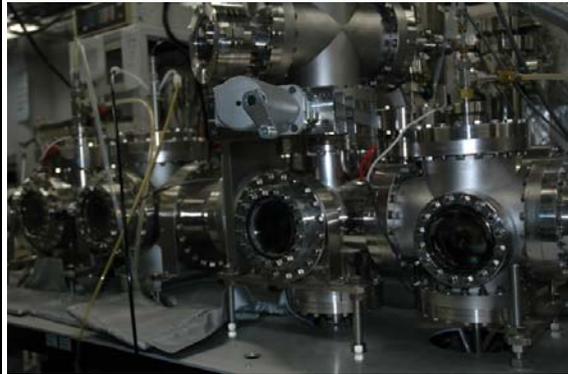


図3 スパッタリング装置 (第1世代)

2. 研究の目的

本研究では、強力マグネットを10数個使用して磁界をスパッタリングターゲットに印加し、数 Pa のアルゴン雰囲気中で300V 前後の負電圧を加えプラズマ放電を生じさせる。ニオブウム、アルミニウムおよびニッケルのスパッタリングターゲットを有するチャンバーを真空トンネルで接続し、Nb/バリア/Nb 構造を作製する。私たちの研究グループではこれまで、Nb/Al-AlO_x/Nb 構造のジョセフソン接合の接合面に平行に二方向から外部磁界 (H_x, H_y) を印加してジョセフソン電流の変調を行い、ジョセフソン電流の二次元磁界変調特性を測定してきた。この2端子 Nb/Al-AlO_x/Nb ジョセフソン素子に追加して、制御用第三電極として島状のニッケル (Ni) 磁性体膜をバリア上に持つ超伝導ジョセフソン接合を作製し、Ni 磁性体の履歴特性を活用し、その3端子トランジスタ特性を得ることを目的とする。

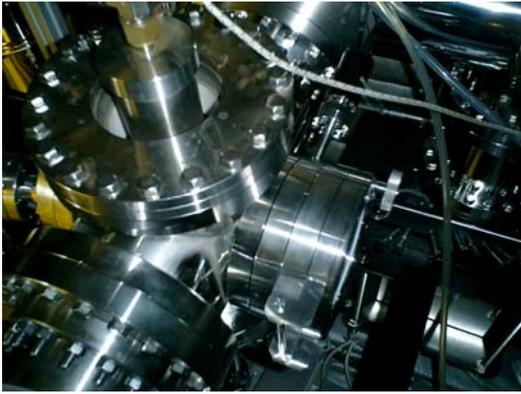


図4 磁性体薄膜スパッタリング室



図5 磁性体薄膜スパッタリング室全景

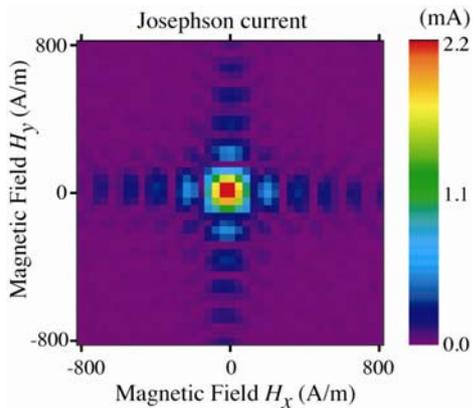


図6. I_c - H_x - H_y 特性 (測定結果)

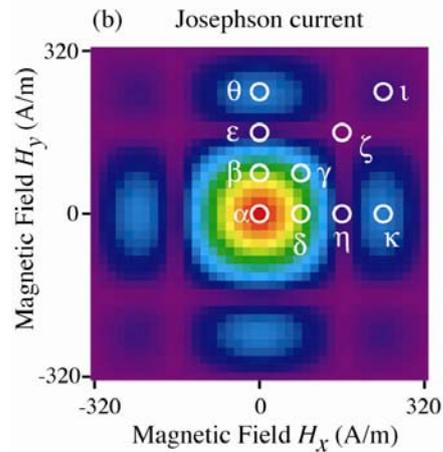
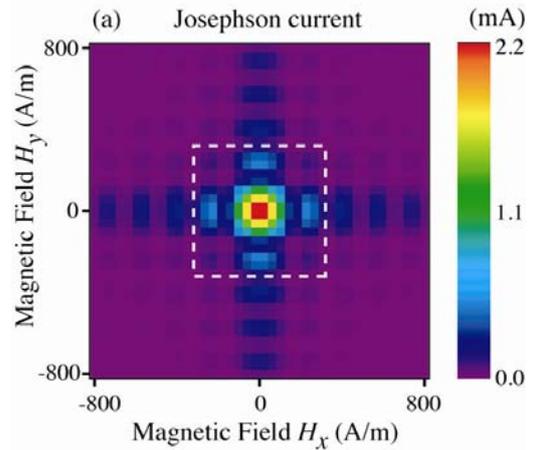


図7. I_c - H_x - H_y 特性 (数値解析)

3. 研究の方法

素子の製作は、マグネトロンスパッタリング装置によりおこなった。図3~5にそのマグネトロンスパッタリング装置を示す。試料の出し入れは、ロードロック室を使用し、スパッタリング用チェンバーは大気に晒すことなく試料交換が可能である。第2世代の装置では、スパッタリング用チェン

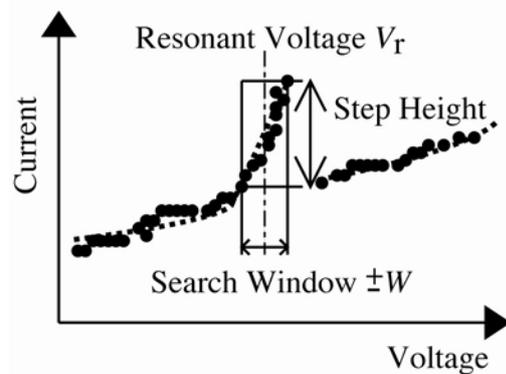


図8 電流電圧特性より I_{step} を求める方法

バー間の移動も真空トンネルを通しておこなった。

4. 研究成果

磁性薄膜の再現性のよい堆積のためには、バックグラウンド真空度を良くする必要がある。ベーキングのできない粗挽きドライポンプ、ターボ分子ポンプ下側（補助ポンプ接続側）半分を除き、装置全体が 150 度までペークできるようにベーキングジャケットで覆った。通常はスパッタリング用膜厚計の水晶振動子の耐ベーキング温度が 105 度のため通常 100 度で数時間ベーキングする。ベーキング後、ドライポンプ、ターボ分子ポンプおよびイオンポンプにより排気し、 10^{-6} Pa の良いところに装置内真空度は到達する。

スパッタリングガンは、電気的な絶縁にセラミックを使い、リークなしで、ターゲットを水冷しつつ 300V の電圧を印加することが可能な構造である。スパッタリング用チャンバーに純アルゴンガスを約 1Pa 導入後、300V の負電圧をターゲットに印加することにより、直流放電が開始する。ニッケルの 90mm のターゲットを使用し、1nm/s の堆積速度でのニッケル薄膜のスパッタリングが可能となった。超伝導ニオブウム電極用薄膜作成も同様なプロセスでおこない、やはり、1nm/s の堆積レートが得られる。スパッタリングでアルミニウムの薄膜を数 nm 堆積後純酸素もしくは純空気雰囲気中で酸化してアルミニウム酸化膜を得る。

□Nb/barrier/Nb 素子の特性は GPIB システムで自動的に電流電圧特性を取り込んで測定した。2 対のヘルムホルツコイルを使用し、正方形素子の辺に平行に x,y 方向に磁界を印加し、超伝導電流及び有限電圧ステップの磁界特性を測定した。さらに 3 対目のヘルムホルツコイルを使用し、素子に垂直方向の磁界を加えた。

ニッケルをバリア領域に有する良質なトンネル接合を得るには至らなかった。そのため、アルミニウム酸化膜をバリアとする超伝導トンネル接合について詳しく測定し解析した。

アルミニウム酸化膜のみの超伝導トンネル接合の液体ヘリウム温度での電流-電圧特性の測定から零電圧でのジョセフソン電流 I_c と、有限電圧での共振ステップ I_{step} の磁界依存性を調べた。磁界は、接合面内で 2 次元に走査し、 I_c - H_x - H_y 特性および I_{step} - H_x - H_y 特性を得た。

接合の超伝導の両電極間の「ゲージ不変な位相差」には電磁場のベクトルポテンシャルを含む項があるため、この「ゲージ不変な位相差」は加える外部磁界に対して垂

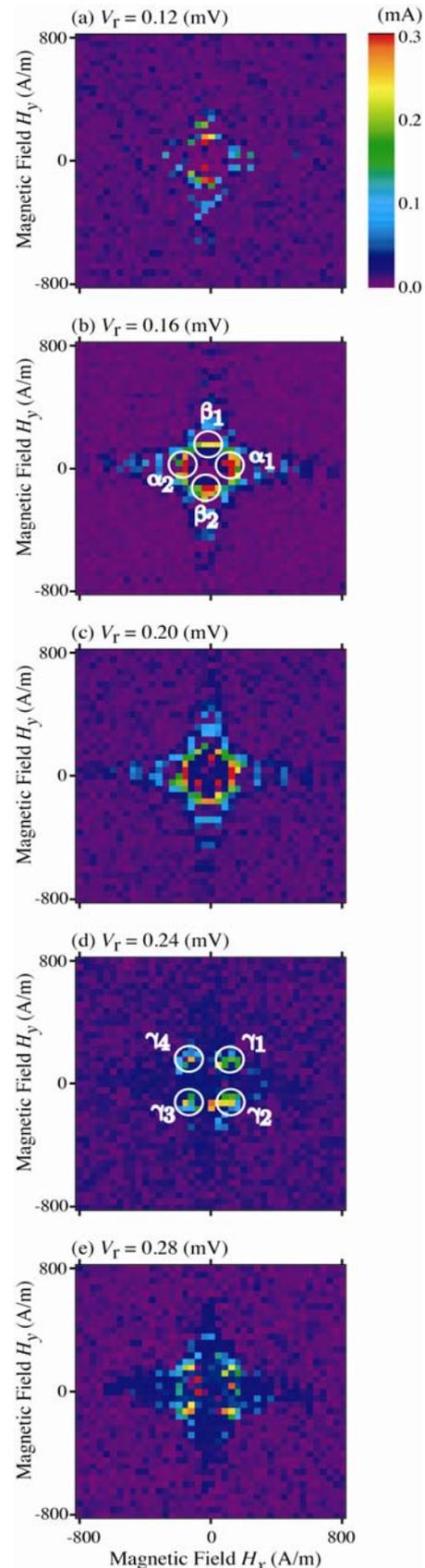


図 9 電圧電流より求めた I_{step} の磁界依存性

直方向に空間変調する。面内で外部磁界に垂直方向に空間変調し、その空間波長は印加磁界の大きさに反比例する。ジョセフソン接合の両端の位相差の \sin 関数で超伝導電流密度は決まる。よって接合全体についてこの超伝導電流の和を考えることにより、超伝導電流の 2 次元磁界特性を得る。

そうして得た数値シミュレーション結果は正方形接合で一様バリアの場合、この正方形の各々の辺に平行な向きのフラウンホーファーパターンの積となることが予想され、測定された $I_c \cdot H_x \cdot H_y$ 特性もこの特性で説明することに成功した。(図 6,7)

有限電圧では、両電極間の「ゲージ不変な位相差」は時間的に変化し、この時間変化率は加える電圧に比例する。(図 8,9,10) このモデルにより、 $I_{step} \cdot H_x \cdot H_y$ 特性を説明することができた。

接合に垂直に外部磁界を加えたときの履歴をもつ $I_c \cdot H_z$ 特性も詳しく計測した。特に、この接合面に垂直な磁界の大きさを正弦波的に変えることにより、一度トラップ等で小さくなった超伝導電流を復活させることに成功した。

こうして、ニッケル薄膜をバリアとするトンネル特性を得るには至らなかったが、今後の課題としては、数 nm の厚さのニッケルを含む磁性薄膜の M-H 磁化特性等の基本特性を調べ、ニッケルをバリアとする酸化膜作成条件をさらに詳しく調べていく。熱酸化のみでなくプラズマ放電酸化も試み、トンネル特性を有する素子を得る。そのうち、このニッケル薄膜をストリップライン状に加工し、第 3 番目の制御電極としてトランジスタ動作をめざして素子製作をおこなっていく予定である。

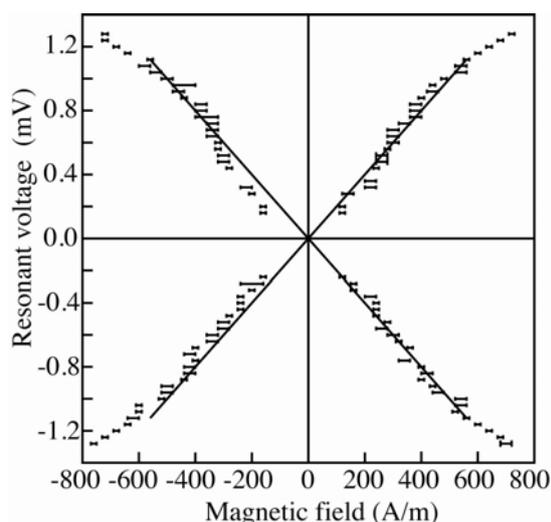


図 10. I_{step} の現れる電圧の磁界依存性

図 6~図 10 は Nakayama, Abe, Watanabe, Journal of Applied Physics, Vol111, p113907-1-6 より引用した。

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 6 件)

① Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Norimichi Watanabe, “Two-dimensional magnetic field dependence of Josephson current and resonant current steps at finite voltage of square shape superconducting tunnel junctions” (査読有) (掲載決定) Journal of Applied Physics 2012

② Akiyoshi NAKAYAMA, Susumu ABE, Norimichi WATANABE, Yoichi OKABE, “Modulation Characteristics of DC Josephson Current through Niobium Tunnel Junction by Applying External Magnetic Field in Perpendicular Direction,” Journal of Nanoscience and Nanotechnology, (査読有) . Vol.12, 1-4 2012

③ Akiyoshi NAKAYAMA, Susumu ABE, Norimichi WATANABE, Yoichi OKABE “Magnetic Field Measurement near a Superconducting Film Using a 2-Dimensional Field-Dependence of Josephson Current through a Nb Tunnel Junction Sensor,” Journal of Nanoscience and Nanotechnology, (査読有) Vol.12, 1-5, 2012

④ Norimichi Watanabe, Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe and Koji Masuda “Measurement of perpendicular magnetic field dependence of the Josephson current by a three-dimensional scan of the external magnetic field” Journal of Physics conference series (査読有) Vol. 234, April 2010

⑤ Akiyoshi Nakayama, Yohei Nishi, Norimichi Watanabe, Susumu Abe and Yoichi Okabe “Measurement of trapped flux magnetic field near the superconducting film by the dependence of superconducting current through a Josephson junction sensor” Journal of Physics conference series (査読有) Vol. 234, April 2010

⑥ Norimichi Watanabe, Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Mitsunori Suda, Yohei Nishi, Koji Masuda, Chisato Sugaya “Perpendicular applied magnetic

field dependence of Josephson current and measurement of trapped magnetic flux in Nb superconducting thin film by vibrating sample magnetometer” Journal of Applied Physics. (査読有) 105, 07E312 (2009)

[学会発表] (計 8 件)

① Norimichi Watanabe, Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe and Koji Masuda “Measurement of perpendicular magnetic field dependence of the Josephson current by a three-dimensional scan of the external magnetic field” NANOSMAT-5, Reims International conference center, 2010-Oct-19, Reims, France.

② Akiyoshi NAKAYAMA, Susumu ABE, Norimichi WATANABE, Yoichi OKABE “Measurement of Magnetic Field near the Superconducting Film Using 2-Dimensional Magnetic Field Dependence of Josephson Current through Niobium Tunnel Junction Sensor” NANOSMAT-5 Reims International conference center, 2010-Oct-21 Reims, France

③ 中山、阿部、西、渡邊、岡部 “超伝導薄膜近くのジョセフソン接合を流れる超伝導電流の2次元磁界特性” 電子情報通信学会全国大会,大阪府立大 大阪, Sep-14、2010

④ 中山明芳、阿部晋、○渡邊騎通 “超伝導接合を流れるジョセフソン電流の外部磁界2次元走査による変調特性” SEC超電導研究会、機械振興会館、7-21、2009

⑤ 渡邊、中山、阿部、須田、西、増田、菅谷 “超伝導接合の三次元磁界変調特性とジョセフソン電流の垂直磁界依存性” 電子通信学会総合大会、松山大学、松山 3-20、2009

⑥ Akiyoshi Nakayama, Norimichi Watanabe, Susumu Abe, Yohei Nishi, Koji Masuda. “Modulation of Josephson Current through Nb Junctions by Three-dimensional Scan of External Magnetic Field” International Superconductive Electronics Conference TD-P12,九州記念堂、Fukuoka Japan Jun-17、2009

⑦ Akiyoshi Nakayama, Norimichi Watanabe, Yohei Nishi, Susumu Abe, Yoichi Okabe “Measurement of trapped flux magnetic field near superconducting film by two-dimensional magnetic field dependence of superconducting current through Josephson junction sensor” 9th European Conference on Applied Superconductivity(EUCAS) Dresden

Institute of Technology, HSZ-304 Sep-14、2009 Dresden,Germany

⑧ Norimichi Watanabe, Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Koji Masuda “Measurement of perpendicular field dependence of Josephson current by three-dimensional scan of external magnetic field” 9th European Conference on Applied Superconductivity(EUCAS) Dresden Institute of Technology,p-163 Sep-15、2009 Dresden,Germany

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.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

(3) 連携研究者:なし