

令和元年6月5日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K04877

研究課題名(和文)1次元超伝導-絶縁体転移と自己双対量子デバイスの研究

研究課題名(英文) New devices based on duality picture of superconductor-insulator transitions on Superconducting nanowire

研究代表者

篠崎 文重 (Shinozaki, Bunju)

九州大学・理学研究院・名誉教授

研究者番号：80117126

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：量子細線デバイスの実現を目指し、NbN、NbTiNおよびMoReNの準一次元および二次元試料で、超伝導-絶縁体転移を明らかにするため、直流四端子法で電気輸送特性を調べ、以下の結果を得た。1) NbTiNナノワイヤーで、 $T < T_c$ でのR(T)特性を熱活性化位相スリップ理論と量子位相スリップ理論を用いて解析した。Tcの細線抵抗依存性データの解析から、超伝導-絶縁体転移は量子化磁束-電荷双対性理論で説明できた。2) Si₃C基板上のNbNナノワイヤーでは、外部磁場は量子位相スリップ効果のみを強く抑制することがわかった。この結果は「巨大負の磁気抵抗、即ち磁場誘起の超伝導」を意味する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、量子コンピューターへの応用や物理定数の高精度決定等の基礎科学への展開等の見地から、超伝導量子回路の実用化が期待視され、回路高集積化や応用範囲を広げる量子細線素子の研究がおこなわれている。しかし、量子細線では酸化による劣化や酸素由来の磁性がない、高インピーダンスな特性も必要となるため既存の材料では実現が難しい。そこで窒化物を使ったアモルファス膜による新しい材料を開発し、窒化物を用いた超伝導細線で実験・解析を行い、細線が電子回路実用化への基礎理論を満足する結果を得た。一方、その過程で、これまでに観測・報告例のない巨大磁気抵抗を示す細線を可能にした。新しい素子の可能性を示している。

研究成果の概要(英文)：Aiming at the realization of quantum wire devices, in order to clarify the superconducting-insulator transition in quasi-one-dimensional and two-dimensional samples of NbN, NbTiN and MoReN, the electrical transport characteristics were investigated by the DC four-terminal method. The following results were obtained. 1) With NbTiN nanowires, the R(T) characteristics at the temperatures $T < T_c$ were analyzed using thermally activated phase slip and quantum phase slip theories. From the analysis of thin-wire R dependence of Tc, the superconducting-insulator transition can be explained by the quantized flux-charge duality theory. 2) For NbN nanowires on Si₃C substrate, it was found that the external magnetic field strongly suppressed only the quantum phase slip effect. This result means that the magnetic field induces superconductivity because of the negative magnetoresistance.

研究分野：低温物理学

キーワード：超伝導細線 位相すべり 超伝導絶縁体転移 異常磁気抵抗

1. 研究開始当初の背景

超伝導試料を特性長・coherence Length ξ 程度のナノサイズまで小さくすると、伝導現象に特異的な量子効果が表れる。2次元(2D)超伝導体の転移温度 T_c 以上では、熱揺らぎ効果によってクーパー対が生成され、波動関数を記述するオーダーパラメーター ϕ の大きさ(数密度)で決まる電気抵抗の減少が観測される。一方、 ϕ の位相も顕著な効果を生む。1次元(1D)とみなせる超伝導ナノワイヤ(SNW)では試料中で位相すべり・Phase slip(PS)が起きる。1970年代、 $T \leq T_c$ でも抵抗が観測され、Thermal Activation Phase Slip (TAPS)が引き起こす電圧として理解された。充分低温では、Quantum phase slip(QPS)がTAPS効果を上回り、抵抗の原因になる。更に近年、Coherent Quantum phase slip(CQPS)がJosephson effectと双対の関係にあり、Josephson Junction(JJ)を通過するクーパー対電流が「位相差に関係」するのに対して、CQPSで生じる電圧は「SNWを横切る渦糸の運動と関係」し、細線に沿っての「量子化された電流」と結びついていることが理論的に指摘され、超伝導量子ビットや量子電流標準等の様々な応用が提案されている。

2. 研究の目的

(1) QPSに誘起されるSNW—超伝導(S)—絶縁体(I)転移(SIT)はどのような物理量に支配されているか。 ϕ の量子揺らぎが散逸によって抑制されることが理論的に指摘されているが、本研究ではこの予想を実験的に明らかにする。又、2D系の乱雑さは面抵抗 R_{\square} で記述でき、量子面抵抗 $R_q = h/4e^2$ でSITを起こすというボゾン描像モデル、及びこれを支持する実験がある。一方、1D系には明確な指針はない。SITを支配する物理量を実験的に明らかにする。又、絶縁体側でもクーパー対が存在し、超伝導電流がCQPSによる抑制(超伝導電流のブロックード現象)を受けることが予想されているが、明確な実験的報告例はない。合わせて明らかにする。

(2) JJとSNW間の自己双対的关系を調べ、理論との比較を行う。

(3) (4)に示す最終目標を達成するために、均一で高抵抗のSNWを作成し、1D-SIT近傍膜の輸送特性を明らかにする。

(4)量子電流標準と超伝導量子ビットへの応用を目指す。

3. 研究の方法

(1)「均一、均質な乱雑さ」を有するSNW試料の作成と構造及び組成評価

高品質膜を得るためにまずDCスパッタ法により2D窒化化合物(NbN, NbTiN, MoC, MoReN)試料を成膜した。2D系では不純物や不均質に起因する本質的ではないブロードな超伝導転移を示すことが知られている。SNW系ではなおさらである。信頼できるSNW超伝導特性を示すエピタキシャル超薄膜作成のために、ミスマッチの少ない基板選択、成膜速度、基板温度等を膜の結晶構造・組成分析評価を通して、最適値を探し成膜した。細線化は電子線描画、反応性イオンエッチングで実現した。蒸着中の条件は全圧=0.27 Pa, 電流=1Aである。図-1は4端子を有するNbTiNの典型的SNWのSEM画像を示す。+、-は電流ターミナルである。物質によるが細線膜厚 d , 2

$nm < d < 30 \text{ nm}$, 細線幅 w , $10 \text{ nm} < w < 100 \text{ nm}$, 電圧端子間距離 L , $250 \text{ nm} < L < 1000 \text{ nm}$ を準備した。

(2) 輸送特性の評価

Oxford社製PPMSを用い、室温で広範囲の抵抗を有する多数のSNW, 及び2D試料で電気抵抗の温度、磁場依存性を $2.0 \text{ K} < T < 300 \text{ K}$, $-7 \text{ T} < H < 7 \text{ T}$ の範囲で精密に測定し、解析を行った。研究成

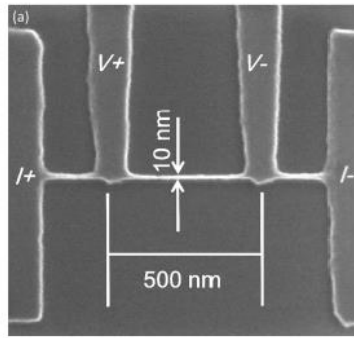


図-1

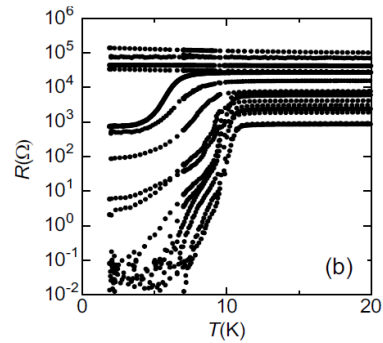


図-2

果の詳細を示す前にNbTiN SNW 系の R - T 特性を図-2に示す。 $T=20 \text{ K}$ で2.5桁に及ぶ抵抗値の変化は上述パラメーター w , L で制御した。抵抗増加に伴い、徐々に超伝導転移はPSの発生によってブロードさを増す。充分低温でも残る有限な抵抗はQPSに起因する。 $R^N(20\text{K}) \sim 2 \times 10^4 \Omega$ 程度で超伝導転移は消失し、SITが観測された。

4. 研究成果

(1) NiTiN-SIT の双対性理論による解析

図-3は図-2に示したSNWシリーズのS-I相図を示す。縦軸は ξ で規格化された $L/\xi (= \lambda)$ 、横軸は同様に規格化された抵抗 $r_\xi = (R^N/RQ)/(L/\xi)$ である。図中の線が「量子化磁束一電荷」の双対性理論で、妥当なパラメーターを使い計算したものである。■, ▲はそれぞれ絶縁体、超伝導特性を示したSNWで、両者は理論線で明確に分けることができる。この結果は我々が目指す研究を遂行する上で、重要な結果であり、Nano Letter 等の雑誌に広く引用された。

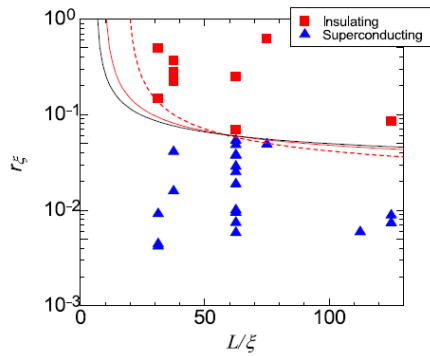


図-3

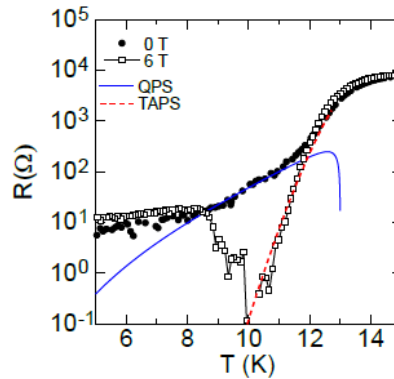


図-4

(2) SNW の QPS 磁場抑制に伴う負の磁気抵抗

従来の蒸着基板 MgO をより格子ミスマッチの少ない Si3C 基板に替え、膜作成・特性測定・解析を行った。NbN の典型例を図-4 に示す。 $H=0, H=6T$ 下の $R(T)$ 特性比較である。MgO 基板試料では磁場下データは $H=0$ データにほぼ平行に移動した特性を示し、 T_c 直下を除き、QPS の寄与でブロード特性を示す。しかしこの試料は (赤線) で示すように TAPS 特性に沿って急激な抵抗減少をもたらす。即ち QPS 抵抗が消滅し、TAPT のみで表現できる、「巨大負の磁気抵抗」を示した。この振る舞いは低温国際学会、超伝導国際シンポジウムで大きな関心を集めた。しかし、詳しい機構解明には至っていない。

(3) 超伝導島構造を導入した NbTiN-SNW の I-V 特性と異常磁気抵抗

図-5 に細線途中にマクロな(100x100nm²)島状構造を持つ SNW の SEM 像を示す。目的は、側面でのアンドレーエフ反射、及び島の量子化磁束トラップ、リリースの伝導特性への影響を調べる事である。図-6 に超伝導島数 S=1 の $T=2K$ における I-V 特性を示す。I-V 特性の跳び数

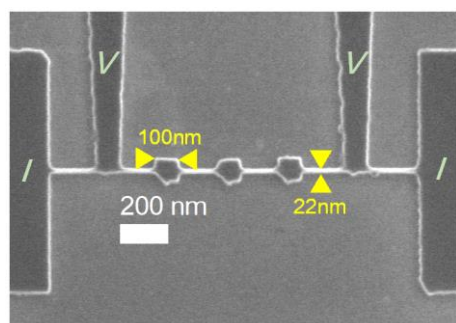


図-5(島数 S=3)

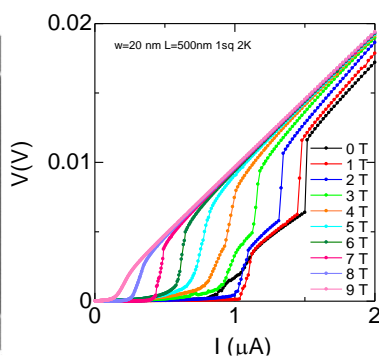


図-6(島数 S=1)

=2、その間になだらかな領域が見える。この数は島数 S に応じて変化する。この振る舞いは島間アンドレーエフ反射が示唆し QPS junction への発展を期待している。図-7 は S=2-SNW の磁気抵抗である。ここで $\Delta R = R(H) - R(0)$ である。縦軸の値、即ち、 $\Delta R/R(0) < 0$ は $H=2-3T$ 以下に限るが、磁場誘起超伝導現象を意味する。更にこの島数 S=2 の場合、 ΔR は印加磁場に対して、非対称性を示す。詳しくは示さないがこの対称性は島数 S の偶奇によって決まり、量子化磁束の運動の複雑さを顕著に示している。

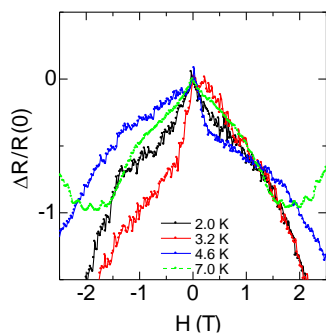


図-7(島数 S=1)

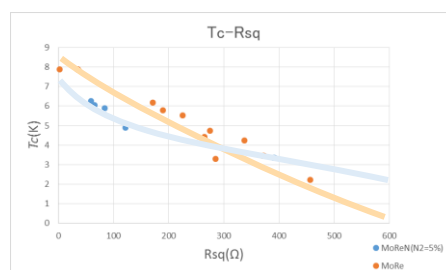


図-8

(4) MoReN 薄膜作成と輸送特性評価

超伝導量子コンピュータの概念に必要な位相すべりデバイスには安定な超伝導体の超薄膜化が要求され、又十分な感度を得るには「SITを示す臨界面抵抗 R_C が量子面抵抗 $R_Q = h/4e^2 \sim 6.4K\Omega$ に近い大きな値を持つことが必要」とされている。しかし、NbN, MoC系の R_C 値はほぼ $\sim 2K\Omega$ 近傍で、最終目的膜に届かない。そこで、充分薄い膜でも酸化の影響を受けず安定な特性が期待できる MoReN 薄膜作成を手掛けた。 T_c の面抵抗依存性を図-8 に示す。MoRe(●)と MoReN(N₂=8%, ●)で、窒化膜のバルク T_c 値はやや低下するが、 T_c の R_{\square} 依存性はなだらかな減少傾向を示し、この系では N₂ に依る乱れ導入が有効で、高臨界面抵抗値が期待できる。今後の研究進展に繋がる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (他計 9 件、全て査読あり)

① K. Makise, Y. Mizokami, T. Nogami, G. Sawada, T. Asano, B. Shinozaki, F. Ichikawa, Estimations of superconducting fluctuation effects in amorphous MoRu and MoRe alloy thin films, Material research Express, 5 (2018) 096406. doi: 10.1088/2053-1591/aad65c

② Makise K., Shinozaki B., Ichikawa F, Superconductor-insulator transitions in sputtered amorphous MoRu and MoRuN thin films IOP Conf. Series J. of Phys.: con. Series 969 (2018) 012026. doi: 10.1088/1742-6596/969/1/012026

③ Shinozaki B., Ezaki S, Odou T, Makise K., Asano T., Fluctuations above T_c and pair breaking parameters of two dimensional Niobium Nitride films, IOP Conf. series J. of Phys.: con. Series 969(2018)012061. doi :10.1088/1742-6596/969/1/012061

④ Shinozaki B., Makise K., Asano T.,

Quantum phase slip and enhancement of superconductivity by magnetic field in NbN nanowire, IOP Conf. series J. of Phys.: con. Series 969(2018)012062. doi: 10.1088/1742-6596/969/1/012062

⑤ K. Makise, H. Terai, Y. Tominari, S. Tanaka B. Shinozaki, Duality picture of superconductor- insulator transitions on Superconducting nanowire. Scientific Reports 6, doi: 10.1038/ srep27001(2016)

[学会発表] (他計 12 件)

① 牧瀬圭正, 澤田元気, 篠崎文重, 市川聡夫、アモルファス MoReN 薄膜における位相すべりと 2 次元超伝導-絶縁体転移、日本物理学会第 74 回年次大会、2019.3.14. 九州大学 (福岡県)

② B. Shinozaki, K. Makise and T. Asano, Negative magnetoresistance due to the depression of Quantum phase slip in NbN nanowires, 31th International superconducting symposium (ISS2018) 2018.12.9, Tsukuba, (Ibaragi)

③ F. Ichikawa, K. Makise, G. Sawada, Y. Mizokami, S. Maeda B. Shinozaki、

Superconductor-insulator transitions and T_c dependence of disorder in superconducting Mo alloy thin films, 31th International superconducting symposium (ISS2018) 2018.12.9, Tsukuba, (Ibaragi)

- ④ B. Shinozaki and K. Makise and T. Asano, Quantum phase slip and enhancement of superconductivity by magnetic field in NbN nanowire, 28th International conference of low temperature physics, 2017.8.14, Beijing (China)
- ⑤ B. Shinozaki, S. Ezaki, T. Odou, K. Makise and T. Asano, Fluctuation above T_c and pair breaking parameters of two dimensional NbN films, 28th International conference of low temperature physics, 2017.8.14, Beijing (China)
- ⑥ B. Shinozaki and K. Makise, Inelastic scattering rate of electron near superconducting transition temperature of NbN thin films, 30th International superconducting symposium, 2017.12.10, Tokyo (Tokyo)
- ⑦ 篠崎文重、牧瀬圭正、浅野貴行、NbN ナノワイヤの輸送特性と磁場誘起超伝導、64 回応用物理学会春季学術講演会、2017.3.16、パシフィコ横浜 (神奈川県)

6. 研究組織

(1) 研究分担者

浅野貴行(ASANO Takayuki)

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号: 00301333

牧瀬圭正(MAKISE Kazumasa)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号: 60363321