

## 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 12月 26日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760018

研究課題名（和文）半導体ナノ細線中アンドレーエフ束縛状態の量子コヒーレント操作  
研究課題名（英文）Detection and Coherent Manipulation of Andreev Bound States  
in Semiconducting Nanowires

## 研究代表者

西尾 隆宏 (Nishio Takahiro)

独立行政法人理化学研究所・石橋極微デバイス工学研究室・基礎科学特別研究員

研究者番号：30565271

## 研究成果の概要（和文）：

スパッタエッチングとその場蒸着により、インジウム砒素半導体ナノワイヤに接触抵抗の低い超伝導電極を取り付け、高い電子移動度を有する電界効果型のナノワイヤデバイス作製法を確立した。低温では超伝導電流や多重アンドレーエフ反射、シャピロステップを観測している。特にピンチオフ近傍では、量子細線の特徴であるファブリペロー干渉、コンダクタンスの量子化を観測した。さらに超伝導電流が流れる条件を用いてトランズモン型ナノワイヤ超伝導量子ビットを試作した。

## 研究成果の概要（英文）：

One-dimensional superconducting transistors have been fabricated with individual InAs nanowires (NWs) using radio-frequency sputter cleaning followed by *in situ* metal deposition. Because of the highly transparent contacts formed in between the InAs NWs and the metals, supercurrent, multiple Andreev reflections and Shapiro steps under microwave radiation have been observed. Near pinch-off gate regions, Fabry-Perot interference and a normal conductance quantization with resonant features have been observed, which were found to be correlated with a supercurrent flow. By using the method, we fabricated transmon superconducting qubits with InAs NWs.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用物性・結晶工学

キーワード：インジウム砒素ナノワイヤ・超伝導・トランズモン・量子細線・アンドレーエフ束縛状態・量子ビット・マイクロ波・ジョセフソン接合

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 量子コンピューティングに向けて量子コヒーレント操作の研究が盛んに行われている。これまでに酸化膜を用いた超伝導ジョセフソン (SIS) 接合で研究が進んでいる一方で、飛躍的な量子コヒーレンスの向上のためには根本的に新しい原理による量子ビット構造や材料等のブレークスルーが求められている。

(2) 他方で超伝導-常伝導-超伝導 (SNS) 接合では常伝導部分にアンドレーエフ束縛状態が形成され、コヒーレントな超伝導電流が流れることが知られていた。さらに、超伝導ループを作り外部磁場を印加することで常伝導部分にミクロな量子重ね合わせ状態が実現できる可能性が理論的に提案されている。

(3) 近年、自己組織的に成長させたナノメートルサイズの半導体ナノワイヤが注目を集めている。特にインジウム砒素 (InAs) ナノワイヤは表面に誘起された二次元的な電子状態を介することで高電子移動度の特性が報告されており、超伝導量子素子への応用が期待されていた。

## 2. 研究の目的

全く新しい原理で動作する量子ビット作製を目的として、SNS接合中の常伝導部分を InAs ナノワイヤで置き換えた超伝導量子デバイスを提案する。これは、ナノワイヤでは少数チャンネルのみ許されることから散逸のパスが限定され、長時間のコヒーレンス保持が期待できるためである。本研究ではこのナノワイヤを用いた超伝導量子デバイスを試作し、今後のデバイス設計に向けた指針を得ることを目的としている。

## 3. 研究の方法

第一段階として InAs ナノワイヤに超伝導電極を取り付け、電界効果型ナノワイヤデバイス作製した。超伝導-ナノワイヤ接合を形成するには同一真空チャンバー内でスパッタエッチングと蒸着を行い、接触抵抗を低減させる工夫をした。室温で作製したデバイスの動作確認後、極低温で4端子測定による超伝導電流と多重アンドレーエフ反射の測定を行った。さらにゲート電圧を制御することでナノワイヤの伝導特性と超伝導との相関について調べた。このようにして InAs ナノワイヤ内を超伝導電流が流れる条件を見出した後、トランズモン構造をしたナノワイヤ量子ビットを試作した。このデバイスについて5~8GHzの範囲で透過測定を行い評価した。

## 4. 研究成果

### (1) 電界効果型ナノワイヤトランジスタの作製法の確立

これまでナノワイヤに対して電極形成する際は、フッ酸等を用いて自然酸化膜をウェットエッチングしてから金属を蒸着する方法が一般的であった。しかしながら、エッチング後に大気に曝されてしまい、接触抵抗を完全に取り除くことが原理的に難しいことが課題であった。そこで私はアルゴンスパッタを行った後、同一チャンバー内でその場蒸着する方法でデバイス作製を試みた。

当初はスパッタがうまくいかない可能性を考えて、蒸着をしない状態でナノワイヤのみのスパッタ実験を行った。図1にはナノワイヤのスパッタでエッチングした後のSEM像を示す。レジストに対して垂直に削れていることが分かる。

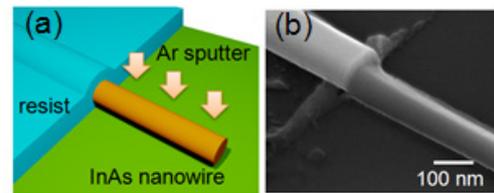


図1 (a) スパッタエッチングテストの実験模式図。(b) レジスト除去後のSEM像。

次にこの方法を用いて電界効果型のナノワイヤデバイスを作製した。室温での電気伝導測定の結果、ほぼすべてのデバイスで $2\text{k}\Omega$ 以下かつ、電界電子移動度 $\sim 5000\text{cm}^2/\text{Vs}$ を達成した。これはこれまでに報告されている同構造のデバイス性能の上限の値となっており、作製法を確立したと言える。

### (2) 超伝導電流・アンドレーエフ反射の観測

作製した電界効果型のナノワイヤデバイスについて、希釈冷凍機を用いて低温 (40 mK) で電気伝導測定した。その結果、超伝導電流を観測し、ゲート電圧により制御できること (図2)を確認した。多重アンドレーエフ反射については、5次のピーク (電極間を5回反射) まで観測している。

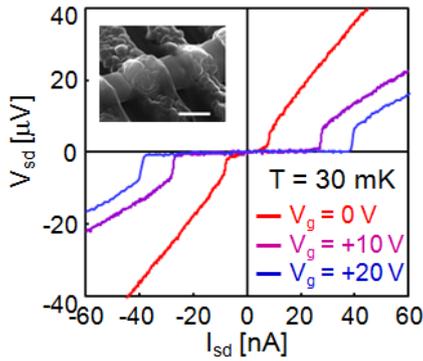


図2 四端子測定によるナノワイヤ中の超伝導電流. 挿入図は測定したデバイスで図中の白線は 300 nm のスケールを表す.

(3) 超伝導電流の磁場、高周波特性の測定  
半径 150 nm 程度の比較的大きなナノワイヤではジョセフソン渦糸侵入による Fraunhofer パターンが観測された (図3). 渦糸侵入の磁場から実効的な伝導パスを見積もることができ、SEM 像から観測したデバイスの長さより長くなっていることが分かった。これは超伝導電極の直下が常伝導のナノワイヤであることに起因していると考えられる。

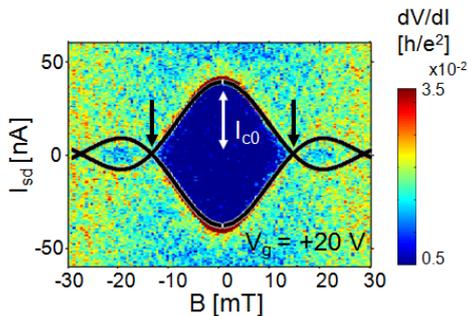


図3 超伝導電流の磁場依存性. 黒線がフィットで、黒矢印がジョセフソン渦糸侵入磁場を表す.

また、作製したデバイスに 1~9 GHz までのマイクロ波を印加し、交流ジョセフソン効果を確認した。図4には 5 GHz のマイクロ波について強度を変えながら印加した測定結果を示す。マイクロ波の周波数に対応した電圧ステップ (シャピロステップ) が観測されている。また、多重アンドレーエフ反射が観測される系で現れる分数次のシャピロステップも観測している。

#### (4) 量子細線の振る舞いを観測

ゲート電圧を印加しナノワイヤをピンチオフ近くにするこでコンダクタンスの量子化や Fabry-Perot 干渉を観測した。外部電場により量子細線が実現できたと考えられる。また、ピンチオフ近傍で超伝導電流との

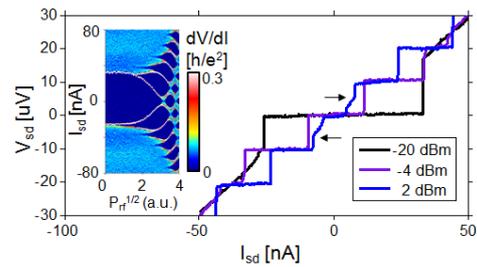


図4 5 GHz のマイクロ波を印加した時の超伝導電流応答. マイクロ波エネルギーに対応したシャピロステップが観測された. 挿入図は強度を変化させたときの微分コンダクタンスの強度プロット.

相関を調べると量子化抵抗を境に超伝導電流が流れ始めることが分かった。最近、スピン軌道相互作用の大きい InAs による量子細線と超伝導体の境界ではマヨラナ粒子の生成が理論的に予測されており、この系は基礎科学的な観点からも注目を集めている。マヨラナ粒子検出のため、今後はトンネル電極を配置したトンネル分光測定を実施していく予定である。

#### (5) トランズモン型の量子ビット作製

アンドレーエフ束縛状態を用いた量子ビット動作確認のため、トランズモン型のナノワイヤ超伝導量子ビットの作製した (図5)。トランズモンは電荷型量子ビットを改良した構造であり、電荷揺らぎの抑制が可能となっている。さらに、コプラナウェーブガイドと直接結合させて検出する方法であることから、従来の SQUID 検出測定と比べてプロセスが簡単で済むメリットがある。

作製したトランズモン型ナノワイヤデバイスを低温 (40 mK) で透過測定し評価を行った。未だ超伝導量子ビットの動作に必要な共鳴吸収スペクトルの観測には至っていないものの、超伝導から常伝導状態への透過スペクトル変化を観測した。量子ビット動作の重要なパラメータとなる超伝導電流は、電極間隔距離に非常に敏感であるので、今後はそれらの調整を行いながら検出を目指したい。

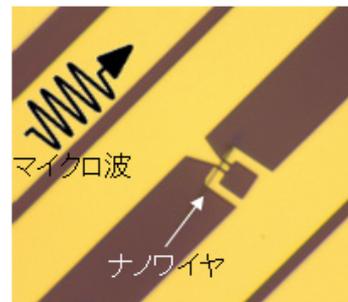


図5 作製したトランズモン型ナノワイヤデバイスの光学顕微鏡像

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 2 件)

1. Takahiro Nishio, T. Kozakai, S. Amaha, M. Larsson, Henrik A Nilsson, H Q Xu, G. Zhang, K. Tateno, H. Takayanagi, and K. Ishibashi  
“**Supercurrent through InAs Nanowires with highly transparent superconducting contacts**”, Nanotechnology, 査読有り, **22** (2011) 445701.巻頭表紙採用.
2. Takahiro Nishio, S Z Lin, T. An, T. Eguchi, and Y. Hasegawa,  
“**Tip-induced excitation of a single vortex in nanosize superconductors using scanning tunneling microscopy**”, Nanotechnology, 査読有り, **21** (2010) 465704.

[学会発表] (計 9 件)

1. Takahiro Nishio, *et al.*,  
"Supercurrent in InAs quantum nanowire with superconducting contacts"  
International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology(ISANN 2011) Wed1-4 Dec 7, 2011, Kaanapali, USA.
2. Takahiro Nishio, *et al.*,  
“Supercurrent in InAs nanowire with highly transparent superconducting contacts”  
International workshop on Quantum nanostructures and nanoelectronics (QNN2011), P-38, Oct 4 2011, Tokyo University, Tokyo, Japan.
3. Takahiro Nishio, *et al.*,  
“A study of supercurrent in InAs nanowires around pinch-off”, Frontiers in Nanoscale Science and Technology Workshop 2011, P-27, Jan 5, 2011, RIKEN, Japan.
4. Takahiro Nishio, *et al.*,  
“**Transport study of InAs nanowires fabricated with wet and dry etching method**”, 30<sup>th</sup> international conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2010), P1-096, July 27, 2010, COEX, Seoul, Korea.
5. Takahiro Nishio, *et al.*,  
“**Fabrication of superconducting transistors with InAs nanowires**”, SSSJ-A3 Foresight Joint Symposium on Nanomaterials and Nanostructures, P2-10, July 6 2010, The University of Tokyo, Tokyo, Japan.

6. 西尾隆宏、他、  
**InAs ナノワイヤを用いた単一モードの超伝導電流**、日本物理学会、新潟大学、25aHD-11、2011年3月25日

7. 西尾隆宏、  
“Fabrication of transmon quantum bits using InAs nanowires”、ナノ棟成果交流会、No.1、理化学研究所、2011年11月25日

8. 西尾隆宏、他、  
**InAs ナノワイヤを用いた量子細線中の超伝導電流**、第2回表面若手研究会、B4、理化学研究所、2011年11月20日

9. 西尾隆宏、他、  
**InAs ナノワイヤを用いたジョセフソン接合中の超伝導電流**、第72回応用物理学会、31p-P16-11、山形大学小白川キャンパス、2011年8月31日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
西尾 隆宏 (Nishio Takahiro)  
独立行政法人理化学研究所・石橋極微デバイス工学研究室・基礎科学特別研究員  
研究者番号：30565271