



(0) 研究分野

分科会:工学、物理

キーワード:量子ナノデバイス、カーボンナノチューブナノ構造、超伝導体/トポロジカル絶縁体ハイブリッド構造、ナノ加工

(1) 研究背景と研究目標

本研究室では原子レベルから数ナノメートル級の極微構造を作製する技術を開発し、さらに新材料を用いることにより、そこに発現する新しい機能を探索するとともに、それを用いた新しいナノエレクトロニクスを目指す。ナノ構造を利用すれば、電子の電荷のみならず、電子スピン、磁束、励起子などの素励起を1個単位で制御することが可能となる。それを利用して量子コンピューティングデバイスなど新規の量子ナノデバイスへの応用を目指す。対象とする材料もトップダウン的に作製するナノシリコントランジスタに加えて、カーボンナノチューブや半導体ナノワイア等の先端リソグラフィ技術では実現が困難なナノ構造を自己組織的に形成する材料を用いる。また、トポロジカル絶縁体など新材料も用いる。それらを単体、あるいは超伝導体とハイブリッド化することにより高機能性の発現を目指す。同時に、ナノスケールの構造を局所的に計測する技術の開発を行う。これにより、シリコンエレクトロニクスとは相補的な新機能ナノエレクトロニクスの実現が可能であると考えている。

(2) 2021年度成果と今後の研究計画

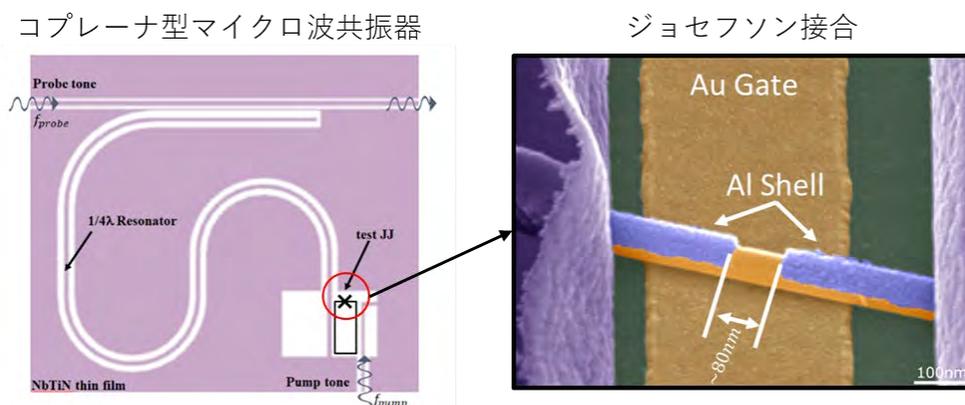
本年度の主たる成果として、トポロジカル絶縁体と超伝導体のハイブリッド構造に関する成果について記す。本研究では、トポロジカル転移を起こす物質(ここではInAsナノワイアと単層WTe₂薄膜)を使ったジョセフソン接合デバイスを作製し、そこに形成される束縛状態を調べている。特に、トポロジカル転移による変化を観測することが、将来のトポロジカル量子ビット応用へ向けたマイルストーンである。現時点では、高品質なジョセフソン接合デバイスを作製するプロセス技術の開発と、束縛状態のエネルギースペクトル位相の関数として計測するための技術開発を行っている。

● WTe₂を用いたジョセフソン接合

2次元物質である単層WTe₂は実験的にも2次元トポロジカル絶縁体であることが知られている数少ない物質の一つである。しかし、空気に触れるとすぐに劣化してしまうため、その取り扱いが困難である。今年度は、グローブボックス内で空気に触れずに接合を形成する技術の開発を行った。まだ十分な歩留まりを得られてはいないが、多層WTe₂においてジョセフソン接合の形成を示す超伝導電流を観測することができた。

● InAsナノワイアを用いたジョセフソン接合

本研究は、ドイツ・ユーリッヒ研究所のT. Schapers教授のグループと共同で実施している。先方では



図左: 共振器内に作製したジョセフソン接合デバイスの模式図。ジョセフソン接合はRF-SQUIDループの中に作製し、誘導的に共振器と結合する。図右: ナノワイアジョセフソン接合の(色付けした)電子顕微鏡写真

分子線エピタキシー法を使って直径が100nm程度のInAsナノワイアを成長することができる。さらに、真空を破ることなく超伝導金属 (Al, Nb) を堆積する技術を有する。我々のグループではこのナノワイアにナノ加工を施すことによって、ジョセフソン接合を作製している。これまでに、高品質のジョセフソン特性を示すデバイスを作製する技術を確認し、これをマイクロ波共振器と結合させるデバイスプロセスを開発してきた(図)。今年度は、さらに、ジョセフソン接合デバイスを作製したチップと共振器を作製したチップを別々に作製し、それらを張り合わせて結合を実現するフリップチップ法を開発した。この方法は様々なデバイスへ適用できる汎用性がある。予備的な実験として、ナノワイアジョセフソン接合内に形成されたアンドレーエフ束縛状態(トポロジカルでない場合)のスペクトルを測定することができた。

今後の計画

マヨラナゼロモードから形成されるトポロジカル量子ビットへ向けた第1のマイルストーンは、InAsナノワイアや単層 WTe_2 に形成されることが期待される1次元的なトポロジカル超伝導体チャネルにおいて、トリビアル相とトポロジカル相の転移が起こることを観測することである。そのために、束縛状態のエネルギースペクトル、交流ジョセフソン効果等に現れる、転移に伴う変化を統一的に観測することを目指す。

(3) 研究室メンバー

(2021年度)

石橋幸治(主任研究員)
南任真史(専任研究員)
山口智弘(専任研究員)
大野圭司(専任研究員)
Russell S. Deacon(専任研究員)
飛田聡(研究員)

岡本隆之(特別嘱託研究員)
伴芳祐(特別研究員)
Michael Randle(特別研究員)
浅野頼子(アシスタント)
坂井陽子(パートタイマー)

(4) 発表論文等

1. P. Perla, A. Faustmann, S. Kölling, P. Zellekens, R. Deacon, H. Aruni Fonseka, J. Kölzer, Y. Sato, A. M. Sanchez, O. Moutanabbir, K. Ishibashi, D. Grützmacher, M. I. Lepsa, and T. Schäpers, "Te-doped selective-area grown InAs nanowires for superconducting hybrid devices", *Phys. Rev. Materials.* **6**, 024602 (2022)
2. P. Perla, H. A. Fonseka, P. Zellekens, R. Deacon, Y. Han, J. Koelzer, T. Mörstedt, B. Bennemann, A. Espiari, K. Ishibashi, D. Gruetzmacher, A. Sanchez, M. I. Lepsa and T. Schäpers, "Fully in situ Nb/InAs-nanowire Josephson junctions by selective-area growth and shadow evaporation", *Nanoscale, Adv.*, **3**, 1413 (2021)
3. Daichi Suzuki, Kou Li, Koji Ishibashi, and Yukio Kawano, "A Terahertz Video Camera Patch Sheet with an Adjustable Design based on Self-Aligned, 2D, Suspended Sensor Array Patterning", *Adv. Func. Mat.* 2008931 (2021)
4. Yoshisuke Ban, Kimihiko Kato, Shota Iizuka, Satoshi Moriyama, Koji Ishibashi, Keiji Ono, and Takahiro Mori, "ON current enhancement and variability suppression in tunnel FETs by the isoelectronic trap impurity of beryllium", *Jpn. J. Appl. Phys.* 60, SBBA01 (2021)
5. Joseph Hillier, Keiji Ono, Kouta Ibukuro, Fayong Liu, Zuo Li, Muhammad Husain, Harvey Rutt, Isao Tomita, Yoshishige Tsuchiya, Koji Ishibashi, Shinichi Saito, "Probing hole spin transport of disorder quantum dots via Pauli spin-blockade in standard silicon transistors", *Nanotechnology*, 32 260001 (2021)

Laboratory Homepage

https://www.riken.jp/research/labs/chief/adv_device/

http://www2.riken.jp/lab-www/adv_device/en/index.html