



(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
ジカル絶縁体ハイブリッド構造、ナノ加工、ナノスケールシリコントランジスタ

(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、そこに発現する物性・機能を探るとともに、それを用いた新しいデバイスを目指す。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が開ける。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、2次元物質や半導体ナノワイヤ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化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) 2023年度成果と今後の研究計画

1) シリコンを用いたナノトランジスタにおける単一スピン制御

昨年度に引き続き室温パウルスピン閉鎖の磁気センサー応用に取り組んだ。10個をこえる素子で室温スピン閉鎖を確認し、最近発表された理論とのよい一致を確認した。量子ビット動作温度の向上を制限する要因となっている強いスピン軌道相互作用を低減すべく、SおよびB不純物を導入した新素子についてプロセスを進めた。

今後の計画 : 磁気センサーとしての性能の向上および集積化を目指す。

2) 超伝導体/半導体ハイブリッド構造

超伝導体と正常金属を接合した構造では、アンドレーエフ束縛状態などユニークな量子状態が形成される。さらに、正常金属として1次元的な半導体ナノワイヤやトポロジカル絶縁体を用いた場合には、パラメータによってトポロジカル転移が期待される。そこに現れる量子状態は新たなトポロジカル量子ビットとしての応用可能性がある。本研究室では、InAsなど

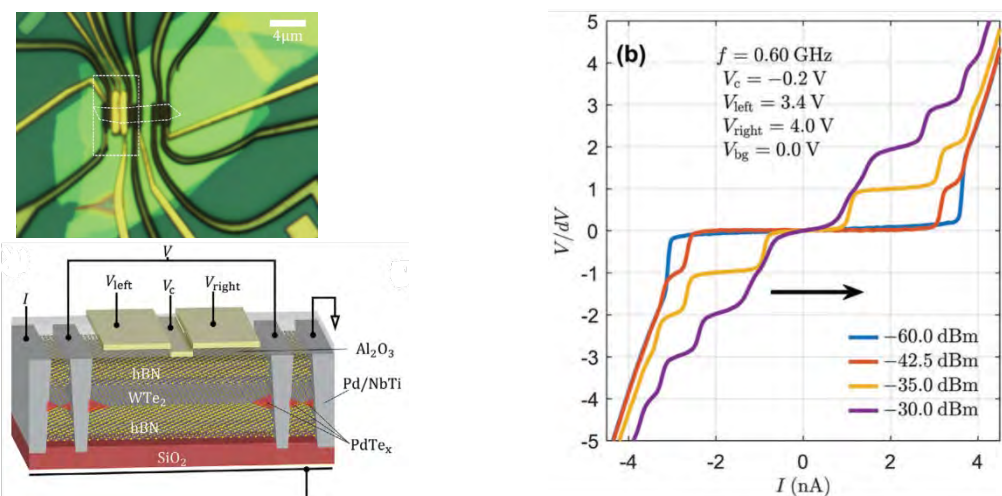


図 (左) : 作製したデバイスの光学顕微鏡写真と構造の模式図 (右) マイクロ波を印可したときの直流電流電圧特性 (ジョセフソン接合の形成を示すシャピロステップ) [1]

の半導体ナノワイヤや2次元トポロジカル絶縁体であることが実験的にも知られている WTe_2 を用いてジョセフソン接合を作製しその量子状態を調べている。 WTe_2 は空気に触れると容易に劣化するためにデバイス化が容易ではない。本年度は、これまでの多層 WTe_2 にかかわるプロセス技術をベースとして、単層 WTe_2 を用いたジョセフソン接合の形成に成功した。

単層 WTe_2 では、十分な正のゲート電圧を印可すると超伝導転移ことが知られていることを利用し、図（左）のような試料を作製した。左右のゲート直下に超伝導を誘起し、その間のギャップにさらにゲートを設けて左右超伝導領域間の結合を制御することができる。マイクロ波を印可した状態で電流電圧特性にジョセフソン接合特有のステップ構造（シャピロステップ）が観測されることから（図（右））、作製した試料はジョセフソン接合素子として動作していることを示している。

なお、半導体ナノワイヤにかかわる研究は、（独）ユーリッヒ研究所のThomas Scheepers教授との共同研究、 WTe_2 にかかわる研究は富士通の細田雅之博士、河口研一博士らとの共同研究として行われた。

今後の計画：半導体ナノワイヤやトポロジカル絶縁体を用いたジョセフソン接合形成の実験的な困難は、そのデバイスプロセスの困難にある。今後、ナノワイヤでは新たな構造、トポロジカル絶縁体では、単層 WTe_2 の利用加えて、より扱いやすい材料の探索とそのデバイスプロセスの開発を行う。今回ジョセフソン接合の形成に成功したが、どのようなパラメータ領域で動作しているかわからない。今後、より制御性の良いデバイス構造を開発し、トポロジカル転移の可能性を探る。

(3) 研究室メンバー

(2023年度)

石橋幸治（主任研究員）	飛田聡（研究員）
南任真史（専任研究員）	Patrick Zellekens（基礎科学特別研究員）
山口智弘（専任研究員）	Michael Randle（特別研究員）
大野圭司（専任研究員）	浅野頼子（アシスタント）
Russell S. Deacon（専任研究員）	坂井陽子（アシスタント）

(4) 発表論文等

1. Michael D. Randle, Masayuki Hosoda, Russell S. Deacon, Manabu Ohtomo, Patrick Zellekens, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Shota Okazaki, Takao Sasagawa, Kenichi Kawaguchi, Shintaro Sato, Koji Ishibashi, “Gate-defined Josephson Weak-Links in Monolayer WTe_2 ”, *Advanced Materials*, **35**, 2301683 (2023)
2. Thomas P. Lyons, Jorge Puebla, Kei Yamamoto, Russell S. Deacon, Yunyoung Hwang, Koji Ishibashi, Sadamichi Maekawa, and Yoshichika Otani, “Acoustically Driven Magnon-Phonon Coupling in a Layered Antiferromagnet”, *Phys. Rev. Lett.* **131**, 196701 (2023)
3. K. Ishibashi (invited), “Josephson Junctions with WTe_2 ”, Workshop on ‘Materials for Quantum Electronics’ University of Manchester, UK, 28th February – 1st March 2024.

Laboratory Homepage

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