



(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) 2022年度成果と今後の研究計画

1) シリコンを用いたナ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。素子構造および素子動作条件の最適化により最大9%のシグナル比、20マイクロテスラの磁場感度を達成した。帝京大学およびキオクシア社との共同研究として行った微細FinFET素子の研究において素子の1.5ケルビン電気伝導において単電子トランジスタ動作を確認した。さらに素子を高感度電荷系として用いることで素子周辺の電荷トラップの精密な測定を行った。

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) カーボンナノチューブ量子ドット中の励起子制御

直径が1nm程度の超微細な構造を持つカーボンナノチューブを用いた量子ドットにおいて、単一励起子の制御および量子光源としての応用を目指している。これまでに、数十nm程度の長さを持つ単層ナノチューブの両端を分子で修飾し、2重結合量子ドットを形成できることを示した(図1(a))。今年度は、各ドットを励起子量子ビットとして、励起子間の相互作用を用いることにより、2量子ビットの相関ゲート(CNOTゲート)動作を実証することに成功した(図

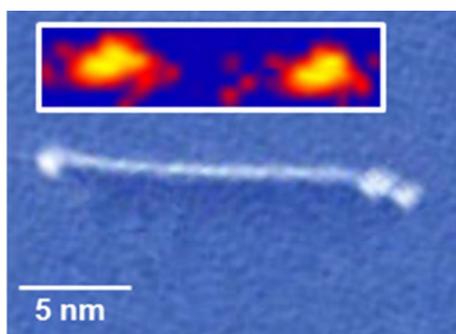


図1(a): カーボンナノチューブ量子ドットの走査トンネル顕微鏡像と状態密度マッピング

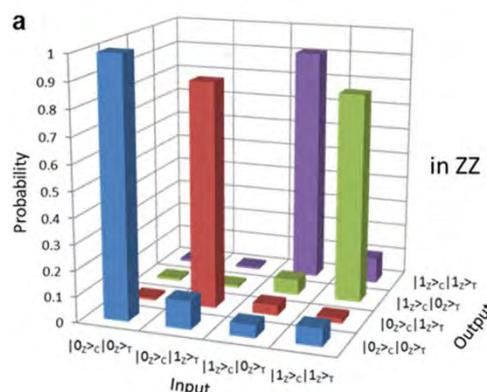


図1(b): CNOT操作を行った際の各量子ビットの入出力特性

1 (b))。この場合、励起子が1個ある状態を $|1\rangle$ 、ない場合を $|0\rangle$ とし、励起子からの発光を測定することで量子ビットの状態を読み出す。図1は準備した入力に対して、CNOTゲート操作をした後の各出力の状態を示しており、CNOT動作が行っていることを示している。

今後の計画：量子状態の定量的な評価を行うとともに量子光源としての応用を目指す。さらに、集積化へ向けたプロセス技術の開発を行う。

3) 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、劣化の影響が比較的小さな多層 WTe_2 を用いてジョセフソン接合を形成するために熱処理を行うと良好な超伝導電極が形成され、ジョセフソン接合として動作することを見出した。

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 Scheapers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：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。

(3) 研究室メンバー

(2022年度)

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

(4) 発表論文等

1. Pujitha Perla, Anton Faustmann, Sebastian Kölling, Patrick Zellekens, Russell Deacon, H. Aruni Fonseka, Jonas Kölzer, Yuki Sato, Ana M. Sanchez, Oussama Moutanabbir, Koji Ishibashi, Detlev Grützmacher, Mihail Ion Lepsa, and Thomas Schäpers, “Te-doped selective-area grown InAs nanowires for superconducting hybrid devices”, *Phys. Rev. Materials*, **6**, 024602 (2022)
2. Manabu Ohtomo, Russell Deacon, Masayuki Hosoda, Naoki Fushimi, Hirokazu Hosoi, Michael Randle, Mari Ohfuchi, Kenichi Kawaguchi, Koji Ishibashi, Shintaro Sato, “Josephson junctions of Weyl semimetal WTe_2 induced by spontaneous nucleation of PdTe superconductor”, *Appl. Phys. Express* **15**, 075003 (2022)
3. Akira Hida and Koji Ishibashi, “Exciton Controlled-NOT Gate Using Coupled Quantum Dots in Carbon Nanotube”, *ACS Photonics*, **9**, 3398-3403 (2022)
4. Patrick Zellekens, Russell Deacon, Pujitha Perla, Detlev Grützmacher, Mihail Lepsa, Thomas Schäpers, and Koji Ishibashi, “Microwave spectroscopy of Andreev states in InAs nanowire-based hybrid junctions using a flip-chip layout”, *Communications Physics*, **5**, 267 (2022)
5. Yoshisuke Ban, Kimihiko Kato, Shota Iizuka, Shigenori Murakami, Koji Ishibashi, Satoshi Moriyama, Takahiro Mori and Keiji Ono, “Introduction of deep level impurities, S, Se, and Zn, into Si wafers for high-temperature operation of a Si qubit”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **62**, SC1054 (2023)

Laboratory Homepage

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