

大野 圭司

理化学研究所研究開発本部
専任研究員

シリコン技術に立脚した室温動作スピン量子ビット

§ 1. 研究成果の概要

2019 年度は単一スピン素子に適した深い不純物を探索し、イオン注入条件および注入後熱処理条件の最適化により注入ダメージなく最適な濃度で深い準位をシリコンへ導入すること、並行して素子の動作シミュレーションを行うことを計画した。

高温動作に適した深い不純物の候補である S、Zn および Be について導入条件の最適化を行った。最適化にあたり、TEM(透過型電子顕微鏡)、SIMS(二次イオン質量分析法)、PL(Photo Luminescence)、および DLTS(Deep Level Transient Spectroscopy)分析からなる探索プロトコルを用いた。S については基板表面から 20nm 以下でピーク濃度 $5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ を、Zn についても $2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ を達成した。これらの値は実績のある Al-N 不純物素子のそれと同程度であり、これら新規の深い不純物を用いた単一スピン素子に必要な濃度を達成できたといえる。また DLTS 分析により不純物の準位位置を電氣的に評価した。S は深さ 0.25 eV および 0.5 eV、Zn は深さ 0.62eV および 0.27eV に準位を有し、室温熱励起に耐える深い準位の存在を確認した。Be は PL による導入条件の最適化を行った。Be の導入条件は Al-N のそれと近いため TFET チャンネル中に Al-N 対と Be の両者を導入できる。Be 導入 TFET 素子はすでに作成され、現在基礎特性の評価中である。

Al-N 単一スピン素子の作製歩留まりが向上した。Al-N 不純物対導入 TFET のチャンネル中に浅い不純物である B を導入することで、単一スピン素子として動作する確率が従来の 10%程度から 50%超へ大きく改善した。この事実は本提案のモデル、ドナーとアクセプターの両者が TFET チャンネル中に存在することで単一スピン素子として機能する、を支持する結果である。浅いアクセプターである B を別の深いアクセプター不純物に置き換えることで、将来的には高温動作素子を高歩留まり作製が可能となるであろう。また複数の B が伝導に寄与することによる多体のスピン閉鎖、さらには単一の核スピンの寄与するスピン閉鎖を観測した。これらの成果は多体スピン系の量子もつれや核スピンメモリを用いた高感度磁気センシングへの応用に繋がるものと期待している。

前年度理研 G へ導入した高スループット素子評価システムを物材 G においても導入した。チーム全体の素子評価体制が拡充されたことにより今後の素子開発のさらなる加速が期待できる。

深い不純物が導入された TFET の輸送シミュレーションを行った。従来トランジスタ設計に用いられていたシミュレータにクーロン閉塞を再現する量子輸送モジュールを組み込むことでクーロン閉鎖やチャンネル長変化に伴う伝導特性変化などが分析可能となった。

1ビット量子シミュレーション実験系を発展させ、より複雑な 1 量子ビット系の挙動をシミュレートが可能となった。具体例として量子熱サイクルに着目し、そこでの“エンジン”サイクルと“冷凍機”サイクルの間の量子干渉効果を実験的にシミュレートした。

以上のように、2019 年度計画に記載された項目を順調に実施できたうえ、有用な副産物的成果も複数得ることができた。したがっておおむね計画どおりに進展していると考ええる。

【代表的な原著論文】

K. Ono, S. N. Shevchenko, T. Mori, S. Moriyama, F. Nori, Single-spin qubit analogous to a quantum heat engine, submitted (2019).

§ 2. 研究実施体制

(1) 理研グループ

- ① 研究代表者: 大野 圭司 (理化学研究所研究開発本部 専任研究員)
- ② 研究項目
 - ・研究統括
 - ・単一スピン素子の設計・評価

(2) 産総研グループ

- ① 主たる共同研究者: 森 貴洋 (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)
- ② 研究項目
 - ・単一スピン素子の設計(シミュレーション)
 - ・単一スピン素子の作製・基礎評価

(3) 物材グループ

- ① 主たる共同研究者: 森山 悟士 (物質・材料研究機構国際ナノアーキテクト研究拠点 主任研究員)
- ② 研究項目
 - ・単一スピン素子の設計・評価