

齊藤 志郎

日本電信電話(株) NTT 物性科学基礎研究所
グループリーダー・特別研究員

超伝導量子ビットを用いた極限量子センシング

§ 1. 研究成果の概要

本研究では、超伝導量子回路を用いた超高感度・高空間分解能な量子センサの実現を目指し研究を進めている。NTT では、一つの応用例として、超伝導回路を磁化検出器として使い、局所電子スピン共鳴(ESR)の測定を行っている。昨年度、超伝導量子干渉計(SQUID)とジョセフソン分岐増幅器(JBA)を用いた読み出しにより、1 秒間に

14,000 個のスピンを検出する感度を実現した。今年度は検出器として超伝導磁束量子ビットを利用することで、感度が 400 スピンまで向上した(図 1)¹⁾。さらに、古典限界を超える量子センサの理論検討として、位相緩和と呼ばれる現実的なノイズ環境下での量子磁場センサの感度を検討した。リング状に配置した複数量子ビット間で量子テレポーテーションを繰り返すことにより、位相緩和を抑制し、積算時間に対し線形に感度が向上する手法を提案した。積算時間に対し平方根で感度が向上する古典センサと比較し、量子センサの優位性を示す結果となった²⁾。

静岡大学では、NTT で作製される種々の試料のスピンの種同定、スピン定量等の評価を行っており、また、このための高感度 ESR、EDMR (ESR 信号の電氣的読み出し手法)の開発を進めている。昨年度、EDMR 用の低温冷却系を導入したことを受け、その雑音低減に取り組み、約 50fA ($=50 \times 10^{-15} \text{A}$) の電流読み出しが可能となった。また、単一スピンの EDMR 観測に向けて、MOS トランジスタのゲートにパルスを印加することにより欠陥を介した電流を計測するチャージポンピング法に着目し、微細 MOS トランジスタ絶縁膜中の単一欠陥による微小電流の検出に成功した(図 2)。

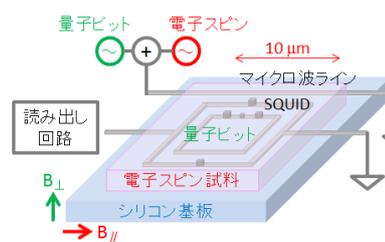


図 1 超伝導磁束量子ビットを用いた局所 ESR 測定装置

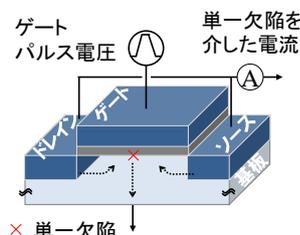


図 2 チャージポンピング法による単一欠陥の検出

近畿大学では、NTTにおける量子センサの開発を助けるためにNMR量子コンピュータ技術を応用したセンサのシミュレーション実験と測定の枠組みの理論的な研究を行っている。実験ではエンタングルした量子センサのノイズ耐性を向上させる手法の検証や制御されたノイズ環境を構築する実験を行った。一方、理論的な研究では、ポストセクションを応用することによって測定の自由度を増すことができ、通常の測定では不可能な測定を実現する可能性について議論している。また、市販の化学分析用の高分解能NMR装置(11T以上の磁場)では行うことができない低磁場(100mT以下の磁場)でのシミュレーションを行うことを目指した装置の開発も進めている³⁾。また、我々の開発している装置をベースにした学生実験用のNMR装置(図3)がサムウェイ社(本社、静岡県富士市)から販売されることになっており、近い将来に多くの大学で学生実験にNMR量子コンピュータを導入することにも可能になる。この装置開発を通じて量子力学を理解した人材の育成に貢献できると期待している。



図3 永久磁石を用いたNMR装置

【代表的な原著論文】

1. H. Toida, Y. Matsuzaki, K. Kakuyanagi, X. Zhu, W. J. Munro, H. Yamaguchi, and S. Saito, “Electron paramagnetic resonance spectroscopy with a single artificial atom”, Commun. Phys. Vol. 2, 33, 2019.
2. Y. Matsuzaki, S. Benjamin, S. Nakayama, S. Saito, and W. J. Munro, “Quantum Metrology beyond the Classical Limit under the Effect of Dephasing”, Phys. Rev. Lett. Vol. 120, 140501, 2018.
3. Y. Hibino, K. Sugahara, Y. Muro, H. Tanaka, T. Sato, and Y. Kondo, “Simple and low-cost tabletop NMR system for chemical-shift-resolution spectra measurements”, J. Mag. Res. Vol. 294, pp. 128-132, 2018.

§ 2. 研究実施体制

(1)「NTT」グループ

① 研究代表者: 齊藤 志郎 (日本電信電話(株)NTT 物性科学基礎研究所、グループリーダー・特別研究員)

② 研究項目

- ・超伝導磁束量子ビットを用いた電子スピン共鳴の測定
- ・古典限界を超える量子磁場センサの理論検討

(2)「静岡大学」グループ

① 主たる共同研究者: 小野 行徳 (静岡大学電子工学研究所、教授)

② 研究項目

- ・EDMR 低温系、低雑音系立ち上げ
- ・高感度 EDMR 開発

(3)「近畿大学」グループ

① 主たる共同研究者: 近藤 康 (近畿大学理工学部、教授)

② 研究項目

- ・NMR 量子コンピュータ技術を応用した量子センサのシミュレーション
- ・ポストセクションを応用した測定の理論的枠組みの構築
- ・低磁場 NMR 量子コンピュータの開発