

シリコン量子ビット集積化技術とクライオ CMOS 技術 Silicon Qubit Integration and Cryo-CMOS Technologies

森 貴洋[†]Takahiro MORI[†][†] 国立研究開発法人産業技術総合研究所

概要

量子コンピュータは、従来コンピュータでは困難な材料・化学計算や組合せ最適化問題などへの適用が期待されており、近年急速に研究開発が進展している。ハードウェア候補は複数あるが、その中でもシリコン量子ビットを基本素子とする方式は、既存半導体製造技術との親和性が高いため、将来的な大規模集積化が容易であると考えられている。一方で、実用的な量子コンピュータ実現には数万から数百万量子ビット規模への拡張が必要と考えられており、そのためには量子ビット素子だけでなく、周辺の制御・読出し技術を含めたシステム全体の集積化が不可欠となる。

シリコン量子ビットの実装は、単一電荷を閉じ込めた量子ドット素子に対して行われる。単一電子スピンを利用する **Spin-1/2** 量子ビット、二重量子ドットを利用する **S-T₀** 量子ビット、三重量子ドットを利用する **Exchange-only** 量子ビットの3方式が存在する。それぞれ量子状態の符号化方法や演算原理が異なり、必要となる制御信号も異なる。**Spin-1/2** 量子ビットでは電子スピン共鳴を利用したマイクロ波制御が一般的であり、**S-T₀** 量子ビットでもマイクロ波信号による駆動が利用される。一方、**Exchange-only** 量子ビットでは交換相互作用の時間制御のみで量子演算が可能であり、原理的にはマイクロ波を必要としない。歴史的には **Spin-1/2** 量子ビットを舞台に多くの研究開発が進められてきたが、近年は大規模集積化を見据え、どの実装方式が現実的であるかの検討が行われている。

また、現時点で有力なシリコン量子ビットの多くは極低温環境で動作し、多数の制御信号を冷凍機内部へ導入する必要がある。量子ビット数の増加に伴って配線数、熱流入、制御装置消費電力が急増することが知られており、これらは大規模集積化における重要課題となっている。この問題を解決する技術として期待されているのが、極低温環境で動作するクライオ CMOS 集積回路である。クライオ CMOS 集積回路は冷凍機内部に配置され、制御信号生成や読出し信号処理などの機能を担うことで、冷凍機外部との配線本数削減やシステム全体の低消費電力化を実現する。

本講演では、まずシリコン量子ビット素子の基本原理を概説し、**Spin-1/2**、**S-T₀**、**Exchange-only** 量子ビットにおける量子状態形成とマイクロ波利用の位置付けについて紹介、現在の世界的な研究開発のステータスを概説する。続いて、シリコン量子ビットの大規模集積化において顕在化する制御上の課題に触れ、それらを克服するためのクライオ CMOS 技術の必要性を概説する。極低温 MOSFET のデバイス物理の概要を紹介し、回路開発に関する最近の研究開発成果を紹介する。これらを通して、シリコン量子ビット技術とクライオ CMOS 技術の両面から、将来の大規模量子コンピュータ実現に向けた課題と展望について議論する。

Abstract

Silicon qubits are considered a promising platform for large-scale quantum computing because of their compatibility with advanced semiconductor manufacturing technologies. This talk introduces the operating principles of **Spin-1/2**, **S-T₀**, and **Exchange-only** qubits, with emphasis on the role of microwave control. Also, the necessity of cryogenic CMOS technology for scalable quantum systems is discussed, together with recent progress in low-temperature CMOS devices and integrated circuit development for qubit control and readout.