

超伝導量子コンピュータのスケーリング戦略 ー必要部材の将来展望ー

Scaling Strategies for Superconducting Quantum Computers ーFuture Outlook for Key Componentsー

猪股 邦宏

Kunihiro Inomata

産業技術総合研究所 量子・AI 融合技術ビジネス開発グローバル研究センター

概要

実用的な誤り耐性量子コンピュータの実現には、量子誤り訂正によって論理量子ビットを構成・保護するために、多数の物理量子ビットが必要となる。超伝導方式の量子コンピュータでは、量子ビット数の増加に伴い、室温の制御エレクトロニクスと極低温のチップを結ぶ制御・読み出し用の RF 配線や、それらに付随するマイクロ波部品の数も増える。その結果、量子コンピュータチップの実装先となる希釈冷凍機の極低温ステージでは、配線や部品を収容するための空間に加え、熱流入や部品の発熱に対応する冷却能力がより多く求められる。したがって、チップ上の量子ビット集積だけでなく、周辺ハードウェアを含むシステム全体の設計がスケーリングの鍵となる。

本講演では、希釈冷凍機の各温度ステージにおける収容能力と冷却能力、セミリジッド同軸配線の実装密度・熱流入・伝送特性、低温で読み出し信号を増幅する HEMT 増幅器の大きさや発熱、磁性体を用いた非相反素子（サーキュレータ／アイソレータ）の占有体積に着目し、それぞれの現状と課題を整理する。さらに、制御・読み出し信号を、必要な信号品質を維持しながら高密度かつ低熱負荷で伝送する技術、マイクロ波部品の小型化と増幅器の低消費電力化、配線と部品の配置を見据えた冷凍機設計など、今後求められる方向性を議論する。必要部材の観点から、実用規模の超伝導量子コンピュータに向けたシステム構成を展望する。



図 Bluefors 社製希釈冷凍機 KIDE (Qubed, G-QuAT)



図 Keysight 社製 QCS (Qubed, G-QuAT)

Abstract

Practical fault-tolerant superconducting quantum computers require many physical qubits, increasing demand for control and readout wiring, microwave components, and dilution refrigerators with more space and greater cooling power. This talk examines the resulting constraints on refrigerator design, heat conducted through semi-rigid coaxial cables, the size and heat dissipation of HEMT amplifiers, and the footprint of circulators and isolators. It then discusses dense wiring with low thermal loads, compact microwave components, lower-power amplification, and integrated cryogenic system design.