

平成 27 年 3 月 31 日

プログラム名：量子人工脳を量子ネットワークでつなく高度知識社会基盤の実現

PM 名：山本喜久

プロジェクト名：量子シミュレーション

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平成 26 年度

研究開発課題名：

「超伝導量子回路を用いた量子シミュレータ開発」

研究開発機関名：

独立行政法人理化学研究所

研究開発責任者

中村 泰信

当該年度における計画と成果

1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

平成 26 年度の課題は、超伝導回路を用いた量子シミュレータの理論および実装方法について検討を行うことである。超伝導量子ビットを多数配置した系で、かつ駆動と散逸が存在する状況下での、強相関多体系の相転移、多数の人工原子が共振器モードと強く結合したモデルなどの理論解析を行う。一方、これまでに培ってきた超伝導量子ビット・超伝導共振器などを用いた超伝導量子回路技術を発展させて、多数の量子ビットを集積化した超伝導量子回路の作製に向けて必要となる技術を開発する。

2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

2-1 進捗状況

超伝導量子ビット集積回路作製技術の開発

絶縁体基板上に多数のジョセフソン接合を有する超伝導集積回路を作製するための基盤技術の確立を目指し、電子線リソグラフィを用いたジョセフソン接合列や超伝導量子ビット列の設計および試作を行った。

超伝導回路を用いた強相関量子多体系実現のための検討

超伝導量子回路を用いて実現可能な強相関量子多体系の例として、ジョセフソン接合列における量子磁束からなるボーズ・ハバード模型や、トランズモン型量子ビット列からなる双極子相互作用スピン模型の系に関する検討を行った。前者では、1次元または2次元あるいはフラクタル次元を持つ格子などが実現可能であり、正方格子・三角格子・六方格子・カゴメ格子・Lieb 格子などを設計した。モット絶縁体 超流動体相転移などの実現が期待され、その観測方法構築のためのよいテストベッドとなると考えている。従来、専ら直流の電流 電圧測定により研究されてきた系であり、今後、空洞共振器中に被測定量子系を配置し、マイクロ波応答を調べることで相転移の様子をより詳細に調べる予定である。

量子多体系の理論検討

マイクロ波共振回路に多数の量子ビットが結合した Dicke モデルにおいて、超強結合領域において予想されている超放射相転移の no-go 定理に関する理論的検討を行った。その是非に関して議論が分かっている定理であり、今回は量子ビットの非線形性が議論に与える影響などを調べた。

超伝導量子ビット周辺回路の開発

超伝導量子シミュレータの制御や読み出しに有用と期待される超伝導量子ビットの制御方法や読み出し方法に関する理論検討や実験を行った。

2-2 成果

超伝導量子ビット集積回路作製技術

シリコン基板上に様々な格子構造を持つジョセフソン接合列や量子ビット列を試作し、作製技術を確立した[図 1]。

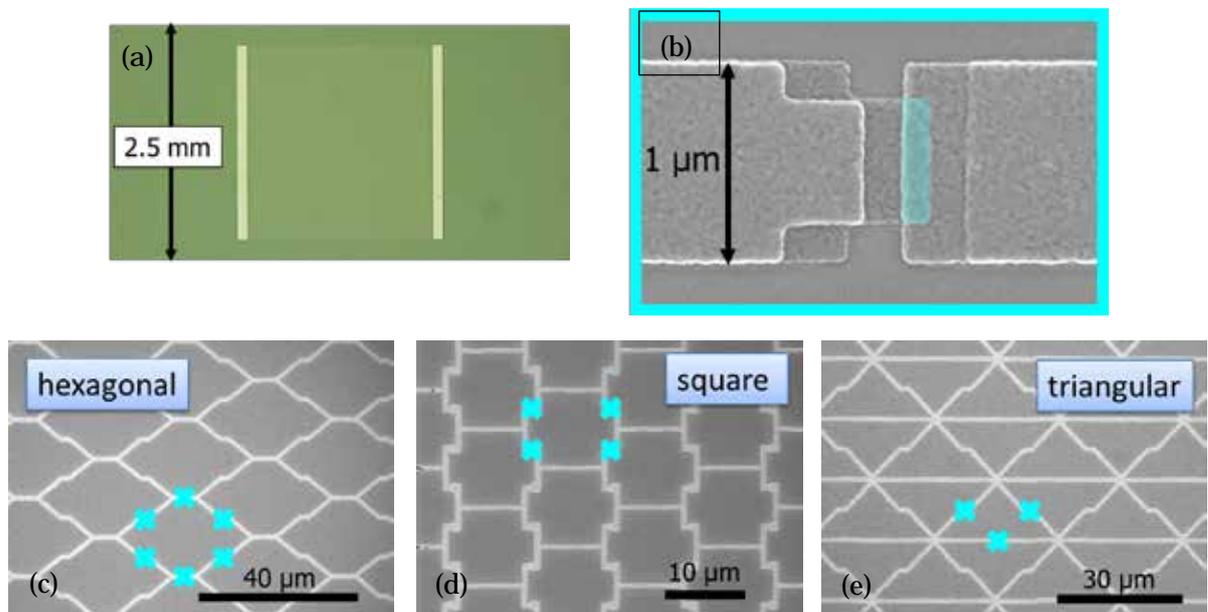


図1 作製したジョセフソン接合列。(a) シリコンチップ全体像。中央の2本の白い電極の間に接合列が敷き詰められている。(b) 個々のジョセフソン接合の電子顕微鏡写真。水色の重なり部分。(c-e) それぞれ六方格子・正方格子・三角格子の電子顕微鏡写真。

超伝導量子ビット周辺回路技術

超伝導量子ビットを多数集積化し、個々のサイトが制御・観測可能である量子多体系を構築するためのアーキテクチャの提案を行い、論文にまとめた^[1]。また、1次元導波路を伝搬する光子と超伝導量子ビットの相互作用を利用して、量子シミュレーションを行う際に有用となる伝搬マイクロ波光子検出方法を提案し、実証した。検出の量子効率率は約66%であった。これらの結果を国際会議で発表した^[2,3]。

[1] P.M. Billangeon, J. S. Tsai, and Y. Nakamura, "Circuit QED based scalable architectures for quantum information processing with superconducting qubits", Phys. Rev. B, vol. 91, No. 9, pp.094517-1-31, 2015 (DOI: 10.1103/PhysRevB.91.094517)

[2] K. Inomata, Impedance-Matched system in Driven Circuit QED, The 17th International Symposium Physics of Semiconductors and Applications (ISPSA2014), Jeju, Korea, 2014/12/9

[3] K. Inomata, Z. Lin, K. Koshino, W. Oliver, J.S. Tsai, Y. Nakamura, T. Yamamoto, Microwave Photon Detection Using an Impedance-matched System, APS March Meeting 2015, San Antonio, Texas, USA, 2015/3/5

2-3 新たな課題など

超伝導量子ビットのコヒーレンス改善

多体非平衡系の量子シミュレーションに際しては、駆動場の強度を制御するだけでなく、系の散逸の制御も望まれる。そのためにはバックグラウンドとなる不要な散逸機構を極力排除する必要がある。今回の試作方法では、量子ビットのコヒーレンス時間が約3マイクロ秒に限られていた。超伝導回路

の材料・プロセスの最適化により、回路上に存在する散逸機構を減らし、量子ビットのコヒーレンス時間の改善や、超伝導共振回路の Q 値の改善を図る予定である。

超伝導回路パラメータの最適化

大規模ジョセフソン接合列や量子ビット列において、回路パラメータ、特にジョセフソン接合エネルギーと電極間の相互キャパシタンスに関する回路シミュレーションおよび電磁界シミュレーションを通じて、最適化を行う必要がある。

3 . アウトリーチ活動報告

なし