ここから、新・未来へ
MOONSHOT RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM

研究開発項目

3．ピエゾマイクロ波共振器

２０２３年度までの進捗状況

1．概要

超伝導量子コンピュータは原子・イオンに比べて３桁高速な利点を有しますが、膨大な配線数など集積化には限界があります。本プロジェクトでは、超伝導量子ビットを光量子で接続する量子インターフェースを開発し、大規模な光超伝導ハイブリッド量子コンピュータの実現を目指します。本研究開発テーマでは、その構成部品となるピエゾマイクロ波共振器の開発を行います（図１）。これまでに、ダイヤモンド表面弾性波素子による音子（弾性波）生成、その音子による NV 中心量子メモリの量子操作に成功しました。また、マイクロ波光子を効率的に音子に変換するのに必要十分な性能のマイクロ波共振器も開発しました。

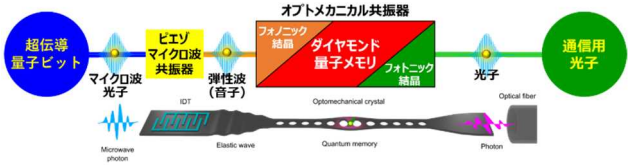


図１．量子 IF におけるピエゾマイクロ波共振器の役割

2．これまでの主な成果

研究開発課題１：ピエゾマイクロ波共振器の研究開発

超伝導量子ビットから放出されたマイクロ波光子を、ピエゾ効果を介して高効率で音子に変換するためには Q 値が１万以上かつ周波数可変のマイクロ波共振器が必要となります。更に力学的インダクタンスという超伝導体固有のインダクタンスを活用すること、また共振器へのラダー構造の導入により、高インピーダンスかつ低磁場（~1 mT）で周波数を 4%調整可能という理想的な特性をもつマイクロ波共振器の開発に成功しました（図２）。並行して弾性波と量子メモリがコヒーレントに相互作用することの検証や、マイクロ波一光変換効率を 10 倍以上向上させる可能性のある新規色中心 NV^0 の量子操作の研究も大きく進展しました。

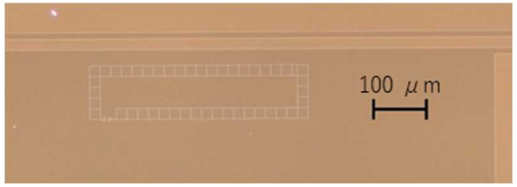


図２．NbTiN 高力学的インダクタンスマイクロ波共振器。

研究開発課題２：量子制御電子集積回路の研究開発

量子回路を極低温において高速かつ高忠実に量子制御するために、任意振幅のマイクロ波を発生することができる超伝導マイクロ波パルス発信器を開発しました。単一磁束量子（SFQ）回路を用いて 100 GHz の密度変調された SFQ パルス列を発生し、超伝導フィルタで 5 GHz のマイクロ波パルスを生成します（図３）。これまでに SFQ マイクロ波パルス発生器の極低温動作のための低電力 SFQ セルライブラリを構築しました。

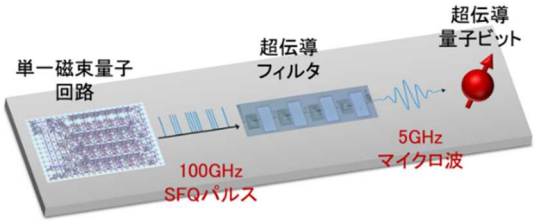
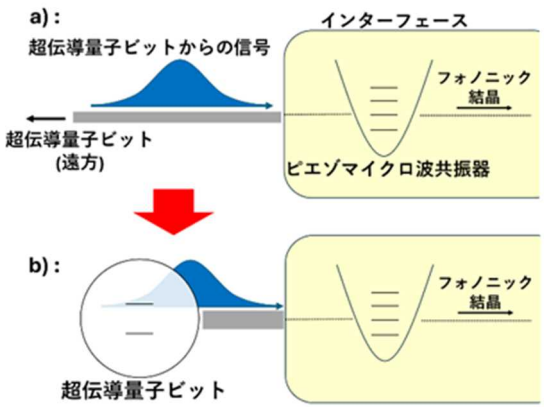


図３．超伝導回路による 4K 動作 5 GHz マイクロ波パルス発信器。

研究開発課題３：量子インターフェースの理論研究

超伝導量子ビットから光子量子ビットへの量子メディア変換について、変換効率の向上という観点から理論研究を行いました。マイクロ波信号を共振器が完全吸収するための理論を見直し、改良することで、当初の想定よりもはるかに短い導波路で超伝導量子ビット－インターフェース間をつないで（図４）、信号を高効率変換させる手法を示しました。そして、インターフェースがマイクロ波信号を完全吸収できれば、効率が 10%を超え得ることを確認しました。また、導波路の短縮が可能になったことで、将来的なインターフェースの集積性を向上させることができました。

図４．信号を完全吸収させるための導波路概念図。(a) 従来型。長い導波路を要する。(b) 本研究で可能になった改良型。導波路は信号パルス長より短くてもよい。



3．今後の展開

マイクロ波共振器やフォトニック結晶といった構成要素が完成してきたため、今後は各素子の統合を進めていきます。ピエゾマイクロ波共振器の性能向上を図りつつ、量子メモリを備えたオプトメカニカル共振器との融合を図り、超伝導光量子インターフェースの実証を目指します。

国立研究開発法人 科学技術振興機構 Japan Science and Technology Agency