

研究開発テーマ名

ダイヤモンド量子メモリ

2022年度までの進捗状況

1. 概要

本プロジェクトでは、分散型量子コンピュータの実現に向けた量子コンピュータと量子通信の統合システムを目指し、超伝導量子コンピュータチップを光ファイバー量子通信で接続する量子インターフェースを開発しています（図1）。量子メモリとオプトメカニカル結晶をコアとし、ダイヤモンド成長、ナノ加工から3D実装まで一貫開発します。本研究開発テーマでは、量子メモリの基本機能となる量子もつれ光源開発、誤り耐性汎用量子ゲート操作、完全ベル測定の実証、ピエゾ構造作製、ダイヤモンド高純度結晶成長、色中心探索を行います。

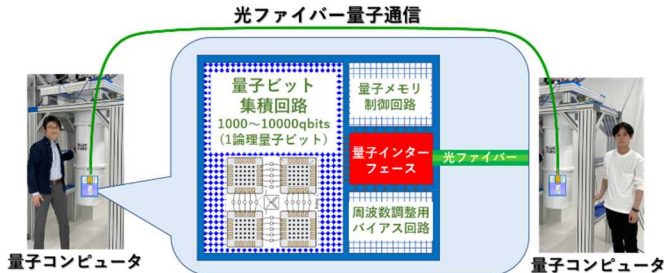


図1. 量子コンピュータ間の光ファイバー量子通信

2. 2022年度までの成果

研究開発課題1：ダイヤモンド量子メモリの研究開発

- 量子もつれ光源開発

ダイヤモンド中の窒素空孔 (NV) 中心を用い（図2）、光子と電子の間の量子もつれ生成を、目標とした85%以上を大きく上回る98%の忠実度で実現しました。

- 量子メモリの誤り耐性汎用量子ゲート操作

NV 中心の電子スピンの対幾何学的量子操作を行い、

誤り耐性のある汎用量子ゲート操作を目標とした99.6%以上を大きく上回る99.97%の忠実度で実現しました。

- 量子メモリ内での完全ベル測定

二つの炭素核スピン間の完全ベル測定を、目標とした87%以上を上回る90%の忠実度で実現しました。

- レーザー照射色中心生成

ナノ構造への決定論的な量子メモリ形成に向け、高強度超短パルスレーザー光の照射によりNV中心の核となるGR1欠陥の生成に成功しました。

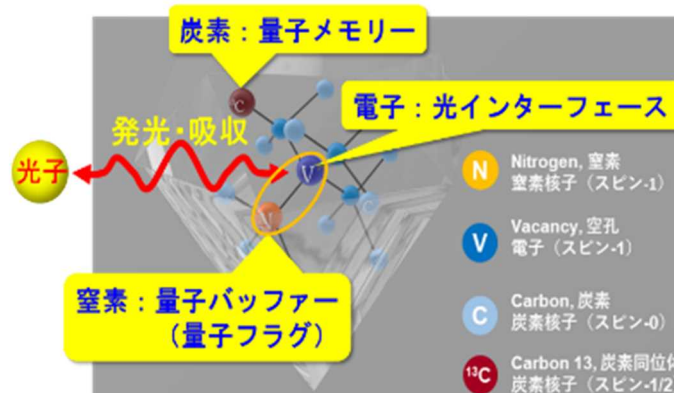


図2. ダイヤモンド NV 中心に内蔵された量子システム

研究開発課題2：ダイヤモンド量子構造の研究開発

- ダイヤモンドナノ構造の作製

電子線描画装置によるサブマイクロパターン形成技術開発を実施し、ダイヤモンドオプトメカニカル共振器や微細楕円電極 (IDT) などのナノ構造を作製しました。

- ダイヤモンドピエゾ構造の作製

窒化アルミニウム (AlN) / ダイヤモンド積層膜上に IDT 電極を形成することで表面弾性波素子 (SAW) を作製し（図3）、～5 GHz の音波（弾性波）発信に成功しました。

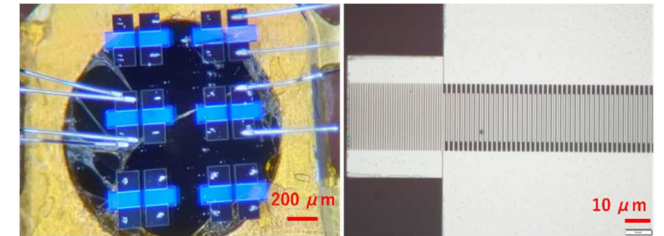


図3. (左) 2ポートダイヤモンド SAW デバイス、(右) 1ポートデバイスでの電極の拡大図

研究開発課題3：ダイヤモンド量子結晶の研究開発

- ダイヤモンド高純度結晶成長

NV 中心について、電荷状態を安定化およびスペクトル拡散を低減するためのダイヤモンド高純度結晶成長および不純物制御を行いました。

研究開発課題4：ダイヤモンド色中心の研究開発

- ダイヤモンド色中心の探索

主流の NV 中心、SiV 中心の他に GeV 中心、SnV 中心、Pb 中心を形成するためのビーム開発を行いました。NV 中心近くに炭素を打ち込むための L-アルギニンビーム形成に成功しました（図4）。

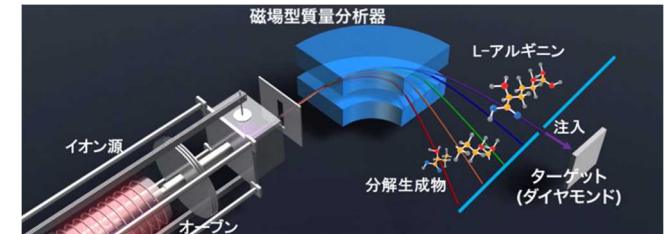


図4. ダイヤモンドへのL-アルギニンイオン注入

3. 今後の展開

量子メモリをダイヤモンドオプトメカニカル共振器中に形成し、別途開発中のピエゾマイクロ波共振器と結合することで、超伝導光量子インターフェースの実証を目指します。

研究開発テーマ名

オプトメカニカル共振器

2022年度までの進捗状況

1. 概要

量子コンピュータの候補は多数ありますが、ダイヤモンドのポテンシャルは他の物理系に引けを取りません（図1）。本プロジェクトでは、超伝導量子と光量子をダイヤモンドで量子接続する超伝導量子インターフェースを開発し（図2）、大規模な分散型超伝導量子コンピュータの実現を目指しています。本研究開発テーマでは、その構成部品となるオプトメカニカル共振器の開発を行います。これまでにフォトニック結晶光共振器およびフォノン結晶音共振器、およびダイヤモンド導波路から光回路への接続構造の設計を進めたほか、エアブリッジ型ダイヤモンドフォトニック結晶ナノビーム共振器構造を実現しました。

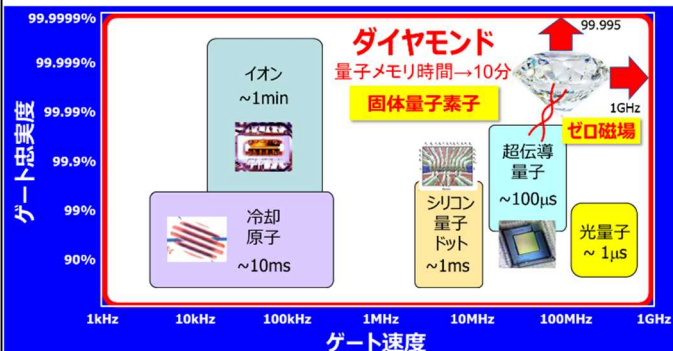


図1. 量子コンピュータを構成する物理系の候補と性能比較

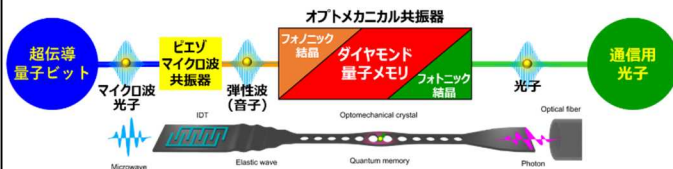


図2. 量子IFにおけるオプトメカニカル共振器の役割

2. 2022年度までの成果

研究開発課題1：フォトニック結晶光共振器の研究開発

・ダイヤモンドと窒化アルミニウム (AIN) の積層構造からなるフォトニック結晶共振器において、ダイヤモンド色中心からの発光増強度の目安となるパーセル係数が、当初設定した目標値 (100 以上) を大きく超える構造を見いだしました。

・ダイヤモンドオプトメカニカル共振器の作製技術開発を実施し、エアブリッジ型ダイヤモンドフォトニック結晶ナノビーム共振器構造の実現に成功しました（図3）。また、AIN 膜のドライエッチング加工を実施するなど、集積化に向けた基礎的検討も行いました。

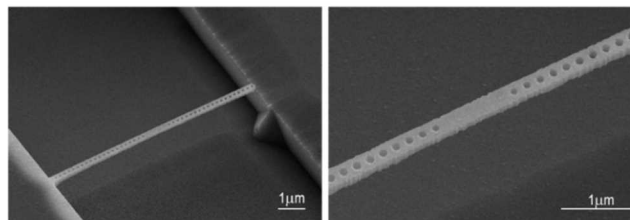


図3. ダイヤモンドエアブリッジ型フォトニック結晶ナノビーム共振器構造のSEM写真

研究開発課題2：フォトニック結晶光共振器実装技術開発

・光ファイバからオプトメカニカル共振器までの結合構造（図4）において、損失 10 dB 以下の設計を行うことを目標としました。具体的に、ファイバ結合器と光配線のために窒化ケイ素 (SiN) 導波路を想定し、圧電材料である AIN とダイヤモンドの積層導波路にはテーパ結合を採用しました。さらに、同導波路からオプトメカニカル共振器への結合では共振器端部をアポダイゼーションすることで臨界結合を目指しました。その結果、ファイバから共振器までの総損失として 1.49 dB を見積もりました。結合ありのときの光の Q 値は約 8 万ですが、これを適度に抑制することで

さらに低損失が見込めます。

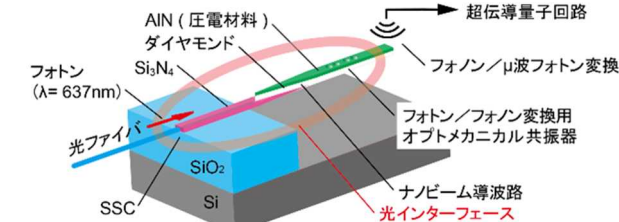


図4. 光インターフェースの構成

研究開発課題3：フォニック結晶音共振器の研究開発

・フォノンおよび光子を同時に狭い領域に強く閉じ込め、量子メモリと飛躍的に強く結合するダイヤモンドオプトメカニカル共振器の設計を行いました。目標値を大きく上回る共振器性能を示し、量子メモリを介したマイクロ波-通信波長帯光子の変換効率を評価しました（図5）。

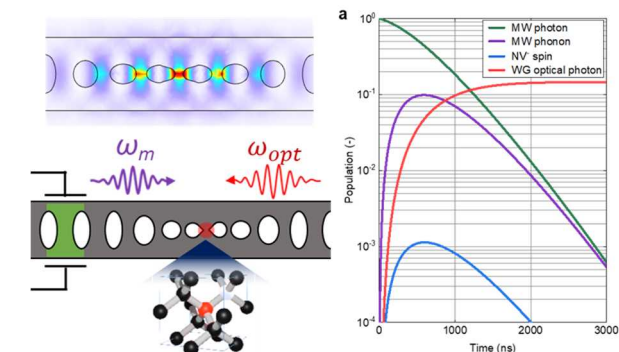


図5. ダイヤモンドオプトメカニカル共振器系におけるマイクロ波-通信波長帯光子変換シミュレーション

3. 今後の展開

ダイヤモンドオプトメカニカル共振器の実現と性能向上とともに、量子メモリやピエゾマイクロ波共振器との融合を図り、超伝導量子インターフェース実証を目指します。

研究開発テーマ名

ピエゾマイクロ波共振器

2022年度までの進捗状況

1. 概要

量子コンピュータの最有力候補は超伝導量子ビット方式ですが、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通信光子でつなぐ量子インターフェースを開発し、大規模な分散型超伝導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を作製して音子(弾性波)を生成し、その音子によりNV中心量子メモリの量子操作に成功しています。

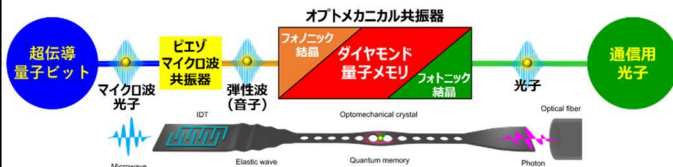


図1. 量子IFにおけるピエゾマイクロ波共振器の役割

2. 2022年度までの成果

研究開発課題1：ピエゾマイクロ波共振器の研究開発

・ピエゾマイクロ波共振器の材料探索、構造設計

マイクロ波光子を波長が5桁短い通信光子と同程度の波長(~1mm)の音子に変換するため、ピエゾ材料の窒化アルミニウム(AlN)をダイヤモンド上に形成し、ダイヤモンド表面弾性波素子を作製しました(図2)。

・マイクロ波から音子への変換

超伝導量子ビットと整合性の高い5GHzのマイクロ波から音子を生成し、その音子によりNV中心量子メモリの量子操作に成功しました(図2a)。

・マイクロ波による量子メモリの量子操作

マイクロ波の電場によるNV中心量子メモリの量子操作

にも成功しました(図2b)。また、さらなる高効率化に向けてQ値8,000のマイクロ波共振器を作製しました。

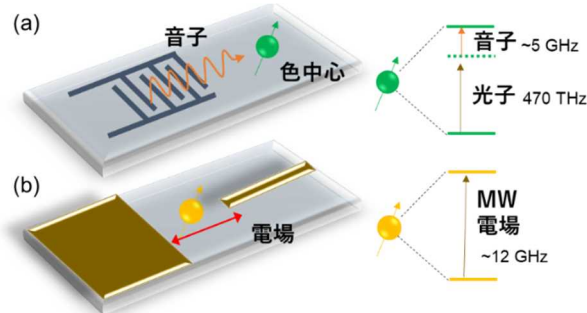


図2. (a) 音子、(b) 電場による量子メモリ制御の概要

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100GHz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5GHzのマイクロ波パルスを生成します。これまでに、基本構成要素である100GHz SFQパルス発生器と超伝導フィルタの基本動作を実証しました(図3)。

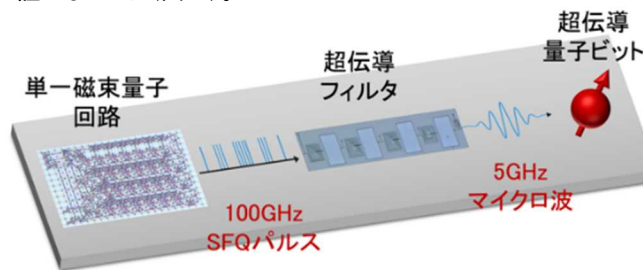


図3. 超伝導回路による4K動作5GHzマイクロ波パルス発信器

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マイクロ波光子量子ビットへの量子メディア変換について、超伝導量子ビット—通信波長帯光子量子ビット間インターフェースの第一歩という観点から理論研究を行いました。超伝導量子ビットと周波数にエンコードしたマイクロ波光子量子ビットとの状態交換(SWAP)ゲートを、単一光子レベルの微弱な古典マイクロ波パルスを用いて実証する方法を理論提案し、双方向の量子状態転写が起きていることを確認しました。状態転写の忠実度は、マイクロ波光子から超伝導量子ビット方向で0.829、超伝導量子ビットからマイクロ波光子方向で0.801に達しました(図4)。

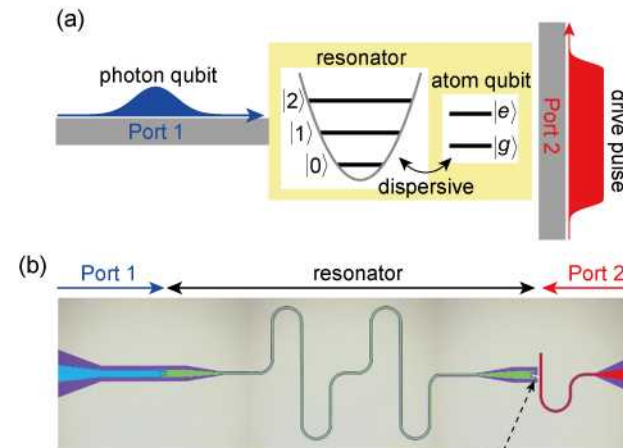


図4. 超伝導量子ビット—マイクロ波光子量子ビット間交換ゲート。(a) 概念図、(b) デバイスの顕微鏡写真

3. 今後の展開

ピエゾマイクロ波共振器の性能向上を図るとともに、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、超伝導量子インターフェースの実証を目指します。