

研究開発テーマ名

# 原子ネットワーク型技術

## 2022年度までの進捗状況

### 1. 概要

本研究開発テーマでは、周期律表にあるような自然に存在する原子を量子ビットとして用いて構成した原子量子コンピュータをネットワーク接続するための量子インターフェースやそれに必要な光子検出技術を開発します。この研究開発テーマの達成により、原子量子コンピュータをはじめ、様々な量子コンピュータの大規模化に向けたネットワーク接続の要素技術が確立し、プロジェクトの目指すネットワーク型量子コンピュータによる量子コンピュータの大規模化の実現、ムーンショット目標6で目指す誤り耐性汎用量子コンピュータの実現に貢献します。

この達成に向けては、原子と光子の量子もつれを大規模に用意してネットワーク接続することが課題となっており、この点を挑戦的テーマとして取り組んでいます。従来、1量子ビット対1量子ビットの接続のみの実証にとどまっていた量子ビット接続を多量子ビット対多量子ビットで実現する発想で、原子、光回路、光子検出器などの要素技術を多重化する試みに取り組んでいます。

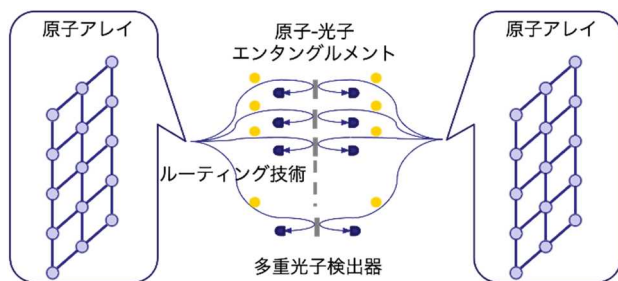


図1 本研究開発テーマの目指すネットワーク型原子量子コンピュータの概念図

これらの開発した要素技術のうち、他の研究開発テーマや他のプロジェクトで利用可能なものは、積極的に連携して、ムーンショット目標6全体の達成に貢献します。

### 2. 2022年度までの成果

- (1) Rb 原子アレイの作成と光子検出システムの構築および論理量子ビット間の Bell 状態蒸留の提案
- (2) 多重化ネットワーク接続のための“Optical frequency tweezers”の提案と実証および光量子コンピュータの提案
- (3) 波長 710nm、780nm、850nm 帯に対応する超伝導ナノワイヤ光子検出器 (SNSPD) 素子の開発を実施し、各波長帯において 70%を超える検出効率、1 カウント/秒を下回る暗計数率を達成。特許出願6件
- (4) 超伝導ナノワイヤ光子検出器 (SNSPD) を 12 チャンネル搭載し 2.3K 以下まで冷却するための冷凍機システムを開発。更に 32ch チャンネルの冷凍機システムの開発に成功。

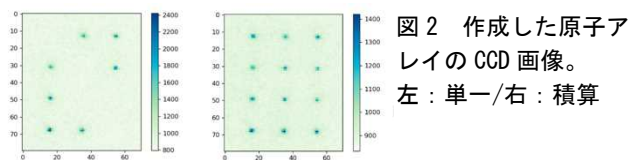


図2 作成した原子アレイの CCD 画像。  
左：単一/右：積算

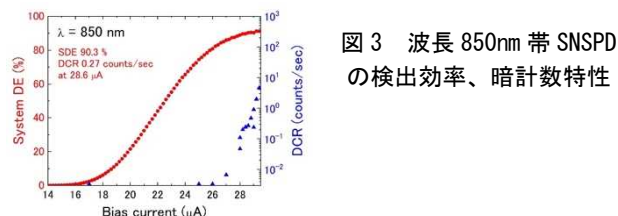


図3 波長 850nm 帯 SNSPD の検出効率、暗計数特性

上記において、(1)は量子プロセッサとして動作する原子量子ビットのアレイの実現と光との量子もつれを確認するための光子検出システムおよび量子プロセッサ間の量子もつ

れ蒸留プロトコルの提案です。(2)はネットワーク接続するための光子のルーティング技術のための要素技術、(3)は各量子プロセッサと量子もつれにある光子に対して、Bell 測定を行うための高効率かつ低暗計数率の超伝導ナノワイヤ光子検出器 (SNSPD) 素子の開発、(4)は多重化された光子を検出するための多重化された SNSPD 素子のシステム開発として研究開発を推進しています。



図4 G7にて展示した 32ch SNSPD 冷凍システム SNSPD パッケージを 32 個搭載し、冷却温度 2.12 K に冷却可能な SNSPD 冷凍システムを開発。光信号入力と駆動及び信号読み出しのポートを備える。

### 3. 今後の展開

これまでの研究成果において、原子アレイの量子プロセッサの要素技術の獲得および量子プロトコルの提案、多重化された光子源からの光子をルーティングする技術の動作原理の実証、SNSPD の対応波長の拡大と高性能化、SNSPD の多重化に対応した冷凍機システムを 32 チャンネル規模（世界最大規模）まで実証しました。今後は、これらによるネットワーク化を目指します。

研究開発テーマ名

# 光子ネットワーク型技術

## 2022年度までの進捗状況

### 1. 概要

光子量子ビットは他の量子系と比較して格段に高い coherence を持ち、室温においても全く量子性を失わず、光ファイバーによって長距離伝送できるという優れた特長を持っています。また、線形光学素子によって任意の1量子ビット操作を高いフィデリティで簡単に実現できます。さらに、時間多重により、光子源の数と比較して多くの量子ビットを使うことができます。

光子量子ビットによる量子計算の世界的な研究・開発動向においては、パラメトリック下方変換と光子検出に基づいた方式が主流となっています。しかしこの方式は光子量子ビット源・光子クラスター状態源（図1）等の必須の要素の動作が確率的であるため、有意な規模の実装には膨大なリソースが必要であるという大きな課題を抱えています。これらの要素を決定論的に動作する手法で実現できれば、光子量子ビットによる量子計算の大幅な効率化が可能とな

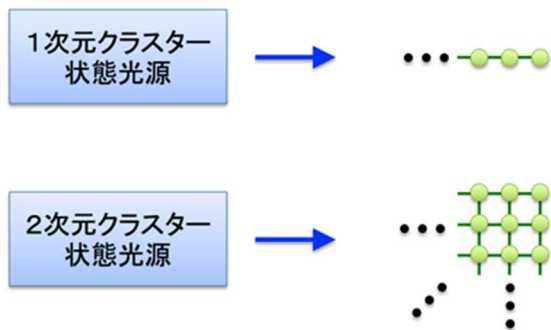


図1：光子クラスター状態源

ります。

上述の要素を決定論的に動作させるには光と原子の強い相互作用が必要ですが、これは共振器 QED 系（図2）によって実現できることが理論的に提案されており、近年によって部分的な原理実証実験も報告されています。

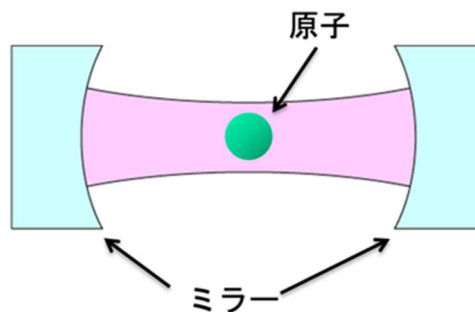


図2：共振器 QED 系

しかし、共振器 QED 系に基づいたこれらの要素技術はいまだに光量子コンピュータの実装に実際に導入されてはいません。これは、従来の共振器 QED の実験が自由空間バルク共振器を用いたものであり、ファイバー光学との整合性が悪い上に、極度に複雑で精密な調整・制御が必要なため、損失を低く抑えつつ多数の共振器 QED 系を連結してそれらを同時に使用することが極めて困難なためです。

本研究開発テーマでは、NISQ 規模の光子量子コンピュータの実現を目指し、ナノファイバー共振器 QED 技術に基づく光子ネットワーク技術を開発します。

### 2. 2022年度までの成果

光子ネットワーク技術に適したナノファイバー共振器 QED 系を立ち上げました（図3）。

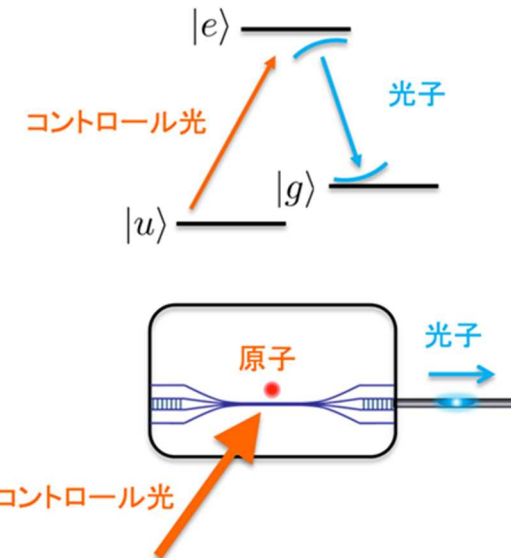


図3：ナノファイバー共振器に基づく単一光子生成

また、セシウム原子 D2 線の  $\Lambda$  型3準位構造を利用し、真空誘導ラマン断熱過程 (vacuum-stimulated Raman adiabatic passage; vSTIRAP) による単一光子生成技術を開発しました。さらに、量子中継の標準的技術である Duan-Lukin-Cirac-Zoller スキームの要素技術を開発しました。

### 3. 今後の展開

ナノファイバー共振器 QED 技術に基づく光子ネットワーク技術、特に光子量子ビット生成技術および光子クラスター状態生成技術の研究開発を推進していきます。

研究開発テーマ名

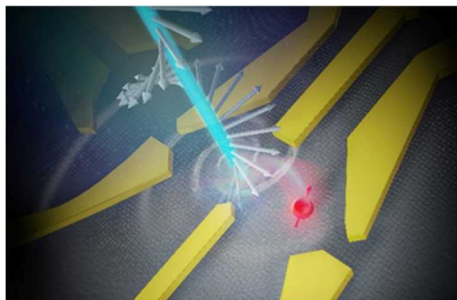
# 半導体ネットワーク型技術

## 2022年度までの進捗状況

### 1. 概要

本研究開発テーマでは、半導体量子ドット中の電子や正孔の持つスピンを量子ビットとする半導体量子コンピュータをネットワーク化するための光子とシリコン量子ビットの量子インターフェース技術とシリコン量子ビット間結合技術を開発します。加えて半導体量子コンピュータの光ネットワーク接続技術の開発も推進します。これらの研究開発テーマの達成により、半導体量子コンピュータのネットワーク化の要素技術を確立し、ネットワーク型量子コンピュータによる大規模化を開拓します。これにより目標6で目指す誤り耐性汎用量子コンピュータ実現に貢献します。

この達成に向けて、シリコン量子ビットで構成されるNISQ 規模の量子コンピュータをネットワーク化するシリコン量子ビット間の中長距離接続技術や、通信波長帯光子との量子インターフェースとしてのゲルマニウム正孔量子ドット、さらにもつれ光子対から遠隔スピン量子ビット間のもつれ生成など、半導体量子ビットの高い電気制御性、集積性、さらに光デバイスとしての通信波長帯光子との結

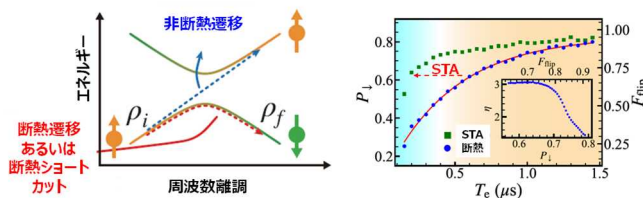


スピン量子ビットにおいて単一光子から単一電子スピンへの量子状態変換を行う量子インターフェースの概念図

合など多くの利点を生かした新しい量子インターフェースとネットワーク化基盤技術の開発に挑戦します。これまでは単一光子から単一電子スピンへの量子状態変換の実証にとどまっており、本プロジェクトで、シリコン量子コンピュータのネットワーク化と光ネットワーク接続による大規模化を目指した要素技術の研究開発を推進します。

### 2. 2022年度までの成果

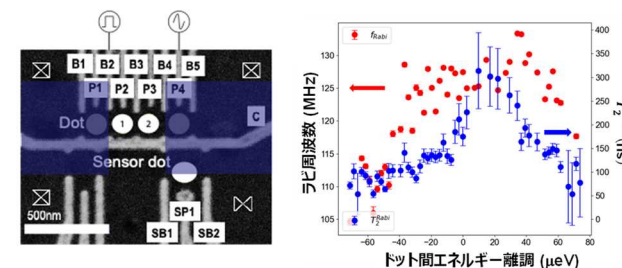
① 半導体スピン量子ビットに対する断熱ショートカット  
シリコン量子ビット間の中距離接続技術として、1次元スピン量子ビットに電子スピン鎖を形成し、その両端のスピン間の交換相互作用の断熱操作により、量子状態を端から端へ転写する断熱量子状態転写があります。しかし断熱遷移を利用しているため、スピン鎖が長くなるにつれて、断熱操作に時間を要するという課題があります。一般に断熱操作に対する断熱ショートカットという高速化の方法が知られていますが、スピン量子ビットではまだ報告されていません。我々は単一スピン量子ビットの反転操作に対して、非断熱過程を抑制する制御項を加えることで、断熱ショートカットを初めて実現しました。これは上記の断熱量子状態転写の課題の解決につながる可能性があります。



(左) 断熱ショートカットの模式図。常に基底状態をたどって高速にスピン状態が反転。(右) スピン反転確率の操作時間依存性。断熱遷移(●)に比べて断熱ショートカット(■)では短い操作時間で高い反転確率が達成されている。挿入図はスピードアップ因子 $\eta$ を示す。

② 2重ドット中のドット間遷移を利用した高速・高忠実度電子スピン操作の実現

従来、電子スピン操作は単一量子ドット中で行われていましたが、これを多重ドットに拡張し、量子ドット間遷移を利用することで実効的に電気双極子モーメントを増強し、電子スピン操作を高速化することに成功しました。さらにこの高速スピン操作の条件ではラビ緩和時間も最大化され、GaAs 量子ドットとしては最高の99%を超える高忠実度操作を実現しました。この成果は、本プロジェクトで取り組む、シリコンスピン量子ビット間結合や光子との量子インターフェースのための、スピン量子ビットと超伝導共振器との結合をより強くする方法として検討します。



(左) GaAs 多重量子ドットの電子顕微鏡写真。微小磁石(青四角)の間で二重量子ドットを用いた。(右) ラビ周波数(●)とラビ緩和時間(●)の二重量子ドットのドット間エネルギー離調依存性。100 MHz を超える高速操作と長いラビ緩和時間が離調ゼロ付近で実現できている。

### 3. 今後の展開

今後は、通信波長で動作するスピン量子ビットとしてゲルマニウム量子ドットを確立し、光子—スピン量子インターフェースを確立するとともに、上記の高忠実度操作をもとに超伝導共振器との複合素子の開発を進めます。これはシリコン量子ビットと光子との接続のための量子インターフェースとシリコン量子ビット間結合の両方に有用です。また半導体量子ビットの光ネットワーク化のために、もつれ光子対を導入しもつれ配信の研究へと展開していきます。

研究開発テーマ名

# 超伝導ネットワーク型技術

## 2022年度までの進捗状況

### 1. 概要

超伝導方式の量子コンピュータのネットワーク化技術に向けた「量子トランスデューサー」を開発します。超伝導量子ビットの量子情報「マイクロ波光子」を極低温において光波長の光子へ変換するトランスデューサーに注力して研究を行います。トランスデューサーの媒体として、ダイヤモンド結晶中のシリコン空孔中心（SiV 中心）の電子スピン集団によるマイクロ波遷移と光遷移を利用し、レーザー励起により波長変換を行います。

この達成に向けては、バルクダイヤモンド結晶を含んだ光共振器の実装、極低温における光共振器の安定動作、およびマイクロ波共振器との複合化等が課題となっており、この点を挑戦的テーマとして取り組んでいます。この課題を達成するために、振動が非常に低レベルな特殊な仕様の冷凍機を考案・設計して使用しています。

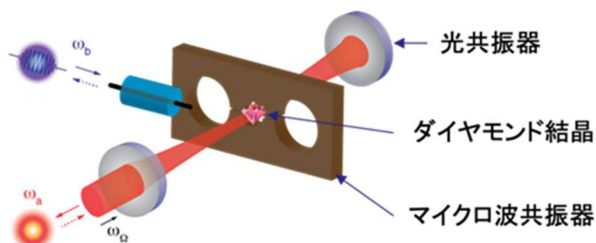


図1 本研究開発テーマの目指す量子トランスデューサーの概念図。

### 2. 2022年度までの成果

① 無冷媒希釈冷凍機中に設置した光共振器を極低温にお

- ② 片側に反射防止膜、もう片側に高反射膜をコートしたバルクダイヤモンド結晶が光共振器中に置かれた状態でも光共振器を安定動作させることに成功しました。
- ③ マイクロ波—光複合共振器デバイスの設計・試作・評価を極低温において行いました。
- ④ 本研究開発で取り組んでいる量子トランスデューサーのシミュレーションを行いました。

上記において、①は超伝導や半導体方式の量子コンピュータに必須な極低温環境を実現する無冷媒希釈冷凍機内で光共振器を動作させることに成功しました（図2）。無冷媒希釈冷凍機内ではコールドヘッドのパルス管が振動するので、パルス管を運転した状態で光共振器を安定的に動作させることは難易度が高いとされていましたが、これを実証しました。②はバルクのダイヤモンドが内部に置かれた光共振器が安定的に動作することを実証し、本研究開発で取

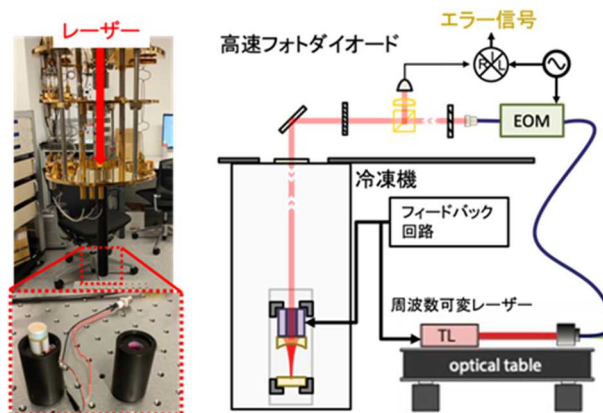


図2 無冷媒希釈冷凍機内で実現した光共振器の安定動作。(左) 冷凍機とテストした光共振器。(右) 実験セットアップ。

り組んでいる量子トランスデューサーの方式が原理上動作することを示すことができました。

③は本研究開発で取り組んでいる量子トランスデューサーデバイスの設計そのものです。ダイヤモンド結晶をマイクロ波と光共振器の両方のモード内に置く必要があるため、これを実現する複合共振器デバイスを設計・試作・評価しました（図3）。④は本研究開発で取り組んでいる量子トランスデューサーのマイクロ波—光変換の理論を構築し、変換効率をシミュレーションしました（図3）。

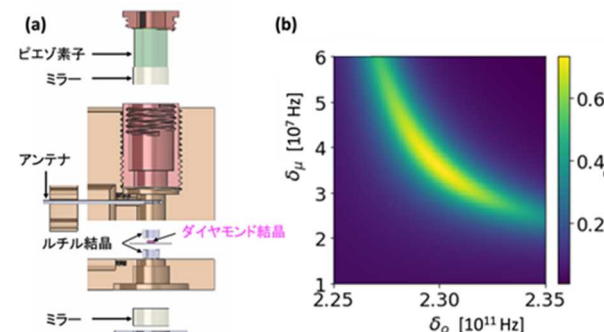


図3 (a) 複合共振器デバイス。(b) 本研究開発で取り組んでいる量子トランスデューサーの変換効率のシミュレーションの一例。変換効率がマイクロ波と光の周波数離調に対して色プロットされている。

### 3. 今後の展開

今後は、本研究開発で取り組んでいる量子トランスデューサーデバイスを用いて、まず古典的なマイクロ波信号および光信号のマイクロ波—光変換を実証します。その後、超伝導量子ビットで作り出した量子状態の変換を実証します。超伝導量子コンピュータプロジェクトの山本剛 PM や、Q-LEAP「超伝導量子コンピュータの研究開発」の中村チームリーダーらと連携しながら研究を進めていきます。