

研究開発項目

1. 原子ネットワーク型技術

2023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 用型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。



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. これまでの主な成果

- (1) Rb 原子アレイの作成と光子検出システムの構築を行い、 単一光子検出に成功、これに加えて、論理量子ビット間 の Bell 状態蒸留方式を提案
- (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、光量子コンピュータ提案
 (3) 波長 710nm、780nm、850nm 帯に対応する超伝導ナノワイア光子検出器(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。2023 年度には、90%を超える検出効率と1カウント/秒を下回る暗計数率の両立を実現しました。従来の常識を打破する新奇構造をもつワイドストリップ型の SWSPD 素子を開発しました。特許出願11件
 (4) 超伝導ナノワイア光子検出器(SNSPD)を 12 ch 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 の冷凍機システムの開発に成功し、32ch のSNSPD を搭載し動作確認に成功、90%を超える検出効率も達成しました。



前記成果において、(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を接続し、大規模化するための要素 技術および提案です。(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ア光子検出 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 完成した 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。光信号入力と駆動及び信号読み出しのポートを備え ています。国内最大・世界最大級。G7 でも展示。

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 ch 規模まで実証し ました。今後は、これらを統合して、原子アレイのネット ワーク接続による大規模化を目指します。



研究開発項目



2. 光子ネットワーク型技術

2023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コヒ ーレンスを持ち、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 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、近年にな って部分的な原理実証実験も報告されています。

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



図 2 : 共振器 QED 系

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。



図3:ナノファイバー共振器 QED に基づく1次元光子ク ラスター状態生成スキーム

また、セシウム原子 D2 線の A 型3準位構造を利用した 新規なスキームに基づく1次元光子クラスター状態生成技術(図3)の実現に向けた要素技術の開発を進めました。

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。







^{研究開発項目} 3. 半導体ネットワーク型技術

2023年度までの進捗状況

1. 概要

本研究開発項目では、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 項目の達成により、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 す誤り耐性型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 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. これまでの主な成果

(1)シリコンスピン量子ビット間結合、光子--シリコン量
 子ビット間量子インターフェースのための超伝導共振
 器--量子ドット強結合系の実現

超伝導共振器のマイクロ波とスピン量子ビットを結合さ せ、チップ上で離れたシリコン量子ビット間さらには小規 模シリコン量子コンピュータ間の結合の実現を目指してい ます。この方法は 100 µm 以上の比較的長距離の結合が可 能になる特徴があります。そのためにはスピン量子ビット とマイクロ波光子とのより強い結合が必要です。これを実 現するために独自の知見として多重量子ドットでの高速ラ ビ振動とノイズ抑制法を導入し、離れたシリコン量子ビッ ト間をより高速にかつ高精度で結合することに取り組んで います。そのために NbTiN 高インピーダンス超伝導共振器 を設計・作製しました。また共振器と結合させる多重量子 ドットの設計と作製も進めています。

(2) ゲルマニウム量子インターフェースに向けた光照射下の安定性の評価

光ネットワークとシリコン量子コンピュータを接続する 量子インターフェースとして通信波長にバンドギャップを 持つゲルマニウムスピン量子ビットが有望です。我々は本 プロジェクトで光子偏光状態から正孔スピン状態への量子 状態変換の独自方法を提案しています。量子インターフェ ース動作では、従来の砒化ガリウム量子ドットでは、光照 射により欠陥準位から電子濃度が永続的に生成され、量子 インターフェース動作を不安定にさせる一因になっていま した。そこで量子ドットを形成するゲルマニウム量子井戸 基板に対する量子状態変換波長の光照射の影響を調査した ところ、顕著な正孔濃度の変化は観測されず、光照射下で も安定して動作する可能性を示しました。

またこれまでの砒化ガリウム量子インターフェースでの 知見を加えてゲルマニウム量子インターフェースのための ゲルマニウム正孔量子ドットの開発を推進しています。



図 2:ゲルマニウム量子ドット用ゲート電極の電子顕微鏡 写真

3. 今後の展開

今後は、早期にゲルマニウム量子ドットを実現し、量子 インターフェースとしての動作確認を行うとともに、超伝 導共振器とシリコンやゲルマニウムスピン量子ビットの強 結合の原理実証を行い、超伝導共振器によるシリコン量子 ビット間結合と、ゲルマニウムスピン量子ドットを介した 光子—マイクロ波光子量子インターフェースの実現へと展 開します。また光ネットワーク化によって大規模化を図る ため、もつれ光子対から遠隔2スピン量子ビット対のもつ れ生成の実現を目指します。





研究開発項目

4. 超伝導ネットワーク型技術

2023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 ヤモンド結晶中の窒素空孔中心(NV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で特殊な仕様の 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. これまでの主な成果

無冷媒希釈冷凍機中に設置した光共振器を極低温にお

いても安定的に動作させることに成功しました。

- 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 でも光共振器を極低温において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 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



図 2(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。 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ので、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2)。また、 極低温においてこの複合共振器デバイスを用いて電子スピ ン共鳴の実験を行い、スピン集団との強結合や緩和時間測 定に成功しました(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2)。



図 3(a) 複合共振器デバイスのマイクロ波共振器とダイヤモン ド中の窒素不純物アンサンブルとの強結合。(b)パルス測定の一 例。ラジカル電子スピンの位相緩和時間測定の一例。

3. 今後の展開

今後、本研究開発で進めている量子トランスデューサー デバイスを用いて、微弱なコヒーレントマイクロ波信号お よび光信号のマイクロ波-光変換を実証します。超伝導量子 ビットの量子状態測定や、超伝導量子ビットで生成した量 子状態の光変換を実現し、超伝導量子コンピュータのネッ トワーク化に貢献します。また超伝導量子コンピュータプ ロジェクトの山本剛 PM、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、量子コン ピュータの実用化に向けた取り組みを加速していきます。

