

青木 隆朗

早稲田大学理工学術院
教授

スケーラブルな光学的量子計算に向けた超低損失ナノファイバー 共振器 QED 系の開発

§ 1. 研究成果の概要

光子を量子ビットとして用いる光学的量子計算は、量子計算の実装の有力な候補であり、量子情報分野の最初期からの主要な研究対象の1つである。単一光子源・2量子ビットゲート・クラスター状態源といった、光学的量子計算において重要な要素技術は、共振器量子電気力学(QED)系によって決定論的に動作するものが実現可能である。実際の実装においては、光損失やエラーに対して誤り訂正を施し、かつ、スケーラブルな量子計算(誤り耐性量子計算)が求められるが、共振器 QED に基づく光学的量子計算の実装に関するスケーラビリティの検討はこれまであまりなされておらず、また、スケーラブルな量子計算を可能にする共振器 QED 系も開発されていない。本研究では、スケーラブルな光学的量子計算の実装を可能にする超低損失ナノファイバー共振器を開発し、光学的量子計算の要素技術をナノファイバー共振器 QED 系で実現する。また、このアプローチにおける各要素技術、および、それらを組み合わせて構築される誤り耐性量子計算のアーキテクチャ全体の最適化に関して理論的研究を推進する。2019 年度の成果は以下の通りである。

[1] 超低損失ナノファイバー共振器の開発

大面積位相マスクを作製し、これを用いて超低損失 FBG の作製を進めた。また、超低損失テーパーファイバー精密評価装置を立ち上げ、従来と比較して高い精度でテーパーファイバーの損失を評価する技術を開発した。さらに、ナノファイバー導波モード干渉スペクトログラム測定システムを構築し、ナノファイバー作製中にその直径をリアルタイムで正確に測定する技術を開発した。

[2] 光学的量子計算の要素技術実証

2 つのナノファイバー共振器 QED 系を全ファイバーで接続した結合共振器 QED 系に対して、結合共振器 QED 系の持つ5つの固有モード全ての観測と同定に成功した。特に、原子が配置された共振器中の光子の励起のない「共振器暗モード」の観測に成功した。この成果を

Physical Review Letters 誌に発表した。

[3]最適化に関する理論

スケーラブルな光学的量子計算に向けた優れた単一光子生成を目指すにあたり、共振器の内部損失を用いて定義される内部協同パラメータが共振器 QED を用いた単一光子生成の性能指数となることを明らかにした。また計算速度を上げるために、パルス長を短くしたときの光子生成効率の理論限界を導出し、パルス長を短くしても大きく生成効率が減少しない限界パルス長を見出した。二量子ビットゲートに対しては、光子損失確率およびインフィデリティをともに考慮し、誤り耐性を最大化するように外部結合効率を最適化し、誤り耐性量子計算に必要な内部協同係数の閾値を導出した。さらに実装面の詳細を考慮し、原子との相互作用による光子のパルス遅延から来るエラーを減らすための共振器パラメータの最適化や共振器 QED を用いた量子ゲートに適した誤り耐性量子計算アーキテクチャを検討した。

【代表的な原著論文】

1. D. H. White, S. Kato, N. N emet, S. Parkins, and T. Aoki, "Cavity Dark Mode of Distant Coupled Atom-Cavity Systems", Phys. Rev. Lett. 122, 253603 (2019)
2. H. Goto, S. Mizukami, Y. Tokunaga, and T. Aoki, "Figure of merit for single-photon generation based on cavity quantum electrodynamics", Phys. Rev. A 99, 053843 (2019)

§ 2. 研究実施体制

(1) 早稲田大学グループ

- ① 研究代表者: 青木 隆朗 (早稲田大学理工学術院 教授)
- ② 研究項目
 - [1] 超低損失ナノファイバー共振器の開発
 - [2] 光学的量子計算の要素技術実証

(2) 明治大学グループ

- ① 主たる共同研究者: 金本 理奈 (明治大学理工学部 准教授)
- ② 研究項目
 - [3] 最適化に関する理論