

研究終了報告書

「非線形光学効果を利用した大規模量子シミュレータの開発」

研究期間：2018年11月～2022年3月

研究者：小野 貴史

1. 研究のねらい

「シリコン光導波路」は、拡張性や制御性が良く、エレクトロニクスとの相性が良いといった利点があり、光古典技術だけではなく光量子技術を実装するためのプラットフォームとしても盛んに研究されている。特に、シリコン光導波路は CMOS 技術との相性が良く、線形光学素子である干渉計を複数組み合わせることで、プログラマブルな光量子回路を容易に実現することができる。

このような背景の下、研究代表者は非線形光学素子を用いた干渉計をシリコン導波路上で実装し、その量子干渉効果を観測することに成功した。ここでいう非線形光学は、物質の光学応答に電場の2次以上が関与する光混合で、線形光学では実現できなかった量子操作が可能となる。しかしながらこの実験は、非線形光学操作を導波路上で実装したという点で新しい研究であったが原理検証にとどまり、この操作を量子情報処理へ積極的に応用したものではなかった。

本研究のねらいは、「非線形光学操作」を光量子回路の中に組み込み、新しい機能性をもつ「大規模量子シミュレータ」を開発することにある。さらに、開発したシミュレータを使って量子アルゴリズムを実装し、古典アルゴリズムでは解くことが難しい問題に挑戦する。研究代表者は、英国ブリストル大学で、シリコン光導波路を用いた光量子デバイスの研究を開始し、光導波路設計、量子もつれ光子対生成、量子状態制御といった量子シリコンフォトンクスに関する様々な経験を積んできた。また、バルク素子を用いて、「量子もつれ顕微鏡」や「量子制御スワップゲート」という新しい量子デバイス開発にも成功している。本研究は、研究代表者がこれまで培ってきた知識と経験を「応用」し、これまで実現されてこなかった、量子アルゴリズムを実装するという挑戦的な研究でもある。

シリコンを基盤とした光量子技術は急速に発展しており、基本量子回路部品の開発から、大規模な集積化、そして実用化へと移行しつつある。さきがけ研究において、非線形光学操作を積極的に利用した大規模量子シミュレータを実装し、量子アルゴリズムを解くことで、この手法の可能性を世界に先駆けて示す。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、シリコン中で生じる非線形光学効果を利用した、(研究テーマ A)「大規模光量子シミュレータの開発」を目的に研究を進め、シリコン光導波路上にプログラマブルな光量子回路を実装した。また実装した光量子回路を使って、量子機械学習の一つである量子分類器を実装した。さらに、当初予定していなかった(研究テーマ B)「オンチップ量子乱数生成に関する研究」も新たに開始した。

研究テーマ A「大規模光量子シミュレータの開発」に関する研究を進めるにあたっては、A-1: 光量子回路の設計、A-2: 光量子シミュレータの評価、A-3: 量子アルゴリズムの実装、と

いう流れで研究を進めた。A-1: 光量子回路の設計については、光量子回路を構成する、ビームスプリッタや量子もつれ光源、また周波数フィルタなどの最適化を行った。A-2: 光量子シミュレータの評価については、チップを評価するための測定系や超伝導光子検出用の冷凍機を立ち上げるとともに、光量子回路上に搭載した量子もつれ光子源を使って 90%以上の高い明瞭度で量子干渉を観測することに成功した。A-3: 量子アルゴリズムの実装では、機械学習と光量子回路を組み合わせた光量子分類器を実装し、90%以上の再現率で分類を行うことに成功した。

研究テーマ B「オンチップ量子乱数生成に関する研究」では、光集積回路の設計・作製に加えて、電気回路の検討を行い、オンチップ量子乱数生成器で得られる性能について見積もりを行った。光集積回路については、シリコン光導波路上にホモダイン測定器を設計および作製することができた。

(2) 詳細

研究テーマA「大規模光量子シミュレータの開発」

A-1: 光量子回路の設計

光集積量子回路を開発するにあたって、最も重要なパートの一つが光量子回路の設計である。本さきがけ研究では新しく独自にシリコン(Si)フォトニクス設計環境を構築した。図1に本研究で設計した光回路部品の一部を示す。各部品の設計では、まず定性的な手法により大雑把な形を決定し、導波路の幅(W)や長さ(L)を変数とすることで構造をパラメライズした(図1参照)。次に、部品の設計パラメータ(例えばLやW)を変えながら、最も性能が高くなるように(時間領域もしくは周波数領域で)導波路シミュレーションを行い、パラメータの値を最適化した【成果リスト 5-(1)-1、5-(3)-2】。その後、設計した各部品を配置・集積化し、光量子シミュレーションが可能な光集積量子回路を設計した。光量子回路は、4入力、4出力の構成とし、干渉計を多段に組み合わせることでプログラマブルな光回路を実現した。以上より、光集積回路を構成する光部品を設計し、量子シミュレーションが可能な光回路を設計できた。

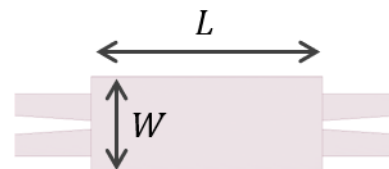


図 1: 半透鏡のデザイン

A-2: 光量子シミュレータの評価

A-1 で設計したデザインをもとに、シリコン光導波路上でプログラマブルな光集積量子回路作製した。チップの大きさは、2mm x 9.1mm である。

簡略化した光量子回路図を図 2 に示す。作製したチップは銅基板の上に置き、ペルチエ素子を使って 0.002 度の安定度かつ室温(25 度)で動作するよう制御した。光と導波路の結合にはスポットサイズ

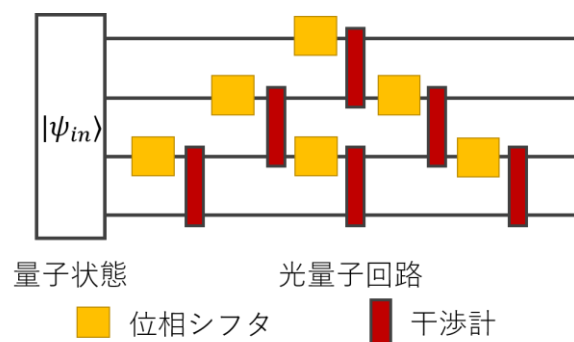


図 2: 光量子回路図。

コンバータを利用し、アレイ型の光ファイバを光導波路へ融着させた。結合損失は 4dB と見積もられた。光導波路の伝搬損失は約 3dB/cm である。光の位相制御は、光導波路上部に配置したヒーター（熱電素子）を使い、局所的に屈折率を変えることで実現した。ヒーターへ印加する電圧はチップ上に配置した電気パッド及び自作のプリント基板を介して制御した。

チップ上には、周波数フィルタを含め複数の干渉計を配置しており、これらを組み合わせることでプログラマブルな光量子回路を実現した。各干渉計を評価したところ、約 30dB 程度の消光比が得られた。また、印加電圧を 3V~8V 変化させた時、干渉計の位相差は 4π 程度変化することを確認した。チップ上にはシリコンの非線形性を利用した量子もつれ光子源を搭載しており、生成したもつれ光子を使って量子干渉実験を行った結果、90%以上の明瞭度が得られた【成果リスト 5-(3)-1】。

A-3:量子アルゴリズムの実装

今回、実装した光集積量子回路を使って、機械学習を利用した光量子分類器を実装した。機械学習の中でも、分類器は教師あり学習という部類に属しており、入力されたデータのある決まったカテゴリーへ分類するものである。今回、光集積量子回路上で光量子分類器を実装した(図 3)。

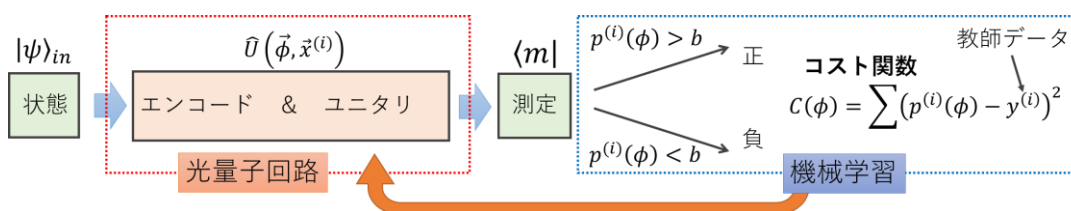


図 3:光量子分類器の概略

まず、任意の量子状態を準備し、光量子回路を使ってユニタリ変換 $U(\phi, x^{(i)})$ を行い、入力状態へ分類したいデータ $x^{(i)}$ をエンコードする(図 2 左)。次にデータがエンコードされた量子状態に対してある特定の出力 $\langle m |$ が得られる確率 $p^{(i)}(\phi)$ を測定する。この時、ある閾値を設け、例えば確率 $p^{(i)}(\phi)$ が閾値よりも高ければ正、低ければ負というように、データを分類する(図 3 右)。光量子回路で実装するユニタリ変換は、機械学習の手法を用い、所望の分類が実装できる(コスト関数ができるだけ小さくなる)ように学習させる。

学習には、教師データを 200 個準備し、機械学習の手法を使って光量子回路を学習した。なお、今回の入力状態には、もつれ光子ではなく相関を持たない 2 つの光子を利用した。また、光量子回路は 4 つの空間モードの内 2 つを使用した。光量子回路を使って分類を行った結果、期待されるように、視覚的に正しく分類できたことを確認できた。また得られた実験結果から、平均 94%の再現率で、正しく分類できていることを確認した。以上より、シリコン光導波路を用いたボソン系での量子分類器(量子シミュレータ)を実証することができた【成果リスト 5-(3)-1】。

研究テーマ B「オンチップ量子乱数生成に関する研究」

「量子乱数」とは、量子力学の確率の概念を利用して生成した乱数のことである。本研究では、フォトダイオード(PD)を搭載したオンチップホモダイン検出器を使って、光の真空場揺らぎ

を測定し、そこから乱数を抽出することを目的とした。本さきがけ期間中では、最初の一步として、オンチップ上に実装した PD を使ったホモダイン検出器の実装に向けて研究を行った。

オンチップ量子乱数源を実現するためには、PD を搭載した光回路を作製することに加えて、PD から得られる光電流を増幅する電気回路を作製しなければならない。さきがけ期間中では、(i)光回路の設計および作製と、(ii)電気回路の検討を行い、オンチップ量子乱数生成器で得られる性能について見積もりを行った。(i)光回路については、マツハツエンダー型の干渉計の出力部に2つの PD を配置し、干渉計の位相を変化させることで2つの PD へ入る光強度を調整できるように設計および作製した。PD はドーピングしたシリコンとゲルマニウムの間での PN 接合を利用し作製した。(ii)電気回路については、トランスインピーダンスアンプ(TIA)を利用する方向で検討を進めた。まずは、表面実装型のオペアンプを使った TIA を検討し、その後集積回路型の TIA 回路の使用について検討を進めた。本研究期間中では、光回路を実装するところまでは達成できたが、電気回路の実装については今後随時進めていく。

3. 今後の展開

今回、光集積量子回路を実装し、2 つの光子を使った簡単なアルゴリズムまで実証することができた。今後は、光源の多光子化や量子回路の多次元化へ取り組み、より複雑なアルゴリズムの実装へと発展させていく。また、並行して、オンチップ型のホモダイン検出器の実装や、光集積量子回路の優れた点を生かした応用へと展開させていく予定である。

4. 自己評価

研究題目に掲げた「大規模」という意味では、2 モード 2 光子状態の実験までにとどまっており、大規模な量子シミュレータを使ったアルゴリズムの実装までには至らなかった。しかし、オンチップ量子もつれ光源の開発、光量子集積回路の作製、光量子集積回路を動作させるための周辺設備の構築は順調に進み、大規模な光集積量子回路を実装することはできた。今後は、実装した大規模な集積回路をどのように効率よく制御するか、多光子化へ向けた光源の高性能化、また光集積回路の利点を生かした応用などを、共同研究なども含めて考えていく必要がある。このような新しい課題を洗い出せた点は進展であり、大規模な量子シミュレータの実装へ近づくことができたと考える。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 1 件

1. 小野貴史, Gary F. Sinclair, Damien Bonneau, Mark G. Thompson, Jonathan C. F. Matthews, John G. Rarity, “シリコンチップ上に実装した非線形干渉計の評価”, レーザ一研究, 2020 年 9 月, 48(9) 499-504

※2021 年度レーザー学会業績賞受賞論文

本論文では、従来の非線形干渉計と新しく実装した非線形干渉計の性能を比較し、オンチップ非線形干渉計の性能を改善するために必要な要素技術について詳しく調べた。その結

果、非線形干渉計の明瞭度はシリコン中で生じる四光波混合の強さに依存すること、また光導波路の温度安定化および小型化により、明瞭度のさらなる改善が期待できることが示された。本研究により、非線形干渉計の性能のさらなる向上が期待され、量子情報処理への応用の可能性が示された。

(2)特許出願

なし

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 【国内学会】 小野貴史, Wojciech Roga, 和久井健太郎, 藤原幹生, 三木茂人, 寺井弘高, 武岡正裕, “光量子回路を使った量子分類器”, 2021年9月12日, 第82回応用物理学会, 12p-N103-5, オンライン開催
2. 【国際学会】 Takafumi Ono, Gary F. Sinclair, Damien Bonneau, Jeremy L. O’ Brien, Mark G. Thompson, Jonathan C. F. Matthews and John G. Rarity, “Evaluating an integrated silicon photonic nonlinear interferometer”, 2021年4月19日, The 10th Advanced Lasers and Photon Sources, ALPS-7-3, オンライン開催
3. 【受賞】 小野貴史, レーザー学会業績賞:論文賞「オリジナル部門」 “シリコンチップ上に実装した非線形干渉計の評価”, 2021年5月31日, オンライン開催
4. 【著書】 小野貴史 (担当:分担執筆, 範囲:5章3節「量子もつれ光子を用いたセンシングの理論」), “量子センシングハンドブック”, 2021年3月