

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05082

研究課題名(和文) ストレートフォワード型多光子干渉回路を用いた光量子シミュレータの開発

研究課題名(英文) Quantum simulator using a polarization-maintaining-fiber-based interferometer

研究代表者

行方 直人 (NAMEKATA, Naoto)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：20453912

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：大規模非万能型量子計算機・シミュレーターを目指した光回路プラットフォームとして偏波保持ファイバを多段接続した時間多重偏波干渉計ネットワークの提案を行った。長さ100 mの偏波保持ファイバをそのスロー軸方向を45度回転させながら多段接続することで7.8 GHz時間多重パルス列に対する近接パルス間の光干渉を実現し、それによる量子ウォークシミュレータや量子ボソンサンプリングを実装するための1次および2次の干渉が可能であることを明らかとした。また、時間多重偏波干渉回路に再構築可能性を与える技術的方法として進行波型位相変調器を用いる方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

偏波保持ファイバの多段接続による光回路プラットフォームは、少ないリソースで光子干渉ネットワークを実現でき、その点で規模が大きくなるほど平面光回路系に対する優位性が高くなると言える。本研究のアプローチは、量子計算や量子シミュレーターの大規模化だけでなく量子暗号をはじめとする量子通信における量子演算・計測系など、本来光子干渉を利用する系全てに適用できる可能性を秘めており、それらを既存手法と比較して極めて簡単に構築する方法を与えるだろう。

研究成果の概要(英文)：We studied a time-multiplexed polarization interferometer based on polarization maintaining fibers as an optical circuit platform for large-scale non-universal quantum computers and simulators. The photon interferometer network was constructed only by 100-m-long polarization maintaining fibers connected in series to each other with a slow-axis orientation of 45 degrees. The one fiber including junctions realized the first- and second-orders interferences between consecutive optical pulses at a repetition frequency of 7.8 GHz, which required for optical quantum walk simulator and quantum boson sampling. Then, we proposed the way to give the polarization-maintaining-fiber-based optical circuit the reconfigurability using the traveling-wave-type optical modulators.

研究分野：量子光学

キーワード：光量子シミュレータ 偏波保持ファイバ 時間多重

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

量子計算機は古典計算機では解くのに指数関数時間を要する計算問題、例えば素因数分解 (Shor のアルゴリズム) を多項式時間で解くことが可能であり、その超効率的計算は科学、産業の広範な領域・分野でパラダイムシフトを起こすものと期待されている。計算問題を限定しない (ただし、全てが多項式時間で解けるわけではない) ゲート型万能量子コンピューター (UQC) の開発は超伝導磁束量子ビットを用いることによって目覚ましい発展をみせ、その規模は 50 量子ビットを超えてきている。一方、特定の計算問題を解くことに特化した非万能型量子コンピューター (NUQC) は UQC より容易に大規模実装が可能であると考えられ、これも注目を集めている。NUQC の実例である量子アニーラー、量子ウォークシミュレーター (QWS) そして量子ボソンサンプリング (QBS) は、組み合わせ最適化問題やいくつかの探索・検索系問題の効率的計算を可能とすることが示唆されている。また、量子超越性を明らかとするアプローチとしても有力であると考えられ、大規模量子演算アーキテクチャのベンチマークとしても利用されてきている。[1-3]

QWS や QBS は光学系による実装が容易であり、光損失耐性もあることから、量子光学的手法によって実験的研究が精力的に行われている。中でも、シリカやシリコン (Si) 系導波路を用いた平面光回路プラットフォームによる取り組みはある一定の大規模化を実現している [1,2]。しかし、それらはさらなる大規模化や 2 次元 QWS へ向けての展望が良いわけではなく、より適した光回路プラットフォームの模索、検討が未だ大きな検討課題である。

2. 研究の目的

光学系による NUQC は単一光子や多光子間の干渉を利用する。したがって、それは単一光子源や量子もつれ光子対などの「量子光源」と光子干渉を引き起こすための「光回路」、そしてそこから出力される光子を検出する単一光子検出器から構成される。前項で述べたような平面光回路においては、その規模  $N$  (光干渉ステップの数) に対して、入力 (量子光源) と単一光子検出器の数は  $> 2N$  まで増大し、また、平面光回路中の光学素子数は  $> N^2$  で増大する。近年の Si 系平面光回路技術においても  $N$  が数十となる規模までは実現されてきており、今後も規模拡大は期待できる。しかしながら、その規模の平面光回路が持つ数十以上の出力を同時 (オンライン) に単一光子検出器で計測した例は少なく、ほとんどは数台の光子検出器によるオフライン計測結果による評価が行われている。このように、大規模 NUQC を実現するためには、平面光回路の大規模化だけでなく、多数の量子光源や単一光子検出器の同時動作を実現しなくてはならない。

大規模化に伴って量子光源や単一光子検出器の数が増大してしまうのは、平面光回路が空間自由度を利用した光路を基本としているからである。空間自由度を使用した光路を、時間自由度を利用した「時間多重」へ置き換えることによって量子光源や単一光子検出器の数はそれぞれ最少で 2 台にまで抑制される。本研究では、時間多重系による QWS や QBS 用光回路プラットフォームを開発し、その大規模化可能性を評価することを目的とした。QWS や QBS 用光回路においては、単純にマッハツェンダー (MZ) 干渉計を多段接続した系だけでなく、回路再構築可能性の有無も重要となる。平面光回路系における再構築可能性は実現されているものの、時間多重系における実現例がないため、その獲得に関する検討も本研究の目的とした。

3. 研究の方法

まず、ビームスプリッター (BS) 演算を偏波干渉計の原理で置き換えをおこなう。さらには、それを偏波保持ファイバの直線接続のみで実現する。その原理を図 1 に示す。図 1(a) は従来の空間自由度を利用した BS 演算であり、2 入力、2 出力の伝搬モードを利用している。

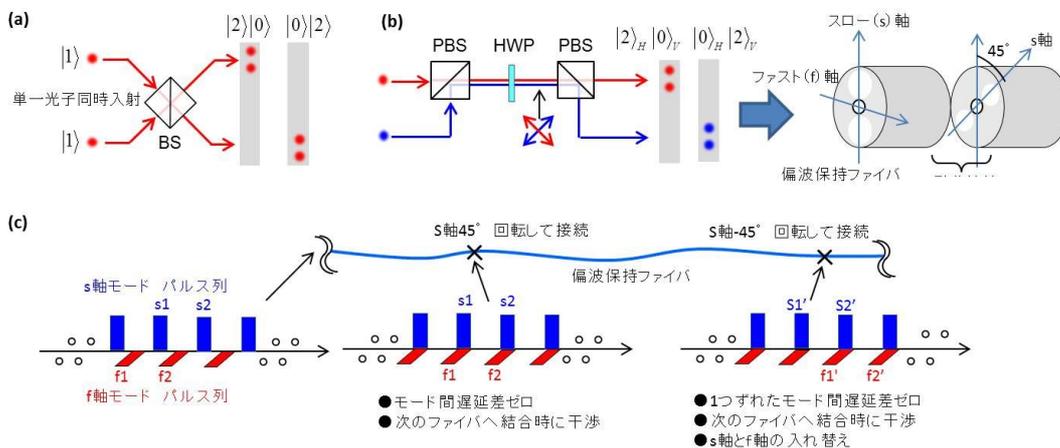


図 1. (a)BS による HOM 型 2 光子干渉.(b)PBS、HWP による置き換えと偏波保持ファイバ 接続点による実装.(c)偏波保持ファイバによる大規模実装の概念.

2 入力ポートそれぞれに単一光子を同時に入射した場合、Hong-Ou-Mandel (HOM) 型の 2 光子干渉を引き起こす。一方、本研究では、図 1(b)のように、波長板(HWP)と偏波 BS(PBS)によって、直交する 2 つの偏光モード間の干渉によって BS を置き換える。この場合、縦偏波と横偏波モードにそれぞれ単一光子を入力すると、BS と同様の HOM 型の 2 光子干渉、

$$|1\rangle_H |1\rangle_V \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |2\rangle_H |0\rangle_V - |0\rangle_H |2\rangle_V \}$$

を引き起こせる。そして、この操作を偏波保持ファイバ (PMF) の接続(スロー(s)軸は  $\pm 45$  度回転)のみで達成させる。さらに、偏波保持ファイバの s 軸、ファスト(f)軸間の伝搬速度差によって隣接パルス間の干渉を達成し、図 1(c)のように時間多重された  $N$  個(各偏波)のパルス列を入力量子状態とすると、たった 1 個の PMF 接続点で  $N$  個の BS 演算を全てこなすことができる。つまり、本系では、空間自由度を使用して  $N^2$  必要だった素子数を、回路構成によっては  $N$  個で実現できる可能性を持っている。また、量子光源や単一光子検出器は光回路の規模によらず s 軸、f 軸モード用に各 2 台ずつで良い。

本研究では、以上のような単純に直列接続された PMF によって QWS や QBS 用の大規模光回路の構築が可能であるかを実験的に調べた。

#### 4. 研究成果

まず、2 本の PMF (各 10 m) をそれぞれの s 軸がおりなす角度を  $45^\circ$  となるよう直列接続し (前項、図 1(c)を参照) それを BS 演算になることを確認した。前段側 PMF の s 軸と f 軸それぞれに時間相関光子対のシグナル光子とアイドラ光子 (波長 1550 nm) を入力し、後段側 PMF の s 軸と f 軸モード間の 2 光子同時計数を測定した。シグナル光子、アイドラ光子間の相対的遅延差に対する同時計数実験結果を図 2 に示す。相対的遅延差は PMF 前に置いた自由空間光学系上のコーナーリフレクタ (マイクロメーター位置制御) によって実現した。図 2 が示す通り、相対遅延 7.0 mm において同時計数の消失、いわゆる HOM-dip が観測され、PMF の直列接続のみで BS 演算および 2 光子干渉が可能であることがわかった。

次に、前項図 1(c)のように隣接間パルス間の干渉を実現するため、単位長さあたりの PMF 中において s 軸と f 軸各モード間の遅延差がどれだけとなるかを調べた。先と同様に直列接続された PMF 系を用い、前段側 PMF の長さを変えながら干渉ピーク位置を測定した。その結果を図 3 に示す。直線回帰による傾きより、PMF の単位長さあたりの s 軸-f 軸間遅延差はおよそ 1.3ps と評価された。これは、使用した PMF (フジクラ製 PANDA ファイバ) のビート長  $< 5$  mm から予測される妥当な遅延差であった (実際には  $\sim 4$  mm であることを示唆した結果)。10 GHz パルス列に時間多重された場合は、隣接パルス間の干渉のためには多段接続する PMF の長さを  $\sim 77$  m とすれば良いことがわかった。

実際に 100 m の PMF を準備し、この前後を 10 m のファイバで挟むように直列接続した。本系は 7.7 GHz パルス列に対する 1 ビット遅延 MZ 干渉計となっているはずである。この動作を確認することで、隣接パルス間の干渉が実現できるかを調べた。1 ビット遅延 MZ 干渉計動作を調べるためには、隣接パルス間にコヒーレンスがある光源を準備しなければならない。今回、その光源は波長 1550 nm の外部共振器レーザーを電界吸収型 (EA) 強度変調器によってパルス化することで得た。EA 変調器は最高 32 GHz クロックの 40bit パルスパターン発生器 (PPG) によって発生した電圧パルスによって駆動された。実験結果より、先の予測に近い 7.8 GHz パルス列に

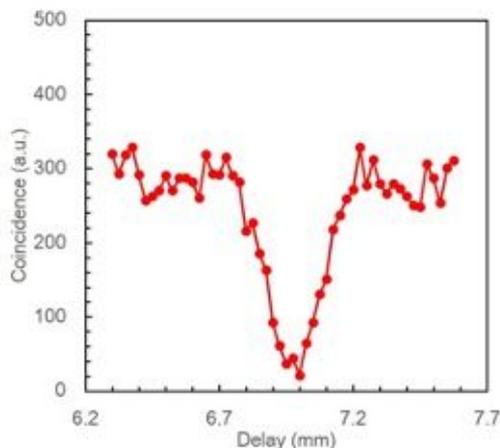


図 2. 同時計数中の HOM-dip

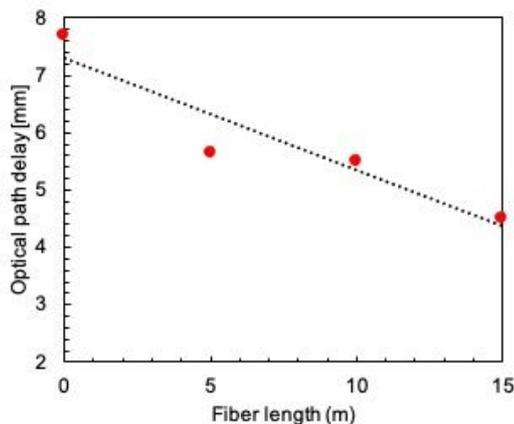


図 3. PMF 長さに対する干渉位置

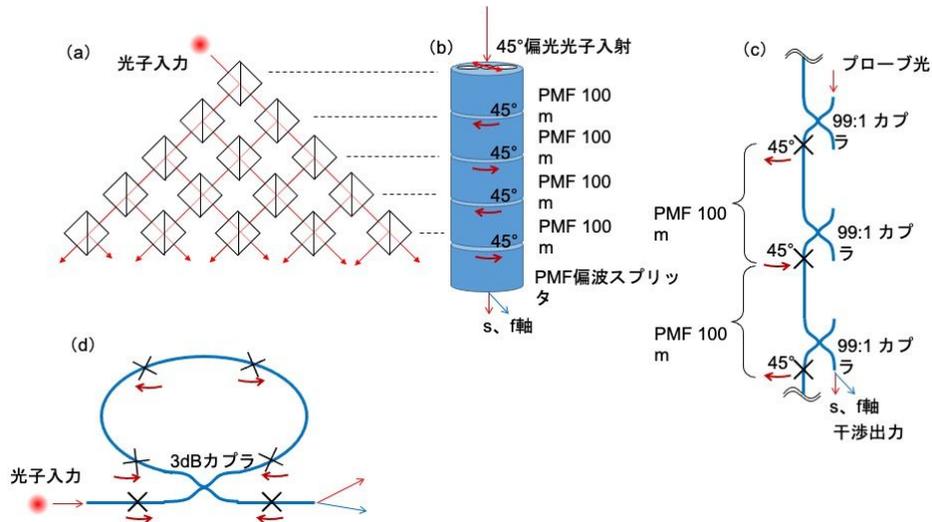


図 4.5 ステップ量子ウォーク回路の実装。(a) 自由空間系による光学系 (b) PMF の直列接続による実装 (c) MZ 干渉計の位相制御方法 (d) ファイバープによる拡張。

対して最大の 1 次干渉明瞭度  $>98\%$  を得た。また、光パルス幅が 40ps 程度とやや広い場合、PMF の長さに対する許容量は  $\pm 1$  m を優に超え、パルス幅が数 ps 程度の場合においても数十センチ程度の許容量があるものと予想され、多段接続する際の PMF 長さ精度への要求は高くないことが明らかとなった。一方、1 ビット遅延 MZ 干渉計の光路差 (s 軸と f 軸間) は光の波長オーダーより十分小さい領域で安定化されなければならない (BSM への応用では不要)。s 軸と f 軸間の相対位相差が  $2\pi$  となる PMF 長さはビート長  $\sim 4$  mm であり、長さ 100 m の PMF の一般的な実験室環境下における伸縮よりも極めて長い。しかし、PMF の伸縮は PMF (PANDA) の複屈折性に大きく影響するはずであり、100-m 長 PMF で構成される遅延 MZ 干渉計の安定化ができるかが、大規模光回路を実現するための鍵となる。そこで、遅延 MZ 干渉計の安定性の評価を行った。発砲スチロールケースによる断熱程度でも数分以上の位相固定が可能であり、位相制御自体も PMF をヒーターによる PID 温度制御 ( $\pm 0.1$ ) することで可能であることがわかった。ただし、使用したレーザーの発振波長不安定性によって位相差が揺らぐことを確認しており、これが 1 次干渉明瞭度の劣化を引き起こし、最終的には光回路忠実度の劣化の原因になると考えられる。そのため、干渉計の位相差制御や、QWS などへの応用の際には使用光源の波長安定性が強く求められる。

以上のように PMF 直列接続によって光干渉回路が構築できることがわかったため、次に長さ 100 m の PMF を 4 本直列接続することで 5 ステップの QWS 回路の実装を試みた。図 4 (a) のように、空間自由度を利用した場合、15 個の BS が必要となる QWS 回路は図 4 (b) のように大幅に簡略化された。各 PMF 接続点で構成される MZ 干渉計の位相差は図 4 (c) のように各 100 m の PMF ごとに挿入される偏波保持型 99 : 1 カプラからの光入力および光出力によって個別に制御ができる。また、QWS を行う際においても、各 PMF 接続点に挿入されるカプラによる光損失は挿入損失を含めても高々  $\sim 0.2$  dB である。構築した QWS 回路からの光 (光子) 出力の測定は、7.8 GHz 光パルス列の時間分解測定ができなかったため、実施できていない。現在、市販される超電導ナノ細線単一光子検出器 (SNSPD) の時間ジッターは 25ps まで達成されてきており [4] このような超高速単一光子検出システムを用いることで QWS システム実験が実施できる。さらには、図 4 (d) のように 3 dB 偏波保持カプラを用いて 4 ステップ QWS 系をループ状とすることで  $4n + 2$  ステップの QWS が実装できるであろう。現実的には、 $4n + 2$  ステップにおける光損失は  $5n$  dB 程度と見積もられ、単一光子検出器の効率、暗計数を考慮すると  $n > 5$ 、22 ステップ以上の QWS が非常に少ないリソースで実現すると考えられる。

最後に、今回提案した光回路が再構築可能性を獲得できるかを検証した。光回路は PMF の直列接続のみで構成されるため、時間多重されている任意の光パルスに対して偏光を  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  のいずれかへと制御し、PMF 接続点における機能を BS 演算、BS 演算なし (s(f) 軸 s(f) 軸または s(f) 軸 f(s) 軸へのルーティング) と切り替えられれば良い。今回、図 5 に示すように、ニオブ酸リチウム進行波型 (LN) 位相変調器によって実現する方法を検討した。LN 変調器は縦偏波のみ印加電圧に応じた位相変調が与えられる。したがって、出入力 PMF の s 軸を LN 変調器の縦偏波方向に対して  $22.5^\circ$  だけ回転し、LN 変調器の印加電圧を 0 または  $\pi$  電圧とすることで、出力側 PMF の s 軸に対する偏光を  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  とすることが可能となるはずである (s 軸に対して  $22.5^\circ$  だけ回転した半波長板の有無を切り替えているのと等しい)。s 軸を  $22.5^\circ$  傾けた状態で PMF が接続された LN 変調器が入手困難であったため、単一モードファイバ (SMF) が接続された (ラミポールなし) LN 変調器を用い、その両端に PMF をそれぞれ接続し、SMF 内で受ける複屈折はファイバ型偏波コントローラーで補償、制御することで原理検証を試みた。その

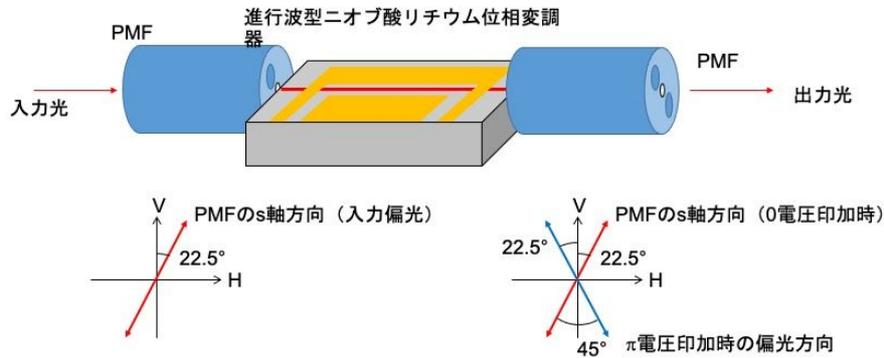


図 5. 進行波型位相変調器による再構築可能性の獲得方法

結果、出力端に付けられた PMF の  $s$  軸、 $f$  軸の出力差が LN 変調器の  $0$ 、 $\pi$  電圧印加によって  $0 : 100$ 、 $50 : 50$  へと制御できていることを確認した。しかし、SMF 出力端における実際の偏波や、LN 変調器のオフセット電圧による位相など現状不明なパラメーターが多く、 $50 : 50$  の出力比を得られている条件下において、偏波が  $s$  軸に対して直線偏波の  $45^\circ$  となっているか、または楕円偏光となっているかまでの厳密な評価はできていない。よって、SMF 出力端における偏波の正確な制御と適切な LN 変調器オフセット電圧の決定が課題である。

#### 参考文献

- [1] A. Crespi, *et. al.*, Nat. Photon. **7**, 322 (2013).
- [2] M. Tillmann, *et. al.*, Nat. Photon. **7**, 540 (2013).
- [3] Y. He, *et. al.* Phys. Rev. Lett. **118**, 190501 (2017).
- [4] CJSC Superconducting Nanotechnology "SCONTEL", <http://www.scontel.ru/>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 鹿野豊	4. 巻 670
2. 論文標題 量子力学の固有値	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 数理科学	6. 最初と最後の頁 49-55
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 N. Namekata, D. Wu, S. Ohnuki, D. Fukuda, and S. Inoue,
2. 発表標題 Quantum walk in a plasmonic waveguide lattice structure
3. 学会等名 International Conference on Emerging Quantum Technology（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田村 賢太郎, 鹿野 豊
2. 発表標題 量子乱数生成の観点から見た量子コンピュータの現状
3. 学会等名 日本応用数理学会2019年研究部会連合発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yutaka Shikano
2. 発表標題 Dawn of Quantum Computing
3. 学会等名 36th Samahang Pisika ng Pilipinas (Physics Society of the Philippines) Physics Conference（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yutaka Shikano
2. 発表標題 Quantum Dynamical Simulation by Quantum Walk
3. 学会等名 Towards Ultimate quantum theory (UQT) at Linnaeus University (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 行方直人、多田彬子、番場翔太、井上修一郎
2. 発表標題 直線型光ファイバ偏波干渉計による2光子干渉実験
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	鹿野 豊  (SHIKANO Yutaka)  (80634691)	慶應義塾大学・理工学研究科(矢上)・特任准教授    (32612)	