

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05091

研究課題名(和文) シリコン共振器を用いた1チップ量子もつれ光源の開発

研究課題名(英文) Entanglement photon pair source by using a micro Si ring

研究代表者

藤原 幹生 (Fujiwara, Mikio)

国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所量子ICT先端開発センター・研究マネージャー

研究者番号：70359066

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：半径10 $\mu\text{m}$ のシリコンリング共振器を使用し、四光波混合を用いた小型のtime-bin量子もつれ光源の開発を実施した。このシリコンリング共振器は2入力2出力の構造を持っている。導波路の構造は400nmの幅、厚みは200nmである。また、リングと導波路のギャップは350nmである。我々はこの小型シリコンリング共振器を用いてCバンド内に2つのペアの量子もつれの発生を成功させたのに加え、2入力、2出力時の2ペアの量子もつれの生成にも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子光回路の小型化にはシリコンでの光学回路の実現が有望である。我々は小型のシリコンリング共振器1つで、2組の量子もつれの生成に成功した。またCバンド内で2組の量子もつれの生成にも成功している。また、動作温度を変化させることにより、波長の微調整も可能であることを実証した。この成果は量子もつれを用いた量子暗号装置の小型化や、シリコンフォトニクスを用いた光量子回路に貢献できる可能性がある。シリコンフォトニクスは超伝導材料との親和性も高く、単一光子検出器との集積化も期待できる。

研究成果の概要(英文)：We report a time-bin entangled photon pair source in telecom wavelength using a 10  $\mu\text{m}$  radius Si ring resonator which has two input ports and two drop ports. We demonstrate entangled photon pair generation from two drop ports simultaneously by pumping two input ports simultaneously, and furthermore observe four wave mixing enhancement via this double-port pumping. Owing to the resonator structure, four wave mixing pumped by a continuous laser is enhanced and double time-bin entangled photon pairs are generated in the telecom C-band. The visibilities clearly exceed the classical limit and moreover the count rates are doubled compared to the single-port pumping.

研究分野：量子光学

キーワード：量子もつれ シリコンリング time-bin Cバンド

## 1. 研究開始当初の背景

現在ゲノムデータなど高度かつ長期間に秘匿すべき個人情報等がインターネット上やデータセンター内を行き来する時代にも関わらず、情報の安全性が数十年担保できる手法が現代暗号だけでは難しいとの危機感が暗号研究者の間で共有されつつある。超長期の情報の安全性を必要とする認証・伝送・保存を将来の計算機の発達に伴う解読能力の強化に怯えることの無いシステムの構築の研究が喫緊の課題であり、情報理論的に安全な鍵を供給できる量子鍵配送(Quantum key distribution: QKD)の重要性・実用性を現代暗号研究者の間でも高まっている。QKD は one time pad(OTP)暗号と組み合わせることにより、情報理論的に安全な通信が可能となる。QKD が提案されてから 30 余年が経過した現在、スイス・中国および米国では銀行間・政府財務関連機関の通信で利用されている。QKD が量子情報分野でいち早く実用化出来た理由は QKD がポストセクションという通信が成功した事象を利用したプロトコルであり、通信路での損失に強く、他の量子情報のプロトコルと比べ現在入手できる不完全なデバイスでも様々な工夫により安全性が担保できるという優れた特性を持っているためである。一方 QKD を普及させるための最大の阻害要因は実装コストであり、低コスト実装を可能とする技術が必要とされている。

## 2. 研究の目的

量子鍵配送(QKD)は通信路での損失の影響を受けにくい優れた量子情報プロトコルであり、量子通信分野の中では近々に社会還元される技術として近年盛んに研究が進められている。特に海外では CMOS 技術との親和性に優れたシリコンフォトニクスを用いた QKD システムの構築研究が盛んに進められており、従来の長距離・高速を目的とした応用から敷地内・ビル内等での通信の point-to-point での通信の秘匿化をソフトウェア定義のネットワーク技術と併用することにより柔軟な量子鍵配送ネットワークの構築を目指している。本提案ではシリコンフォトニクスを用いた量子もつれ光源の波長多重と小型実装を可能とする技術を確認し、QKD の小型実装を可能とする光源技術の研究開発を行う。

## 3. 研究の方法

シリコンリング共振器を用いた通信波長帯 (C バンド) 波長多重 time-bin 量子もつれ光源の開発を行う。またシリコンリング共振器の 2 つの入射ポートからポンプ光を同時に入射し、異なるポートからの量子もつれ光子対の高効率生成と、量子もつれ光源の小型実装に向けた基礎データの収集と原理実証を進める。さらにポンプ光強度増加に伴う共振波長の変化、透過率の変化に対し 2 ポートからの位相の一致したポンプ光を入力することにより、シリコンリング共振器内で発生している非線形現象の原因を解明し、量子もつれ光源の 1 チップ化時の更なる高性能化に向けた知見を得る。

本研究で使用するシリコンマイクロ共振器は 1 つのリング状の共振器と 2 つの導波路から構成されている。入射用導波路からエバネッセント結合して、リング状の共振器に光子が入力され、リングの共振条件に合った波長のみもう一方の導波路に結合し、外部に出力される。すなわち狭帯域フィルタとして機能する。(図 1) この共振器の共振波長は現在のシリコン加工精度をもってしても、リング形状の僅かな違いが強調されるためばらつくことが予想される。また導波路と共振器との溝の幅は結合効率を変化させることができ、Q 値を変化させることが可能である。本研究では同じディメンジョンで作成された複数のサンプルの共振波長、Q 値を測定し、それらの値の温度依存性を確認し、通信波長帯 C バンド付近での量子もつれ光子対の波長多重化が可能なるサンプルを選別する。

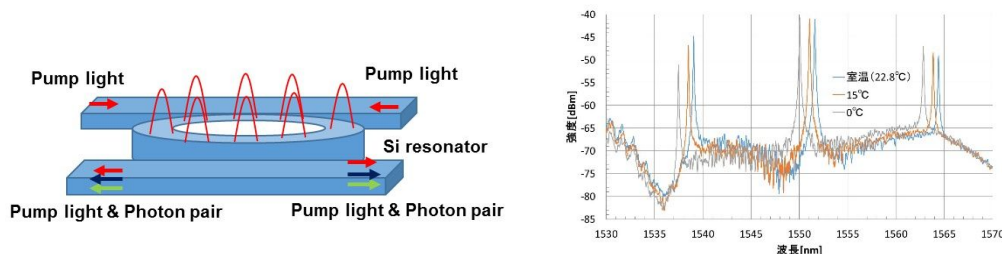


図 1 シリコンリング共振器の構造 (左) 及びシリコンリング共振器透過スペクトル (7  $\mu\text{m}$  半径サンプル) の温度依存性 (右)

本共振器に共振波長の一つと一致したポンプ光を入力すると四光波混合によりエネルギー保存即が成り立つ共振波長において相関光子対が発生する。即ちポンプ光の隣り合う共振波長対と二つ隣の共振波長に相当する 2 光子の time-bin 量子もつれを確認する。我々は半径 7  $\mu\text{m}$  のサンプルで time-bin 量子もつれの生成に成功している。本研究では FSR の小さいリング共振器を用いて通信波長帯での波長多重量子もつれの実現を目指す。リング径の大きいサンプルを使用

し、FSR の低減をすすめ、2 対以上の量子もつれを通信波長帯での生成を行う。これにより量子もつれ光源の QKD システム応用時の鍵生成速度の向上、マルチユーザ化 (point to point の複数化) を可能とする。またシリコンリング共振器の入射ポートが2つあることを利用し、2方向からポンプ光を入射することにより、量子もつれ光子対を異なるポートから生成させ、量子もつれ光源の多重化を試みる。

#### 4. 研究成果

当初の研究計画通り、複数のシリコンリング共振器の共振波長、Q 値をリングサイズ、導波路と共振器のギャップサイズごとに測定し、同じディメンジョンを持つサンプルの分散を計測し、通信波長帯 C バンドの範囲に 2 組以上の光子対発生を可能とするリング半径  $10\mu\text{m}$  の共振器を選抜し、ポンプ波長を固定し、隣接共振波長ペアと第二共振波長のペアでの time-bin 量子もつれの存在の確認を実施した。また一つのシリコンリング共振器を 2 つの量子もつれ光源として活用できるように、量子もつれ光源の多重化を行い、相関光子対の生成とポンプ光を 2 ポートから入射した場合の熱による共振波長変化の影響を測定した。図 2 に測定に用いたセットアップを示す。

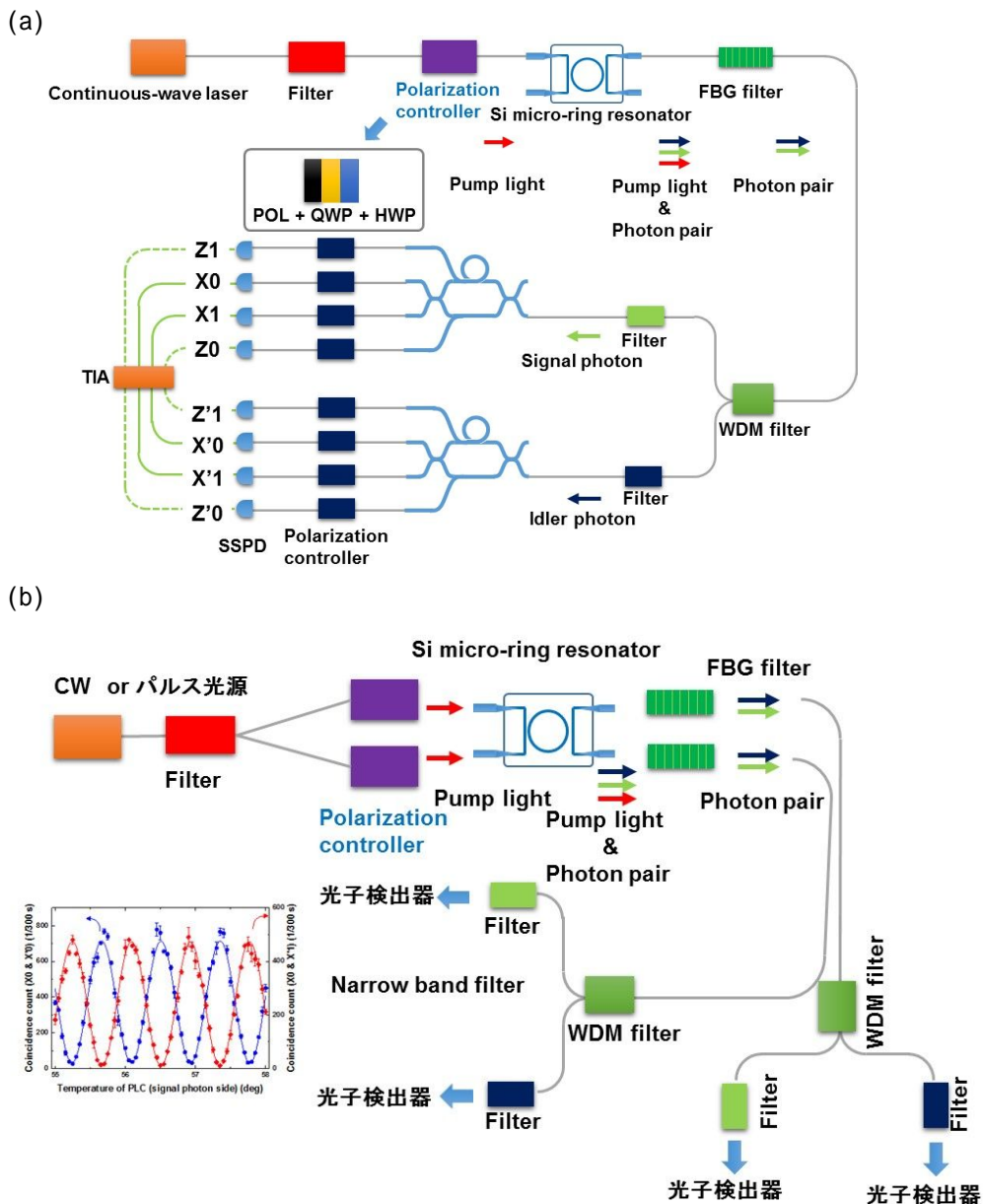


図 2 シリコンリング共振器を用いた time-bin 量子もつれ発生実験セットアップ  
(a) 1 port での実験、(b) 2 port での実験

まず C バンド内でポンプ光波長から隣接している First pair と次の second pair での量子もつれを確認するための明瞭度計測を実施した結果を図 3 に示す。

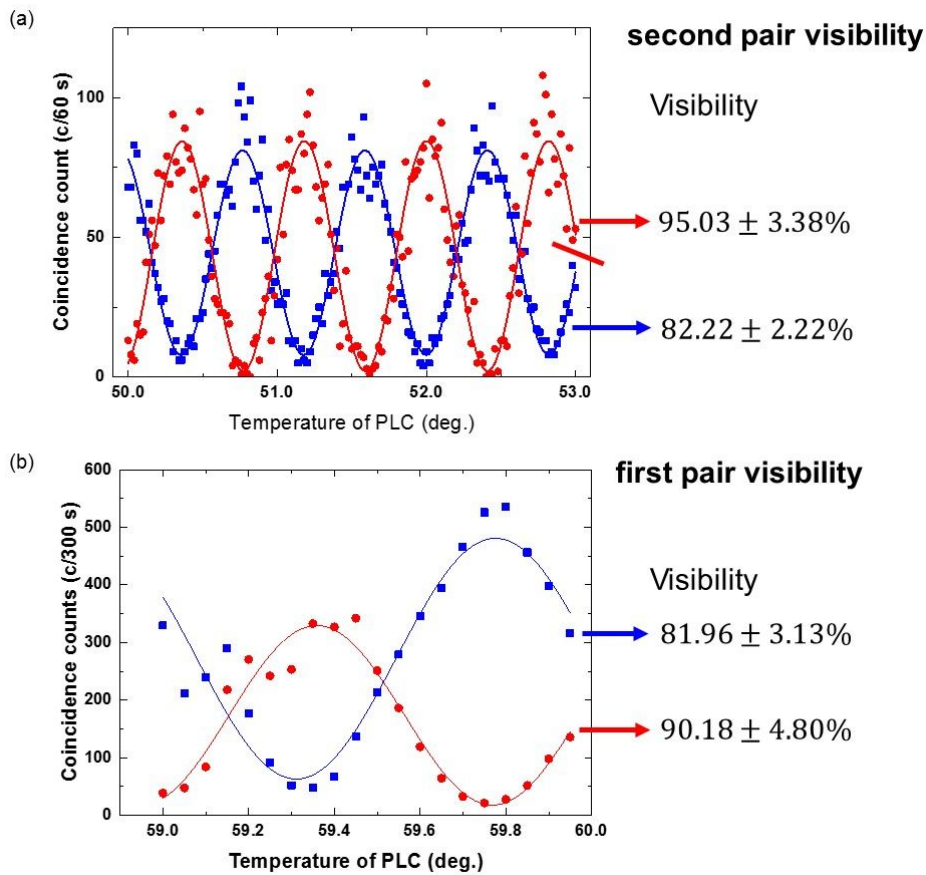


図3 PLCの温度を変化させた場合の同時計測結果 (ポンプ光強度 0.5mW)

この結果から、明瞭度は古典限界を超えていることが確認でき、Cバンドにおいて2つの組での量子もつれの生成に成功した。

また相関光子対の生成とポンプ光を2ポートから入射した場合の結果を図4に示す。

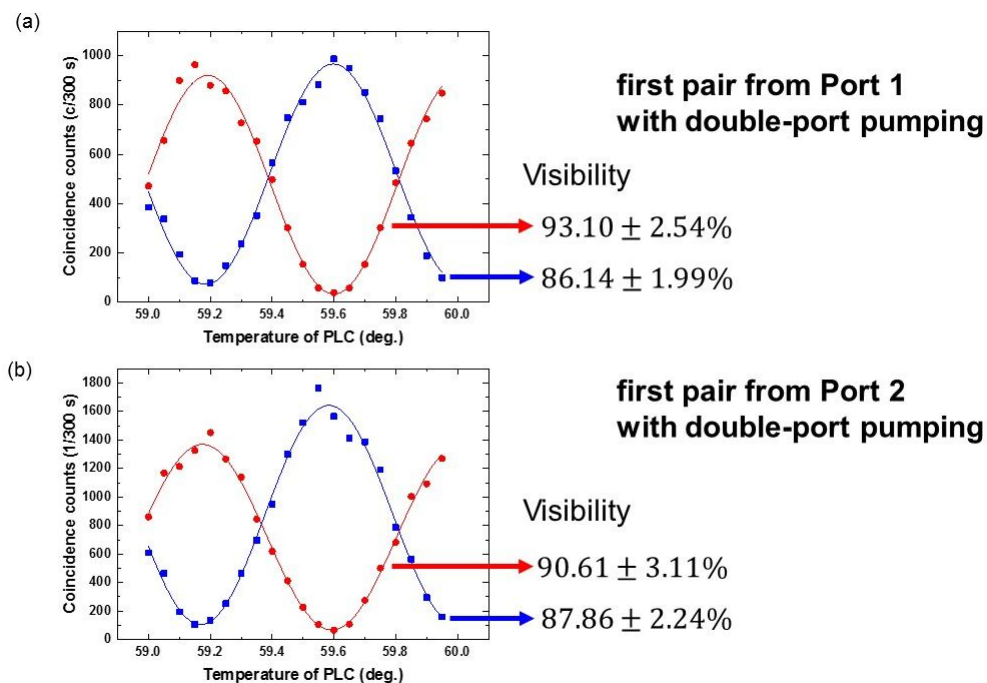


図4 2 port 同時にポンプ光を入射した場合の PLC の温度を変化させた場合の同時計測結果 (1port 当たりのポンプ光強度 0.5mW)

この結果から、2 port 同時にポンプしても、古典限界を超え、1つのシリコンリングで量子もつれ光源の多重化成功したことが確認できた。さらにこの結果は量子もつれペア生成レートが1 port で用いるよりも2倍以上向上していることが確認できた。我々はこの原因を、シリコンリング共振器と導波路の結節点におけるポンプ光の透過率を、1 port 入射時と2 port 同時に入射した場合の計測を実施した。その結果を図5に示す。

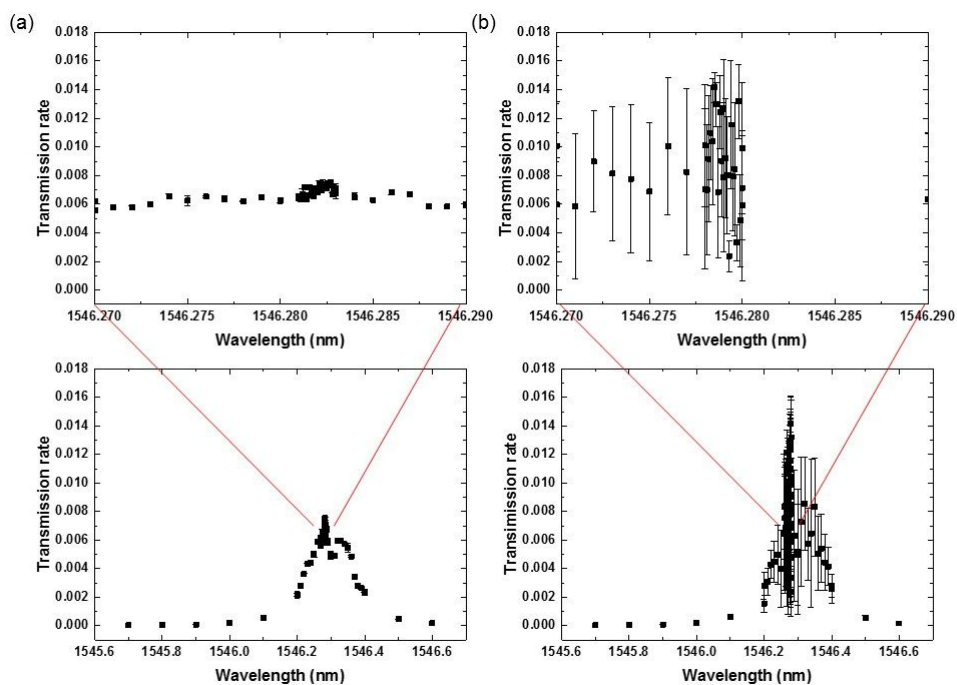


図5 シリコンリング共振器の透過率(a)1 port 入射、(b) 2 port 同時入射

図5を見て判る様に、2 port 同時に入射した場合、透過率が極め狭い波長域であるが倍程度に増加することが確認できた。この結果から共振波長でのポンプ光の反射による共振があったと結論した。本研究結果を Optics Express 25(4) 3445 (2017)にて発表した。

さらに、ポンプ光源のパルス化を実施し、同様の実験を進めたが、明瞭度が古典限界を超える事象は確認されなかった。これは time-bin の遅延時間を 2.5ns に変化させても同様の結果となった。我々はこの理由をシリコンリング内の熱的な効果による状態変化と推定し、その原因究明を続けている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Y. Tsujimoto, K. Wakui, M. Fujiwara, K. Hayasaka, S. Miki, H. Terai, M. Sasaki, and M. Takeoka	4. 巻 98
2. 論文標題 Optimal conditions for the Bell test using spontaneous parametric down-conversion sources	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 063842-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.98.063842	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 M. Fujiwara, Ryota Wakabayashi, Masahide Sasaki, and Masahiro Takeoka	4. 巻 25
2. 論文標題 Wavelength division multiplexed and double-port pumped time-bin entangled photon pair generation using Si ring resonator	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 3445-3453
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.25.003445	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Mikio Fujiwara, Ryota Wakabayashi, Masahide Sasaki, and Masahiro Takeoka
2. 発表標題 Double-port pumped time-bin entangled photon pair generation using Si ring resonator
3. 学会等名 QCrypt 2017 (国際学会)
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