

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月16日現在

機関番号：92704

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360034

研究課題名（和文）シリコンフォトンクス技術を用いた光子量子回路の集積化の研究

研究課題名（英文）Integrated quantum optical circuit using silicon photonics

研究代表者

武居 弘樹 (TAKESUE HIROKI)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所 量子光物性研究部 主幹研究員・特別研究員

研究者番号：60393790

研究成果の概要（和文）：シリコンフォトンクス技術を用いて、光子を用いた大規模な量子情報処理を行うために必要な「集積化量子光回路」を実現するための基盤技術を確認した。具体的には、ワンチップ集積化シリコン細線導波路による偏波もつれ光子対発生源、シリコンフォニック結晶結合共振器光導波路中のスローライト効果を用いた高効率量子相関光子対発生源および量子バッファなどを実現した。

研究成果の概要（英文）：We established basic technologies to realize integrated quantum optical circuits based on silicon photonics. We achieved a one-chip integration of polarization entangled photon pair source based on silicon wire waveguides, a highly efficient quantum correlated photon pair source and a single photon buffer based on silicon photonic crystal coupled resonator optical waveguides.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	9,400,000	2,820,000	12,220,000
2011年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2012年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	15,500,000	4,650,000	20,150,000

研究分野：応用光学・量子光工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用光学・量子光工学

キーワード：シリコンフォトンクス、シリコン細線導波路、フォニック結晶、量子もつれ、量子光学、非線形光学

1. 研究開始当初の背景

光子による量子情報処理の研究は90年代終盤以降飛躍的進展を遂げたが、バルク光学素子を用いた従来の手法では空間的な制約のために拡張性の限界に達していた。これを打破するために、ブリストル大学などの研究グループがシリカ導波路を用いて量子光回路の集積化に着手していた。

2. 研究の目的

シリコンフォトンクス技術を用いた量子光回路の集積化を究極の目的とする。これにより、回路の大幅な小型化や、もつれ光源などのアクティブ素子の集積化など、シリカ導波路では困難な高度な集積化量子光回路の実現が期待できる。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、本研究期間においては、シリコンフォトンクス技術を用

いた集積化量子光回路実現のための要素技術を確認する。具体的には、以下の3点を達成する。

- (1) シリコン細線導波路(silicon wire waveguide: SWW)を用いたワンチップ偏波もつれ光源の実現
- (2) シリコンフォトニック結晶(photonic crystal: PhC)結合共振器光導波路(coupled resonator optical waveguide: CROW)を用いた単一光子バッファ実験
- (3) シリコン PhC-CROW により増強された非線形光学効果を用いた高効率量子もつれ光子対発生

4. 研究成果

(1) SWW を用いたワンチップ偏波もつれ光源

当初計画書に記載していた手法よりも簡略化された手法を提案した。本素子は、長さの等しい2本のシリコン細線導波路が、90度偏波回転を行う素子で接続された構造を取り、全てシリコン基板上に集積されている(図1)。作製した試料において自然放出四光波混合(spontaneous four-wave mixing: SFWM)に基づく量子もつれ発生実験を行い、雑音光子対を含めた忠実度91%の高純度な量子もつれ光子対の生成に成功した。デバイスの全てがワンチップに集積された偏波もつれ光源の実現は世界で初めて実現した。

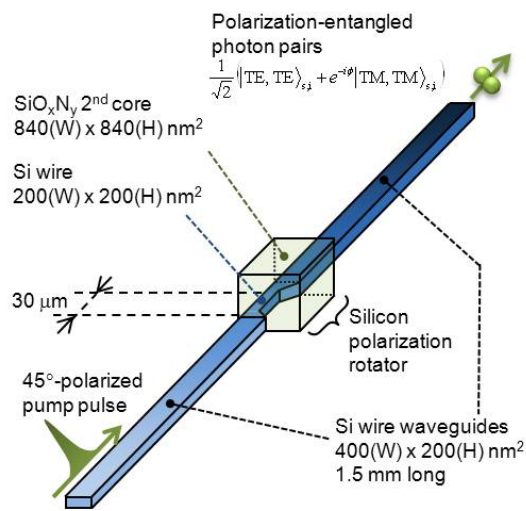


図1: ワンチップ集積化偏波もつれ光源

(2) シリコン PhC CROW を用いた単一光子バッファ実験

時間幅約 20 ps の時間相関光子対パルス的一方を CROW のスローライト効果を用いて遅延させる実験を行い、時間相関を保ったまま最大 150 ps 遅延を与えることに成功した(図2)。また、導波路の温度チューニングにより、CROW の群速度分散特性を変化し、その結果 50 ps の遅延量チューニングが可能であることを示した。さらに、量子もつれ光子対の一

方を CROW によりバッファした後も量子もつれ状態が保持されていることを確認した。これは、シリコンチップ上でコンパクトかつ可変の量子バッファの実現を可能とする技術であり、将来の再構成可能な集積化量子光回路の実現に向けた重要な技術である。

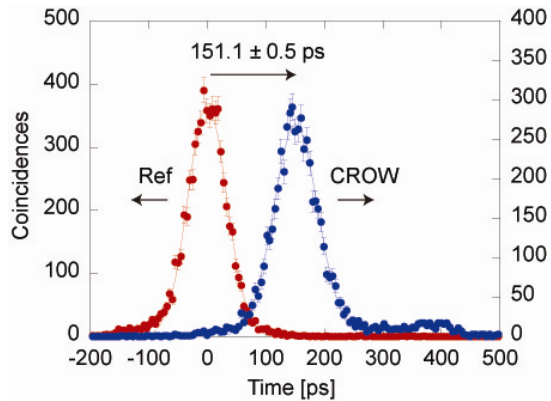


図2: CROW(青)、参照導波路(赤)を時間相関光子対の一方が通過した時の同時計数ヒストグラム波形

(3) シリコン PhC-CROW により増強された非線形光学効果を用いた高効率量子もつれ光子対発生

① 古典的四光波混合の増強

古典的四光波混合実験により、シリコン PhC CROW の実効的非線形定数を評価した。CROW によるスローライト効果により3次非線形光学効果が増強された結果、10,000/W/m という高い非線形定数を観測した。これは、シリコンをコアとするこれまでの光導波路の中で最大の値である。

② 高効率量子相関光子対の発生

①において述べたシリコン PhC CROW の高い非線形定数を利用した SFWM による量子相関光子対の発生を行った。9000/W/m での高効率光子対発生を観測した。Zou-Wang-Mandel の不等式に基づき相関度を評価し、標準偏差の20倍の大きさと同不等式を破ることを確認した。本成果は、シリコンチップ上で極めて小さくかつ高効率な量子もつれ光源を実現可能であることを示唆するものである。

③ 少数共振器列の結合モードを用いた狭帯域パラメトリック利得の観測(当初計画外の成果)

10 個程度の比較的少数の共振器列の結合モードを用い、線幅 1 GHz 程度の狭帯域な3次パラメトリック利得の観測に成功した。本成果は、原子等の物質と光子との相互作用に重要な狭帯域な量子もつれ光源の実現に向けた重要な一歩である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① 武居弘樹, 原田健一, 都倉康弘, 福田浩, 土澤泰, 渡辺俊文, 山田浩治, 板橋聖一, 「シリコン導波路を用いた量子もつれ発生」, オプトロニクス 2011.2, No. 350, pp. 130-133 (2011)
- ② N. Matsuda, T. Kato, K. Harada, H. Takesue, E. Kuramochi, H. Taniyama, and M. Notomi, "Slow light enhanced optical nonlinearity in a silicon photonic crystal coupled-resonator optical waveguide," Opt. Express 19, 19861-19874 (2011), 査読有
- ③ H. Takesue, "Entangled photon pair generation using silicon wire waveguides," IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics 18, 1722-1732 (2012) (invited paper), 査読有
- ④ N. Matsuda, H. Le Jeannic, H. Fukuda, T. Tsuchizawa, W. J. Munro, K. Shimizu, K. Yamada, Y. Tokura, and H. Takesue, "A monolithically integrated polarization entangled photon pair source on a silicon chip," Scientific Reports 2, 817 (2012), 査読有
- ⑤ N. Matsuda, H. Takesue, K. Shimizu, Y. Tokura, E. Kuramochi, and M. Notomi, "Slow light enhanced correlated photon pair generation in photonic-crystal coupled-resonator optical waveguides," Opt. Express 21, 8596-8604 (2013), 査読有

[学会発表] (計 24 件)

- ① 松田信幸, 武居弘樹, 倉持栄一, 納富雅也, 「シリコンフォトニック結晶結合共振器光導波路を用いた非線形パルス圧縮」, 2010 年秋季応用物理学学会学術講演会, 15p-ZW-13 (2010 年 9 月 15 日).
- ② 松田信幸, 加藤拓己, 原田健一, 武居弘樹, 倉持栄一, 納富雅也, 「結合ナノ共振器光導波路における高い光学非線形性」, 2011 年春季応用物理学関係連合講演会, 26p-KA-5 (2011 年 3 月 26 日).
- ③ N. Matsuda, T. Kato, K. Harada, H. Takesue, E. Kuramochi, and M. Notomi, "Highly-efficient four-wave mixing in a coupled

nanocavity waveguide," CLEO/QELS 2011, CFI3, May 6, 2011, Baltimore.

- ④ 松田信幸, "Slow light enhanced optical nonlinearity in photonic crystal coupled-resonator optical waveguides," FIRST 量子情報処理プロジェクト 夏期研修会 2011, 2011/8/13, 京都大学
- ⑤ H. Takesue, "Entanglement generation using silicon wire waveguide," IEEE Summer Topicals 2011, MA3.3, July 18, 2011, Montreal, Canada (招待講演).
- ⑥ N. Matsuda, T. Kato, K. Harada, H. Takesue, E. Kuramochi, M. Notomi, "Slow light enhanced waveguide nonlinearity in ultrahigh-Q photonic crystal coupled resonator chain," Microoptics Conference (MOC) 2011, October 31, 2011, Sendai.
- ⑦ 松田信幸, 武居弘樹, 倉持栄一, 納富雅也, 「フォトニック結晶結合高 Q 共振器列における狭帯域パラメトリック利得の観測」, 第 25 回量子情報技術研究会, ポスター(56) (2011 年 11 月 21 日).
- ⑧ H. Le Jeannic, N. Matsuda, H. Takesue, H. Fukuda, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, K. Yamada, S. Itabashi, Y. Tokura, "Polarization-entangled photon-pair generation using a polarization-rotator-integrated silicon photonic circuit," 第 25 回量子情報技術研究会, ポスター(57) (2011 年 11 月 21 日).
- ⑨ 武居弘樹, 原田健一, 松田信幸, 都倉康弘, 福田浩, 土澤泰, 渡辺俊文, 山田浩治, 板橋聖一, 「シリコン細線導波路における量子もつれ光子対生成とその応用」, 第 16 回シリコンフォトニクス研究会「シリコンフォトニクスの量子光学応用と発光素子」(2011 年 11 月 25 日)(招待講演).
- ⑩ N. Matsuda, "Full integration of polarization-entangled photon pair source on a silicon-on-insulator substrate," FIRST 量子情報処理プロジェクト全体会議 (2011 年 12 月 13 日, 京都).
- ⑪ 松田信幸, 武居弘樹, 倉持栄一, 納富雅也, 「フォトニック結晶高 Q 共振器列における狭帯域パラメトリック利得の観測」, 2012 年春季応用物理学関係連合講演会, 15a-GP1-4

- (2012年3月15日).
- ⑫ 松田信幸, アンナ ルジャニク, 武居弘樹, 福田浩, 土澤泰, 山田浩治, 都倉康弘, 「オンチップ偏波もつれ光子対源」, 2012年春季応用物理学関係連合講演会, 118a-E3-4 (2012年3月18日).
- ⑬ H. Le Jeannic, N. Matsuda, H. Takesue, H. Fukuda, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, K. Yamada, S. Itabashi, and Y. Tokura, "Monolithically-integrated polarization-entangled photon pair source on a silicon-on-insulator photonic circuit," CLEO:2012, QF2F.2, San Jose, California.
- ⑭ N. Matsuda, H. Le Jeannic, H. Fukuda, T. Tsuchizawa, K. Yamada, Y. Tokura, and H. Takesue "Polarization-entangled photon pair source on a chip," 2012 IEEE 9th International Conference on Group IV Photonics (GFP), ThP9, Aug 30, 2012, San Diego, CA.
- ⑮ 松田信幸, アンナ ルジャニク, 武居弘樹, 福田浩, 土澤泰, 山田浩治, 都倉康弘, 「オンチップ偏波もつれ光子対源: 高忠実度化と今後の展望」, 2012年秋季応用物理学学会学術講演会, 13a-B1-1 (2012年9月13日) (講演奨励賞受賞記念講演).
- ⑯ 松田信幸, 倉持栄一, 武居弘樹, 清水薫, 都倉康弘, 納富雅也, 「フォトニック結晶連結共振器における強束縛モード分散の観測」日本物理学会春季大会 28pSB-66 (2013年3月28日).
- ⑰ 武居弘樹, 松田信幸, 倉持栄一, 納富雅也, 「結合共振器光導波路を用いた単一光子バッファ」応用物理学会春季学術講演会 30p-D1-7 (2013年3月30日).
- ⑱ 松田信幸, 「集積フォトニクス技術を用いた光量子情報処理デバイス」, 第三回先端フォトニクスシンポジウム(2013年4月26日 東京 日本学術会議講堂) (招待講演).
- ⑲ N. Matsuda, E. Kuramochi, H. Takesue, K. Shimizu, Y. Tokura, M. Notomi, "Ultra-narrowband nonlinear wavelength conversion using coupled photonic crystal nanocavities," CLEO/Europe-IQEC 2013, CK-1.5, May 12, 2013, Munich, Germany (招待講演).
- ⑳ N. Matsuda, H. Takesue, K. Shimizu, Y. Tokura, E. Kuramochi, M. Notomi, "Slow-light-enhanced correlated photon pair generation in a silicon photonic crystal coupled-resonator optical waveguide," CLEO/Europe-IQEC 2013 IA-6.4, May 15, 2013, Munich, Germany.
- ㉑ 武居弘樹, 松田信幸, 倉持栄一, 納富雅也, 「結合共振器光導波路を用いた単一光子バッファ」, 量子情報技術研究会 (QIT28), 2013年5月28日, 北海道大学.
- ㉒ H. Takesue, N. Matsuda, E. Kuramochi, M. Notomi, "Integrated single photon buffer based on coupled-resonator optical waveguide," CLEO:2013, QTu1C.5, June 11, 2013, San Jose.
- ㉓ N. Matsuda, H. Le Jeannic, H. Fukuda, T. Tsuchizawa, W. J. Munro, K. Shimizu, K. Yamada, and H. Takesue, "Monolithic source of telecom-band polarization entanglement on a silicon photonic chip," CLEO-PR & OECC/PS 2013, ThM1-1, July 4, 2013, Kyoto (講演確定) (招待講演).
- ㉔ 武居弘樹, 「シリコンフォトニクス技術を用いた集積化量子光回路に向けて」, 第74回応用物理学会秋季学術講演会 シンポジウム「量子情報デバイスとその周辺」2013年9月(講演確定) (招待講演).

〔図書〕 (計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計2件)

名称: 偏波もつれ発生素子
 発明者: 松田信幸、武居弘樹、都倉康弘、福田浩、土澤泰、山田浩治
 権利者: 日本電信電話株式会社
 種類: 特許
 番号: 特願 2011-252768
 出願年月日: 2011年11月18日
 国内外の別: 国内

名称: 光子対発生装置
 発明者: 松田信幸、倉持栄一、納富雅也、武居弘樹、清水薫、都倉康弘
 権利者: 日本電信電話株式会社
 種類: 特許
 番号: 特願 2013-097060
 出願年月日: 2013年5月2日
 国内外の別: 国内

○取得状況（計0件）

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武居 弘樹 (TAKESUE HIROKI)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎
研究所 主幹研究員・特別研究員

研究者番号：60393790

(2) 研究分担者

松田 信幸 (MATSUDA NOBUYUKI)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎
研究所 研究員

研究者番号：10587695

倉持 栄一 (KURAMOCHI EIICHI)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎
研究所 主任研究員

研究者番号：10393802

清水 薫 (SHIMIZU KAORU)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎
研究所 主幹研究員

研究者番号：50426607

納富 雅也 (NOTOMI MASAYA)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎
研究所 主幹研究員・上席特別研究員

研究者番号：50393799

(3) 連携研究者

なし