

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02648

研究課題名（和文）自由空間型ユニタリ変換光回路のオンチップ集積化

研究課題名（英文）On-chip integration of free-space unitary optical circuits

研究代表者

松田 信幸（Matsuda, Nobuyuki）

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10587695

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：小型かつ低損失な光量子情報処理デバイスの実現を目指し、自由空間光学系に基づくユニタリ変換光回路をシリコンチップ上に小型集積することに成功した。深掘エッチングを用いたシリコン基板の微細加工により、500個以上のシリコン薄膜型ビームスプリッタを基板上に集積した多モード光干渉回路を実現した。個々のビームスプリッタの動作や、表面形状、出力ビーム特性の観測などを行い、干渉明瞭度の高い線形光学回路の実現に成功した。これにより、従来の光導波路型光回路と同等の集積度を有しつつ光伝搬損失が低減された、新しい光干渉回路プラットフォームを開拓した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ユニタリ変換光回路は、光量子情報分野のみならず、光を用いたニューラルネットワーク計算などの広範な分野における光演算分野において近年活発に研究・応用されている重要なデバイスである。本研究成果は、そのような光デバイスの新たなアーキテクチャの可能性を低光伝搬損失性という大きな利点とともに示すものである。今後、ミラーやレンズといった様々な光学素子も小型集積化できれば、量子技術や光演算に限らず、通信やセンシングといった光科学技術全般における自由空間型光デバイスの小型化につながる事が期待される。

研究成果の概要（英文）：Aiming to realize compact and low-loss optical quantum information processing devices, we have successfully manufactured unitary optical circuits based on free-space optics on a silicon chip. With the deep reactive ion etching technology, a multimode optical interference circuit with more than 500 silicon thin-film beamsplitters has been realized. Optical response of the individual beamsplitters as well as the output beam characteristics of the multiport interferometer indicated the successful realization of a linear optical circuit with a high interference visibility. The result pioneered a new optical interference circuit platform with the same level of integration as conventional optical waveguide-based circuits but with reduced optical propagation loss toward large-scale optical quantum devices.

研究分野：量子光学

キーワード：シリコンフォトンクス 光干渉計 光量子情報

1. 研究開始当初の背景

量子計算は、創薬や材料開発といった重要分野において、特定の問題を効率よく解くことができるため、次世代の情報処理技術として大きな注目を集めている。その数ある実現方法の中で、光を用いた方式は、室温動作が可能、光ファイバーを用いたデバイス間通信が可能であること等から優れている。近年、光量子計算機の大規模化のため、その構成要素である光干渉回路、すなわちユニタリ変換光回路を、光導波路を用いてチップ上に小型集積化する研究が盛んに行われている。しかしながら、導波路における光閉じ込めに伴う導波損失の存在が、多光子を用いた量子計算実験において大きな問題となっている。そんな中、導波損失を生じない自由空間光学系に基づくユニタリ変換光回路を小型化した研究が報告された (Nat. Photon. **11**, 361 (2017))。この回路は、ガラス基板上に形成された薄膜ビームスプリッタを基板を介して接続し多層化したものであり、自由空間光学系でありながら小型かつ経路長安定な光回路を実現している。この回路は従来の光学台上に作製された自由空間型光回路に比べて大幅に小型であり、導波路型光回路に比べ圧倒的に低損失である。このような空間型回路をさらに小型化できれば、導波路回路と同等の集積度を有する理想的な光回路プラットフォームが実現できる可能性がある。

2. 研究の目的

そこで本研究では、光の伝搬損失が生じない自由空間光学系に基づくユニタリ変換光回路のさらなる小型化を目的とした研究を実施した。シリコン基板の深掘エッチング加工により、シリコン薄膜型のビームスプリッタを高密度に集積した全く新しい形の自由空間型ユニタリ変換光回路(図1)を提案するとともに、実際にデバイスを設計、試作し、その動作検証を行った。個々のシリコン薄膜のビームスプリッタ動作特性と、複数ビーム入力時の光干渉特性を評価し、試作素子が線形光学回路として動作することを検証した。

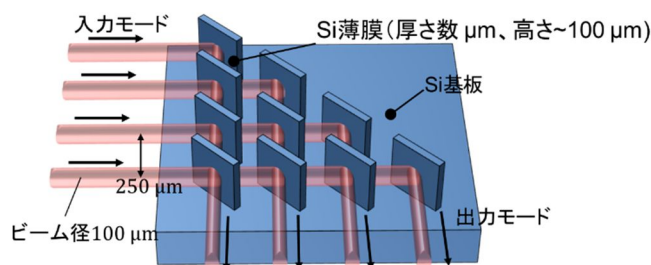


図1 単一 Si 基板上の自由空間型ユニタリ変換光回路

3. 研究の方法

はじめにデバイス試作に先立ち、干渉計として動作させることが可能な素子構造や回路レイアウトの検討を行った。薄膜の膜厚やピッチ、配置などを検討し、高い光干渉明瞭度が実現できるような構造を、電磁界解析を含む計算機シミュレーションを用いて目指した。また、単体の Si 薄膜がビームスプリッタとして動作することを実験的に確認した。素子の試作は深掘エッチング加工が可能な外部の MEMS ファウンドリに依頼した。Si 薄膜が自立する膜厚の条件や、ビームスプリッタとしての動作特性、表面状態の荒れ等を、主に光学測定によって評価した。また、膜表面に荒れがみられる場合の除去も検討した。素子の試作は研究期間内に計 3 回実施した。同時に、ビームスプリッタ以外の光学素子の実現可能性についても検討を行った。

4. 研究成果

まず、シリコン薄膜がビームスプリッタとして動作することを確認した。市販の厚さ 2 μm のシリコンメンブレンに対し、本デバイスの設計波長である 1.5 μm 通信波長帯のレーザーを入射角 45°で入力し、透過光と反射光が得られること、それらの波長依存性が膜厚で説明できることを確認した。次いで回路設計を実施した。その際、入力光が Si 薄膜を通過する際に生じる位置ずれを相殺するための素子配置を検討した。また数値シミュレーションにより、当該回路が 90% 以上の高い干渉明瞭度を示すこと、Si 薄膜を通過する際に生じるビーム波面の傾きが回路動作に影響がないこと等を理論的に確認した。同時に、回路に光を入出力するための光ファイバアレイおよびレンズを選定し、そのビーム径や拡がりなども設計に反映した。

設計に基づき、光回路のマスクパターンを作成した。膜厚は 3 ~ 10 μm の範囲で 4 水準とし、回路規模(入出力ポート数)は 28、対応する薄膜枚数は 576 枚、薄膜高さは 130 μm、薄膜ピッチは 250 μm とした。試作素子について、走査型電子顕微鏡による観察を行った。その結果(図2)膜厚 5 μm 以上の回路について、薄膜の倒れがほとんど見られない回路が作製できていることが分かった。一方、膜厚 3 μm の回路については、薄膜下部が薄いことからパターンの倒れが目立った。また詳細な観察の結果、薄膜表面の荒れは一般的な深掘エッチングから想定される値

よりも小さいことや、基板にほぼ垂直に薄膜が形成できていることが分かった。

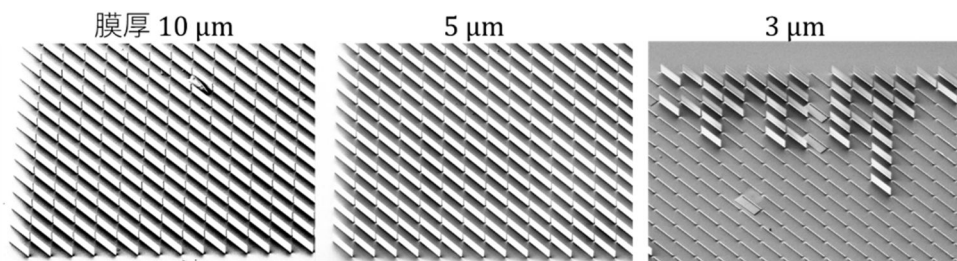
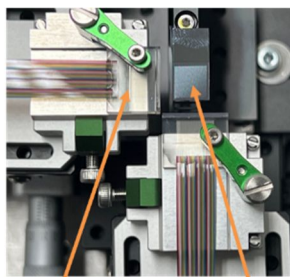


図2 試作素子のSEM像

次いで、ファイバピッチ 250 μm の光ファイバアレイから出射した波長 1.55 μm のビームをコリメートレンズアレイで平行光にしたのち、試作回路に入力した(図3)。出力ビームパターンを InGaAs カメラで評価した結果、250 μm ピッチでほぼ等間隔にビームが出力していることが確認された。また、任意の2つの入力ポートに光波を同時に入力し、出力画像を観測した結果、入力光の相対位相に応じてスポットが明滅する様子を確認することができ、回路の光干渉動作を確認することができた。さらに光の散乱損失に直結する素子表面の荒れを詳細に評価するため、原子間力顕微鏡を用い、Si 薄膜の表面荒れを評価した。その結果(図4) 試料の表面粗さは乗平均平方根値で 10 nm 以下であり、当初設定した目標値を上回る水準にあることが分かった。また、膜厚のばらつきを様々な膜厚の試料について調査した結果、膜厚の製造誤差は想定よりも小さいことが判明し、制御性良くビームスプリッタを作製できることが分かった。



コリメートレンズ付ファイバアレイ 試料(光回路)

図3 試料と光入出力用光ファイバ

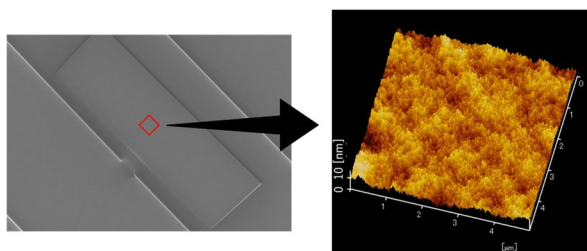


図4 試作素子のSEM画像

次いで素子を光回路として動作させるため、入力側と出力側の両方に光ファイバアレイを設置し、光の入出力特性を調べた。その結果、出力側ファイバアレイに結合する光強度を、全てのポートについて同時に最大化できないことが判明した。また、薄膜単体からの反射光の波長依存性がほぼ見られず、干渉明瞭度で10%以下と極めて小さかった。この原因について調査したところ、シリコン薄膜側面に存在する角度1度以下の微小な傾斜が、個々の薄膜での干渉特性の劣化やビーム出力方向の変化を招いていることが分かった。

そこで、プロセス条件を変更し再度の試作を実施した。結果(図5) 表面荒れの若干の犠牲を伴うものの、傾斜角度0.1度を下回る微小な傾斜角をもつ薄膜アレイを、膜厚7 μm以上の条件で作成することができた。同時に薄膜高さ(深掘深さ)も185 μmに改善され、通過ビームのケラレがほとんど無い高さへと改善することができた。SEM像より薄膜上部に荒れがみられるが、この領域には光がほとんど当たらないため、干渉計動作への影響は小さいと考えられる。

試作素子について薄膜からの反射光強度を評価した結果、図6に示すように大きな波長依存性が確認できた。実験値から得られた干渉明瞭度は前回試作の10%から約80%へと大幅に向上し、ほぼ設計通りの特性へと大幅に改善された。また、光入力ポートに光波を入力した際にみられる

反射光のビームパターンを観察した結果（図 7）、いずれの入力ポートについてもスポットが明瞭に分離したパターンが観測された。このパターンは薄膜をただ等間隔で配置した試料については大きく崩れており、本研究での回路設計が適切に機能していることが確認できた。次いで、任意の 2 ポートから光を入力して光波干渉の干渉明瞭度を評価した結果、出力ビームについて 95%以上という極めて高い干渉明瞭度を観測することができ、試作素子の多モード光干渉回路としての良好な動作を得ることに成功した。

一方で表面粗さは従来よりも増したため、水素アニールによる表面状態改善を試みた。その結果、構造は平滑化されたものの、表面の残留物等の影響か、薄膜の一部に周期的な空孔様のパターンが現れる結果となった。今後さらなる研究を行い、このような凹凸が低減可能かどうか検討する。

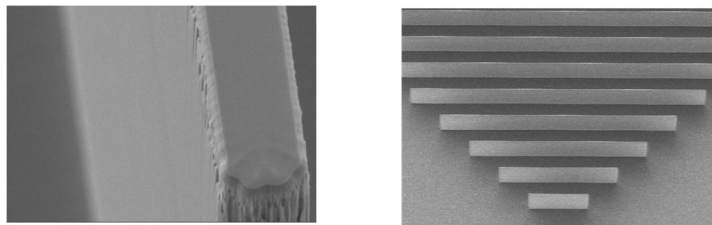


図 5 薄膜表面の傾斜を改善した試作素子。右図のように薄膜が連結した構造についても試作した。

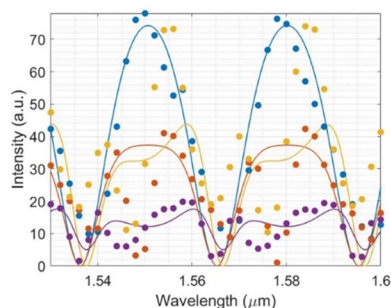


図 6 回路出力光強度の波長依存性

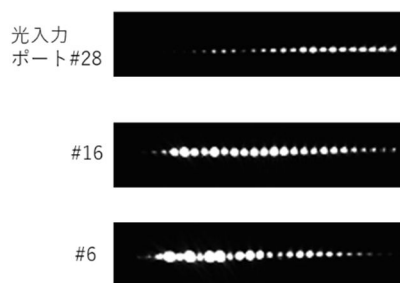


図 7 回路からの出力ビーム像

ほか、当初予定になかった成果として、深掘エッチングで実現することが困難な不規則な薄膜パターンを生成できるポストプロセス法を新たに見出した。このことにより、格子状に規則的に配置されたパターンだけではなく、ビームスプリッタ数個だけや量子論理ゲート用の干渉計といった任意の配置が可能となり、用途に合わせて薄膜を配置することが可能となる。本研究で得られた一連の設計方法について現在特許出願等を進めている。

以上、本研究では、自由空間光学系に基づくユニタリ変換光回路をシリコンチップ上に小型集積することに挑戦した。深掘エッチングを用いたシリコン基板の微細加工により、500 個以上のシリコン薄膜型ビームスプリッタを基板上に集積した多モード光干渉回路を実現した。個々のビームスプリッタの動作や、表面形状、出力ビーム特性の観測などを行い、高い光干渉明瞭度を示す光回路の作成に成功した。ユニタリ変換光回路は、光量子情報分野のみならず、光を用いたニューラルネットワーク計算などの広範な分野における光演算分野において近年活発に研究・応用されている重要なデバイスである。本研究成果は、そのような光デバイスの新たなアーキテクチャの可能性を低光伝搬損失性という大きな利点とともに示すものである。今後、ミラーやレンズといった様々な光学素子も小型集積化できれば、量子技術や光演算に限らず、通信やセンシングといった光科学技術全般における自由空間型光デバイスの小型化につながることを期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nobuyuki Matsuda	4. 巻 2022
2. 論文標題 On-chip sources of entangled photons for quantum information processing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Photonics Review	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11470/photo.220205	査読の有無 無
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 松田信幸	4. 巻 42
2. 論文標題 シリコンフォトニクスを用いた量子情報デバイス	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 月刊オプトロニクス	6. 最初と最後の頁 77-81
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 -

1. 著者名 Pelucchi Emanuele, Fagas Giorgos, Aharonovich Igor, Englund Dirk, Figueroa Eden, Gong Qihuang, Hannes Hubel, Liu Jin, Lu Chao-Yang, Matsuda Nobuyuki, Pan Jian-Wei, Schreck Florian, Sciarrino Fabio, Silberhorn Christine, Wang Jianwei, Jons Klaus D.	4. 巻 4
2. 論文標題 The potential and global outlook of integrated photonics for quantum technologies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Reviews Physics	6. 最初と最後の頁 194-208
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s42254-021-00398-z	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 菊地涼、石川巧、土師康平、山田博仁、松田信幸	4. 巻 6
2. 論文標題 自己相似光導波路アレイにおける光局在の実証	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 フォトニクスニュース	6. 最初と最後の頁 -
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 -

1. 著者名 松田信幸	4. 巻 33
2. 論文標題 シリコンフォトニクスを用いた量子情報処理	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 光アライアンス	6. 最初と最後の頁 20-24
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 -

1. 著者名 松田信幸	4. 巻 48
2. 論文標題 ボゾンサンプリングと線形光学回路	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 481-485
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 -

1. 著者名 高磊, 石澤淳, 松田信幸, 山田浩治	4. 巻 48
2. 論文標題 Si集積プラットフォームの非線形光学応用開拓	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 530-534
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 -

1. 著者名 松田信幸, 山田博仁, 枝松圭一, 三浦義隆, 福田大治	4. 巻 39
2. 論文標題 量子集積フォトニクスの展望	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 月間オプトロニクス	6. 最初と最後の頁 111-115
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 -

1. 著者名 松田信幸	4. 巻 50
2. 論文標題 光導波路を用いた量子情報処理デバイス	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 光学	6. 最初と最後の頁 29-33
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31件 (うち招待講演 16件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Nobuyuki Matsuda
2. 発表標題 Silicon photonics for quantum information and communication
3. 学会等名 CLEO Pacific Rim 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nobuyuki Matsuda
2. 発表標題 Integrated photonics for quantum information and communication technologies
3. 学会等名 CLEO Pacific Rim 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nobuyuki Matsuda
2. 発表標題 Silicon photonics for quantum information and communication technologies
3. 学会等名 第83回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松田信幸
2. 発表標題 半導体光回路を用いた量子情報技術
3. 学会等名 第83回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松田信幸
2. 発表標題 シリコンフォトニクスを用いた光量子情報処理
3. 学会等名 日本学術振興会 R025先進薄膜界面機能創成委員会 第11回研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nobuyuki Matsuda
2. 発表標題 Photonic quantum information processing: devices and applications
3. 学会等名 2022 International Workshop on Emerging ICT（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松田信幸
2. 発表標題 光導波路回路の基礎と量子情報処理
3. 学会等名 量子エレクトロニクス研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 境野一輝、小田川朋史、木村彰吾、稲垣拓也、湯涵智、谷澤健、池田和浩、岡野 誠、竹中充、山田博仁、松田信幸
2. 発表標題 回路深さが削減された万能ユニタリ変換光回路の実証
3. 学会等名 光エレクトロニクス研究会 (OPE) 2月研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木村 彰吾、境野一輝、楊帆、 岡野誠、竹中充、山田 博仁、松田 信幸
2. 発表標題 シリコン細線導波路を用いた1モードスクイーズド真空場の発生
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松田信幸
2. 発表標題 量子コンピューティングのための光集積回路デバイス
3. 学会等名 IEEE Sendai Life Members Affinity Group (LMAG) 第1回講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuyuki Matsuda
2. 発表標題 Quantum Information Processing Using Integrated Photonics
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL) 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松田信幸
2. 発表標題 光集積回路による量子計算技術の現状と将来展望
3. 学会等名 電子情報通信学会 SNT研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石川巧, 稲垣拓也, 菊地涼, 土師康平, 山田博仁, 松田信幸
2. 発表標題 自由空間型線形光学回路のオンチップ集積化に関する検討
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fan Yang, Masaki Fukunaga, Keiichi Edamatsu, Hiroyuki Yokoyama, Hirohito Yamada, Nobuyuki Matsuda
2. 発表標題 Correlated Photon Pairs Generation from a Silicon Micro-ring resonator with a Gain-Switched Laser Diode
3. 学会等名 26th Microoptics Conference
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松田信幸
2. 発表標題 シリコン光集積回路を用いた量子計算
3. 学会等名 東北大学電気情報産学官フォーラム2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yixin Wang, Kohei Haji, Shunsuke Abe, Takuya Inagaki, Yoshiaki Kanamori, Keiichi Edamatsu, Hirohito Yamada, Nobuyuki Matsuda
2. 発表標題 Hydrogen Annealing Effect on Silicon Optical Waveguide
3. 学会等名 The 4th International Forum on Quantum Metrology and Sensing (4th IFQMS)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松田信幸
2. 発表標題 光量子コンピューティングの最新動向
3. 学会等名 第29回フォトニックデバイス・応用技術研究会ワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuyuki Matsuda
2. 発表標題 Silicon Photonics for Quantum Information and Communication
3. 学会等名 FY 2021 RIEC Annual Meeting on Cooperative Research Projects
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋知頌, 岡谷泰佑, 松田信幸, 金森義明
2. 発表標題 Si細線導波路に対する水素アニール処理の検討
3. 学会等名 令和4年東北地区若手研究者研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村彰吾、境野一輝、谷澤健、岡野誠、竹中充、山田博仁、松田信幸
2. 発表標題 シリコン光導波路を用いた多チャネル量子光源の設計
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 境野一輝、木村彰吾、小田川朋史、谷澤健、岡野誠、竹中充、山田博仁、松田信幸
2. 発表標題 シリコン光導波路を用いた量子計算用ユニタリ変換光回路の設計
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 稲垣拓也、石川巧、金森義明、山田博仁、松田信幸
2. 発表標題 オンチップ自由空間線形光学回路の動作検証
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福永雅樹、楊帆、枝松圭一、横山弘之、山田博仁、松田信幸
2. 発表標題 Q値変調微小リング共振器を用いた相関光子発生
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nobuyuki Matsuda
2. 発表標題 On-chip photonic devices for quantum information processing
3. 学会等名 IEEE Photonics conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松田信幸
2. 発表標題 光集積回路を用いた量子情報処理
3. 学会等名 第19回フォトニクスイノベーションセミナー (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松田信幸
2. 発表標題 量子情報処理のための光導波路回路技術
3. 学会等名 フォトニックデバイス・応用技術研究会 第29回ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菊地涼、石川巧、土師康平、山田博仁、松田信幸
2. 発表標題 自己相似導波路アレイにおける光局在の実現
3. 学会等名 電子情報通信学会 光エレクトロニクス研究会(OPE) 2月研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菊地涼、石川巧、土師康平、山田博仁、松田信幸
2. 発表標題 自己相似導波路アレイにおける光局在の実現
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松田 信幸, 服部 香里, 石川 巧, 鴻池 遼太郎, 吉澤 明男, 池田 和浩, 山田 博仁, 福田 大治, 岡野 誠, 竹中 充
2. 発表標題 シリコン導波路から発生した量子相関光の光子数識別検出
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fan Yang, Masaki Fukunaga, Keiichi Edamatsu, Hiroyuki Yokoyama, Hirohito Yamada, Nobuyuki Matsuda
2. 発表標題 Generation of Correlated Photon Pairs from a Silicon Micro-ring Resonator Using a Gain-Switched Laser Diode
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菊地 涼, 石川 巧, 土師 康平, 山田 博仁, 松田 信幸
2. 発表標題 自己相似光導波路アレイにおける光局在の実証
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021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	金森 義明 (Kanamori Yoshiaki) (10333858)	東北大学・工学研究科・教授 (11301)	
研究 分担者	山田 博仁 (Yamada Hirohito) (60443991)	東北大学・工学研究科・教授 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------