

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：12201

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14548

研究課題名（和文）シリコンフォトニックチップ上での光短パルス振幅形状・位相測定技術の研究

研究課題名（英文）Study on measurement of amplitude and phase of optical short pulse on a silicon photonic chip

研究代表者

近藤 圭祐（Kondo, Keisuke）

宇都宮大学・工学部・助教

研究者番号：80878413

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）：本研究はシリコンフォトニクス技術により製作するチップサイズの光短パルス測定器の開発を目指した。本研究によって、チップサイズの光相関器と波長可変フィルタの組み合わせによる短パルスの振幅と位相の測定を実証できた。光相関器は長さ1.36 mmの光導波路上に埋め込まれた32個の二光子吸収フォトダイオードアレイで構成される。波長可変フィルタの走査によりピコ秒パルスの波長を1545.5-1555.0 nmの範囲で分解し、それぞれの波長における相関関数を測定することでスペクトログラムを取得した。そして、そのスペクトログラムからパルスの振幅と位相を再生することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

シリコンフォトニクスを含む微小光デバイスの分野では、発光、受光、変復調、伝送、スイッチング、波長合分波、偏光制御といった様々な素子と技術が長年研究されている。しかし、短パルス波形の計測技術に関しては、光相関計（パルス時間幅の測定器）のチップスケール化がほんの数例報告されている程度で、ほとんど未開拓の領域といえる。本研究結果により、光短パルスの位相を含む詳細な波形をシリコンフォトニクスチップ上の極めて微小な領域で測定できることが世界で初めて実証された。これは光パルスの産業応用の拡大にも貢献するものと期待される。

研究成果の概要（英文）：The target of this study is the development of a chip-scale optical short pulse measurement device fabricated with silicon photonics technology. In this study, the measurement of amplitude and phase of the short pulses using a chip-scale optical correlator and tunable filter was demonstrated. The optical correlator is composed of an array of 32 two-photon absorption photodiodes embedded on a 1.36-mm-long waveguide. The spectrum of a pico-second pulse was resolved by the tunable filter, which was scanned in the region of 1545.5-1555.0 nm, and a spectrogram was obtained by measuring the correlation waveform at each filtered wavelength. We succeeded in retrieving the amplitude and phase of pulse from the spectrogram.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：シリコンフォトニクス 集積光デバイス 光検出器 光パルス波形測定器

1. 研究開始当初の背景

光短パルス光源はその開発以来、レーザー加工、光周波数コム、分光分析、LiDAR (Light Detection and Ranging) などの応用が開拓されている。パルス光源の開発、維持、校正にはパルス特性の測定器が必要である。光短パルスを生成して伝達させる経路の分散の計測や調整においてはパルスの位相情報が必要である。光パルスの搬送波は高周波のようにオシロスコープで測定することはできないため、その測定には周波数分解光ゲート法 (Frequency Resolved Optical Gating: FROG) や SPIDER (Spectral Phase Interferometry for Direct Electric field Reconstruction) と呼ばれる手法・装置が広く用いられている。これらはどんなに高速な光検出器を以ってしても測れない搬送波の波形を計測できる装置であるが、高調波発生光のスペクトルを分光器で測定する原理のために、サイズ、感度、機械的堅牢さに関しては優れているとはいえない。よって、装置の安定と測定環境の安全が確保された場所でなければ利用できないということが常識となっている。

2. 研究の目的

本研究グループはこれまでに、シリコンフォトニクス技術を用いたオンチップの光相関計を開発してきた [1], [2]。この光検出部はシリコン導波路上に二光子吸収フォトダイオード (Two-Photon Absorption Photodiode: TPA-PD) をアレイ化した構造であり、分光器が不要であるため、小型、堅牢、高感度という特長をもつ。さらに典型的な光相関計のような可変遅延線も必要なく、完全集積型のソリッドステートデバイスである。このような特長によってあらゆるシーンでの使用が可能になる。光相関計はパルスの時間幅の測定器であり、FROG のように位相を含む波形を測ることはできないが、光相関器に波長可変フィルタによる波長分解を組み合わせると、搬送波の波形を測定できるということが報告されている[3], [4]。これを踏まえて本課題研究では、上記 TPA-PD アレイ光相関器と波長可変フィルタを組み合わせることで、オンチップの短パルス波長測定器の実現を目指した。

3. 研究の方法

(1) 原理

本課題研究で提案する測定器では、光のスペクトルの時間変化、すなわちスペクトログラムを測定し、そのスペクトログラムよりパルスの振幅と位相を再生する。これは FROG と似た方法であるが、提案の測定器ではスペクトログラムを取得するために波長可変フィルタと光相関器を用いる。フィルタを通過したある波長成分の時間相関関数を測定し、フィルタの中心波長をパルスのスペクトル全域に渡って走査しながら相関関数を測定することでスペクトログラムを取得する。この手法によってピコ秒パルスの振幅と位相を再生した成果が報告されている [3], [4]。しかし、遅延走査と波長走査の2次元的な走査が必要で測定時間が長くなる問題があり、今日実用化されているパルス波形測定にこの手法は見られない。ここで、提案のパルス測定器の構成を図1に示す。光相関器はシリコン導波路上に形成された TPA-PD アレイで構成される。この測定器のターゲット波長は通信波長帯であり、シリコン中で TPA を起こす。TPA-PD アレイの両端から光パルスを同時に入射し、導波路に沿った TPA 電流分布を検出することで相関関数を得られる。分岐したパルスの一方を中心周波数 ω_n でフィルタすることで ω_n に関する相関関数を取り、さらにフィルタを走査しながら相関関数を測定することでスペクトログラムを得られる。TPA-PD アレイ光相関器を用いることで遅延走査器が不要となり、波長フィルタの走査だけでスペクトログラムが

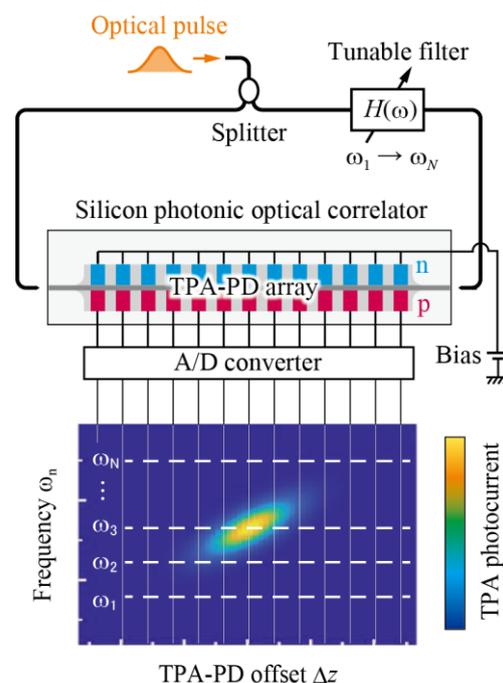


図1 提案のパルス波形測定器の構成 (上) と測定されるパルススペクトログラム (下) の模式。

得られるため、文献 [3],[4] とは異なり高速な測定が可能になる。さらに、シリコン細線導波路に光を強く閉じ込めるため TPA 効率がよく、高感度である。また、光学系全体をチップ集積できるので、超小型かつソリッドステートのパルス振幅・位相測定器を実現可能である。スペクトログラムより振幅と位相を再生する計算法については文献 [3],[4] を参照されたい。

(2) 製作デバイス

本研究では、光相関器と、波長可変フィルタとしてマイクロリングフィルタを CMOS 互換プロセスを用いて製作した。図 2(a) に製作したシリコンフォトニクス光相関器の顕微鏡写真を示す。リブ導波路上にアレイ数 32 の TPA-PD を $40\ \mu\text{m}$ ピッチで形成した。TPA-PD アレイ導波路の全長は $1.36\ \text{mm}$ である。アレイピッチを p 、導波路の群屈折率を n_g ($n_g \approx 4$)、真空中の光速を c とおくと、相関関数の遅延分解能は $\Delta t = 2pn_g/c$ で得られ、 $\Delta t \approx 1.1\ \text{ps}$ である。図 2(b) は TPA-PD の拡大である。隣接する p 領域間には $1.2\ \mu\text{m}$ の真性半導体領域の間隙を設け、各 TPA-PD が独立に電流を検出できるようにしている。n 側は電氣的に共通化されている。図 2(c) はマイクロリングフィルタの顕微鏡写真である。マイクロリングの上層に TiN のヒーターを集積しており、電流注入による温度変調によってマイクロリングの共振波長を制御し、フィルタ中心波長を走査する。TPA-PD アレイの光電流を並列に読み取るために 32ch A/D 変換器 (ADC) を用いた。これを、光相関器が集積されたシリコンフォトニックチップとともにプリント基板回路 (PCB) に実装した (図 2(d))。

(3) パルス波形測定実験

まず、シリコンフォトニクス光相関器と市販のベンチトップ型波長可変フィルタを用いてパルス測定の動作実証の実験を行った。被測定パルスを分岐し、一方はベンチトップの波長可変フィルタを通して、もう一方は波長可変フィルタを通さずに TPA-PD アレイ光相関器の両端から同時に入射した。TPA-PD の光電流を PCB 上で接続された ADC によって読み取り、相関関数を計測した。そして、波長可変フィルタの波長走査と ADC による相関関数測定をコンピュータ制御で連動させ、スペクトログラムを取得した。パルスの振幅と位相を再生した。中心波長 $1550\ \text{nm}$ のモードロックレーザーから繰り返し周波数 $20\ \text{MHz}$ で出力されたパルスに、分散係数 $D_\lambda = 17\ \text{ps/nm/km}$ 、長さ $L = 0.1\ \text{km}$ のシングルモードファイバ (Single Mode Fiber: SMF)、もしくは $D_\lambda = -140\ \text{ps/nm/km}$ 、 $L = 0.01\ \text{km}$ の分散補償ファイバ (Dispersion Compensating Fiber: DCF) を用いて正負のチャープパルスを生成し、それらの波形を測定した。また、これらを用いない場合はほぼチャープのないパルスが生成され、その波形も測定した。このとき、フィルタの中心波長は被測定パルスのスペクトル全域をカバーするように $1545.0\text{--}1555.5\ \text{nm}$ の範囲で、 $0.117\ \text{nm}$ ステップで走査した。また、フィルタ通過帯域幅は $1.0\ \text{nm}$ に設定した。

次に、光相関器とマイクロリングフィルタを一つのシリコンフォトニクスチップに集積し、これを用いてパルス波形測定の実証実験を行った。被測定パルスの中心波長は $1545\ \text{nm}$ で、また、ここではパルスには分散を与えずに測定した。フィルタの中心波長は $1540.0\text{--}1555.0\ \text{nm}$ の範

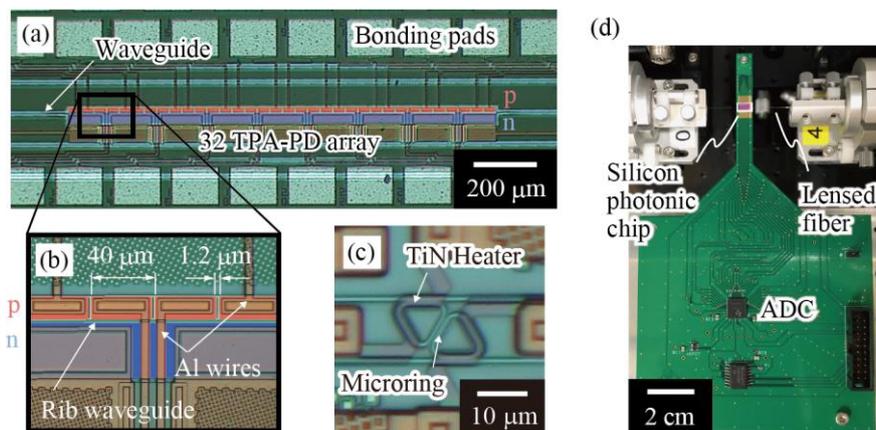


図 2 製作したデバイスと電子回路。(a) シリコンフォトニクス光相関器の全体と (b) TPA-PD の拡大。(c) マイクロリングの拡大写真。(d) TPA-PD 光電流読み出し用の電子回路とシリコンフォトニクス光相関器チップが集積された PCB。

囲で、0.117 nm ステップで走査した。フィルタ通過帯域幅は 0.6 nm であった。また、再生された振幅と位相の妥当性を比較評価するため、市販の FROG も用いて同じパルスを測定した。

4. 研究成果

まず、シリコンフォトニクス光相関器と市販の波長可変フィルタを用いて測定されたスペクトログラム、ならびに、時間領域、スペクトル領域の振幅と位相を図 3 に示す。振幅と位相については市販の FROG で測定した結果を重ねて示す。パルスに分散を与えないとき、スペクトログラムはほぼ左右対称となり (図 3(a)), 位相は時間領域とスペクトル領域の両方においてパルス中心付近で水平な直線となった (図 3(b), (c))。一方, SMF を用いて正のチャープをパルスに与えたとき, スペクトログラムは短波長成分が早く到来する様子を示し (図 3(d)), 時間領域, スペクトル領域の位相はそれぞれ下に凸, 上に凸の放物線的な曲線を示した (図 3(e), (f))。さらに, DCF を用いて負のチャープを与えたときは, 正のチャープを与えたときとは逆の特性を示した (図 3(g)-(i))。以上より提案の測定器はパルスのチャープの有無とその正負を正しく測定できたといえる。周波数領域の位相 (スペクトル位相) に関しては本測定器と市販の FROG の測定結果がよく一致していた。ここで, 光パルスの周波数を θ , 中心波長を λ とおき, 図 3(f) と (i) のスペクトル位相 $\phi(\theta)$ から以下の式

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d^2\phi(\theta)}{d\theta^2}$$

を用いてパルスに与えられた分散 D [ps/nm] を計算したところ, SMF と DCF を用いた場合でそれぞれ 1.8 ps/nm と -1.5 ps/nm であった。この結果は実験で用いた SMF と DCF の分散係数と長さの積 $D \cdot L$ (SMF: 1.7 ps/nm, DCF: -1.4 ps/nm) とよく一致し, パルスのチャープの大きさも適切に測定できたといえる。一方で, 提案デバイスと市販の FROG の振幅の測定結果を比較すると, 提案デバイスではパルスの時間幅は広く, スペクトル幅は狭く測定された。これは特に, チャープを与えていない結果において顕著であった。この原因はスペクトログラムから振幅と位相を再生する計算過程にあると考えている。また, 時間領域の位相についても本測定器と市販の FROG の測定結果に誤差が見られるが, 時間波形は再生されたスペクトルをフーリエ変換して求めているので, スペクトル振幅に誤差があることが時間領域の位相の誤差の原因である。以上の研究成果は学術論文誌 IEEE Photonics Technology Letters に掲載された他, 米国国際会議 CLEO 2023 にて発表された。

次に, 光相関器とマイクロリングフィルタを一体集積したデバイスを用いて測定されたスペクトログラム, ならびに, 時間領域, スペクトル領域の振幅と位相を図 4 に示す。パルスのスペクトログラムを得ることはできたが, 市販の波長可変フィルタを用いた測定結果 (図 3) と比べ

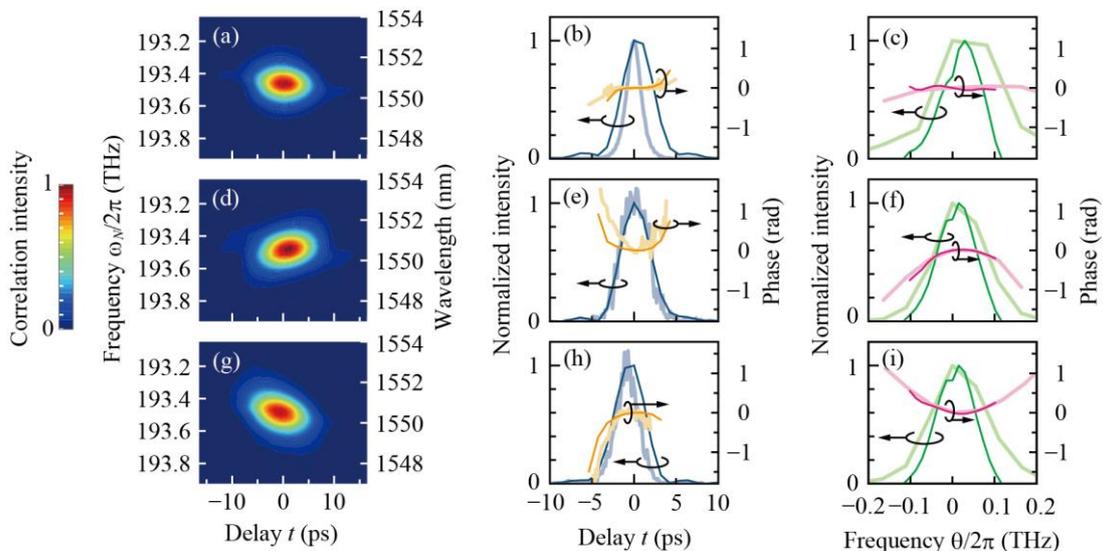


図 3 シリコンフォトニクス光相関器と市販の波長可変フィルタを用いて測定されたスペクトログラム, 時間領域とスペクトル領域の振幅と位相。(a)-(c) 分散を与えていないパルス, (d)-(f) 正の分散を与えたパルス, (g)-(i) 負の分散を与えたパルスの測定結果。色が濃く細い線が提案の測定器, 色が薄く太い線が市販の FROG で測定された結果。

るとスペクトログラムの形状に歪みが見られる。これはマイクロリングフィルタの波長走査精度が不足していることが原因であると考えられ、今後、フィルタ波長走査用マイクロヒーターの電流制御を高精度化する必要がある。このスペクトログラムの歪みによって、再生されたスペクトルの振幅と位相にも大きな誤差が生じてしまった。時間波形についてはパルスの概形を再生できているが、パルスの裾に誤差が見られた。また、あまり目立たないが、スペクトログラムのバックグラウンドのノイズレベルも高くなっており、これもスペクトルの再生に誤差を与える要因となっていると考えられる。したがって、マイクロリングフィルタの波長走査精度と阻止帯域の抑圧比を改善することが今後の課題である。このような課題は残ったが、本課題研究によって、光短パルスの波形を完全オンチップで測定することを世界で初めて実証できた。本研究結果は国内学会で1件発表された。

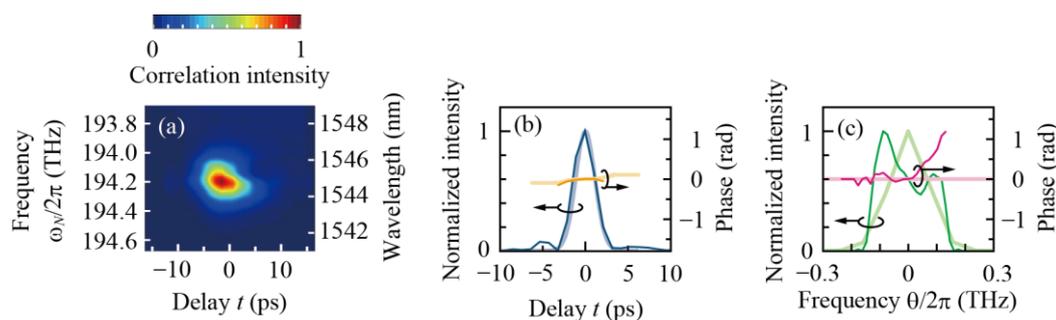


図 4 光相関器とマイクロリングフィルタを一体集積したデバイスで測定された (a) スペクトログラム, (b) 時間領域と (c) スペクトル領域の振幅と位相。色が濃く細い線が提案の測定器, 色が薄く太い線が市販の FROG で測定された結果。

参考文献

- [1] K. Kondo and T. Baba, "On-chip autocorrelator using counter-propagating slow light in a photonic crystal with two-photon absorption photodiodes," *Optica* **4**, 1109-1112 (2017).
- [2] K. Kondo and T. Baba, "High-performance on-chip autocorrelator using a rib waveguide loaded with two-photon absorption diodes," *Opt. Lett.* **43**, 719-722 (2018).
- [3] K. Kikuchi and K. Taira, "Theory of sonogram characterization of optical pulse," *IEEE J. Quantum Electron.* **37**, 533-537 (2001).
- [4] K. Taira and K. Kikuchi, "Optical sampling system at 1.55 μm for the measurement of pulse waveform and phase employing sonogram characterization," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13**, 505-507 (2001).

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 0件）

1. 著者名 Kondo Keisuke, Oshima Hiroki, Sugihara Okihiro	4. 巻 35
2. 論文標題 Measurement of Amplitude and Phase of Optical Pulse Using a Silicon Photonics Optical Correlator	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Technology Letters	6. 最初と最後の頁 609 ~ 612
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/lpt.2023.3266765	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 -

1. 著者名 Kondo Keisuke, Oshima Hiroki	4. 巻 61
2. 論文標題 Ultracompact autocorrelator with pulse-width-range switch function integrated on a silicon photonic chip	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SK1016 ~ SK1016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac7196	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 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 大嶋広樹、近藤圭祐
2. 発表標題 二光子吸収フォトダイオードアレイ付き導波路型光相関計のパルス幅測定レンジ切り替え機能の実証
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 Keisuke Kondo and Hiroki Oshima
2. 発表標題 Ultracompact autocorrelator with pulse-width-range-switch function integrated on silicon photonic chip
3. 学会等名 26th Microoptics Conference (MOC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 近藤 圭祐, 大嶋 広樹, 杉原 興浩
2. 発表標題 シリコンフォトニクス光相関器を用いたパルス振幅・位相再生デバイス
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大嶋 広樹, 近藤 圭祐, 杉原 興浩
2. 発表標題 シリコンフォトニクス光相関器を用いたパルス振幅・位相再生の動作実証
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤圭祐
2. 発表標題 シリコンフォトニクスと集積光デバイスの研究
3. 学会等名 第4回 UU CORE セミナー
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤圭祐, 大嶋広樹, 杉原興浩
2. 発表標題 シリコンフォトニクス光相関器を用いた光パルス振幅・位相測定
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 早山凌生, 大嶋広樹, 杉原興浩, 近藤圭祐
2. 発表標題 オンチップ光パルス測定器に向けた 集積型波長フィルタの検討
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 近藤圭祐, 大嶋広樹, 杉原興浩
2. 発表標題 シリコンフォトニクス光相関器を用いた光パルス波形再生
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大嶋広樹, 近藤圭祐, 杉原興浩
2. 発表標題 シリコンフォトニクス光相関器を用いた完全集積型パルス波形測定器
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 Keisuke Kondo, Hiroki Oshima, Okihito Sugihara
2. 発表標題 Amplitude and phase retrieval of optical pulses using a silicon photonics optical correlator
3. 学会等名 Conference on Laser and Electro-Optics 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 光パルス計測器、光パルス計測方法及び光パルス計測プログラム	発明者 近藤圭祐	権利者 国立大学法人宇 都宮大学
産業財産権の種類、番号 特許、2022-007380	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------