

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14790

研究課題名(和文) フィルタフリーハイパースペクトルイメージセンサの開発と応用

研究課題名(英文) Development of filter-free hyperspectral image sensor and its application

研究代表者

崔容俊(Choi, Yong-Joon)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80868828

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：CMOS技術により単画素で光学部品などを必要としないフィルタフリー波長検出センサを実現し、波長と光量の情報を画像化できるフィルタフリー波長イメージセンサを製作した。製作したセンサは可視光領域から近紫外線まで(：450-800 nm)の波長を光学フィルターを使用せず、0.1 nm以上の分解能で波長を識別し、それらの光強度の検出も同時検出された。さらにこのセンサを用いて、複数の蛍光試薬の定量、LSPRセンサとの融合によるCOVID-19の検出に成功した。信号処理回路の一体化により、植物のクロロフィルの計測とレジオネラ菌の識別に成功し、更なる発展が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

細胞などの検出には高い空間分解能が要求されており、高解像度のバイオイメージングに向け、より小さな画素を製作する研究が進められ、現在では数 μm 程度で技術的な限界に達した。また、特定波長を分析する分光装置は波長を分離する光学部品などにより、高価・大規模な装置になる問題が一つポイントのみの計測になる。開発したセンサは、特定波長を検出するため一般的に使用されている光学部品などを使用せず、単画素で光波長を検出することが可能であるため、バイオ分野で波長を検出する小型化システムが実現でき、その場診断などPOCTに応用が可能である。また、センサのアレイ化により、2次元の波長情報の画像化が可能になる。

研究成果の概要(英文)：We realized a filter-free wavelength detection sensor that does not require optical components by using the CMOS technology of the Toyohashi University of Technology. In addition, we fabricated a filter-free wavelength image sensor that can image information on wavelength and light intensity. The fabricated sensor discriminates wavelengths from the visible light region to the near ultraviolet (：450-800 nm) with a resolution of 0.1 nm or more without an optical filter and simultaneously detects their light intensity. Furthermore, we used this sensor to quantify multiple fluorescent reagents and detect COVID-19 by integrating it with the LSPR sensor. We measured plant chlorophyll and identified Legionella bacteria by integrating the signal processing circuit.

研究分野：電気・電子工学，電子デバイス・電子機器

キーワード：フィルタフリー 波長検出 CMOSセンサ クロロフィル計測 ウィルス検出 蛍光定量 レジオネラ菌 識別 バイオセンサ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

体内・脳内の細胞活動を解明するためにさまざまな研究が行われている。細胞活動の観測にはpH、活動電位、質量分析、蛍光などの手法が用いられる。特に、光学計測法である蛍光検出は得られる情報量が多く取り扱いが容易であるため、最も有用な方法の1つとして注目されている。現在、蛍光顕微鏡で使用される干渉フィルタや吸収フィルタなどが搭載されたオンチップイメージセンサが報告されている。光学フィルタを搭載した波長検出センサは、蛍光検出能力に優れる反面、複数種類の蛍光の同時検出や蛍光試薬の変更への対応ができないなどの問題があった。提案者は、励起光と蛍光の波長が変更された場合でも同一デバイスで、光強度を検出可能なフォトゲート構造のフィルタフリー蛍光センサに関する研究を行ってきた。シリコンの光吸収深さの波長依存性を基に、センシングエリアの直下に位置するpn接合とフォトゲートの電圧によって形成される電位の鞍の深さを調整して、表面側からあるポテンシャルピークまで吸収された光電流を検出し、それぞれの光強度を算出してきた。

しかし、これまでのフィルタフリー蛍光センサは励起光と蛍光の強度を求めるため、複数の光の中心波長の情報は既知である必要があり、未知の波長に対して光の強度を検出することは不可能であった。本研究では光学部品などを使用せずに波長情報を検出可能なフィルタフリー波長検出センサの構造を提案し、半導体CMOS技術によりデバイスを製作し、それらを用いて医療・バイオ・農業分野への応用を目指して研究を行った。

2. 研究の目的

光学部品などを必要としない波長検出センサを実現するため、CMOS技術によりフィルタフリー波長センサを製作し、細胞、ウイルス、レジオネラ菌などを検出可能なシステムの実現を目指して研究を行った。①デバイスシミュレーションを用いて、基板に形成される電位の鞍と電荷の移動などを分析し、CMOSプロセスの条件を確立する。②特定波長に対して、センサから出力される光電流 I_{out} と I_{sub} の関係を分析し、フォトゲート構造センサの分光方法を定型化する。③製作したデバイスと従来の分光装置と比較して、波長分離能力を評価する。④フィルタフリー波長センサシステムを構築し、バイオ分野への応用に展開する。

3. 研究の方法

本研究を修行するため、提案した新規デバイスのシミュレーション、設計・製作、評価、小型化システム製作、応用研究の順に研究を進めた。①提案した二重拡散well構造はp型シリコン基板に形成されるp-wellとDeep n-wellの深さなどのCMOSプロセス条件を確立するため、デバイスシミュレーターであるTCADを用いて不純物濃度などを最適化し、イオン質量分析装置(SIMS)分析により、製作したデバイス内の不純物濃度の評価を行った。また、3次元デバイスシミュレーターであるSPECTRAを用いて、デバイスの電流特性の評価とシリコン内部の電位分包解析を行った。②提案したフィルタフリー波長検出センサとフィルタフリー波長イメージセンサは豊橋技術科学大学のLSI施設で1-poly, 2-MetalのCMOSプロセスにて製作を行った。③製作したデバイスは波長可変光源、プログラマブル光源、LED光源などを利用し、光波長に対する出力電流の評価を行った。④その場診断などで適用可能な小型波長検出システムの実現に向けて、無線でデバイスの制御と微小な光信号を取得可能なPCB回路の設計と製作を行った。⑤製作したデバイスを用いて、蛍光試薬の定量、植物のクロロフィルの計測、表面プラズモニクによるウイルスの検出、レジオネラ菌の識別、細胞定量が可能な小型マイクロフローサイトメトリーシステムなどの応用研究を行った。

4. 研究成果

(1) デバイスのシミュレーション

二重拡散well構造のフィルタフリー波長検出センサを製作するため、プロセスシミュレーターであるTCADを使用してプロセス条件を確立した。センサの作製に当たり、不純物濃度の条件をp-well > deep n-well > p-subとする必要があり、使用したp-subの不純物濃度は $2.24 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ であったため、deep n-wellは 10^{15} cm^{-3} 、p-wellは 10^{16} cm^{-3} を目指して設計を行った。イオン注入後のセンサの不純物濃度を確認するために二次イオン質量分析装置(SIMS)より分析を行い、SIMSで分析されたリンとボロンの値はTCADで想定した各wellの深さと一致しており、二重拡散well構造が作製された。3次元デバイスシミュレーターであるSPECTRAを用いて波長による電流特性の解析を行った。照射される光に対して電流の評価を行うため、 $100 \times 100 \mu\text{m}$ の面積を持つ光強度 1 mW/cm^2 、波長 $450 \sim 750 \text{ nm}$ の光を用いた。波長の増加に伴いシリコン基板に侵入する光の侵入長が深くなるため、 I_{PG} の減少と I_{n-well} が増加し、波長 $450 \sim 750 \text{ nm}$ では電流比は $0.1 \sim 3.9$ まで変化することを確認した。結果より提案の手法で可視光領域波長の識別が可能であることが検証された。

(2) デバイスの設計・製作 フィルタフリー波長検出センサの1画素から得られる表面側電流(I_{PG})および基板側電流(I_{n-well})に対して同じ構成の読み出し回路を配置し、アレイ外まで両電流を直接引き出してから電圧信号に変換する方式を採用した。センサ内部で発生した電子はポテンシャルピークを境に2方向

へ分かれて移動する。表面側の電流はフォトゲート(PG)に隣接して形成されるn⁺拡散層による電流出力端子に向かう。一方、基板側に移動した電子は、n-wellの電流として同じくn⁺拡散層による電流出力端子から読み出される。これら出力端子には指

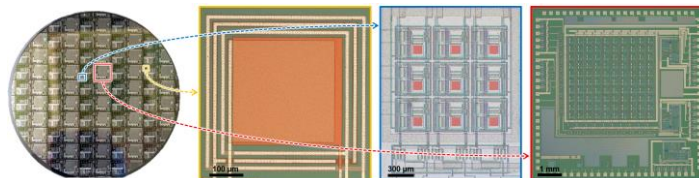


図1 (左から)CMOSプロセスより製作した4-inch wafer, 1画素センサ, 3×3画素のセンサ, 10×10画素のセンサ

定した行全体をセレクトするための行ごとにゲートが共通のトランジスタが配置されている。I-V変換に用いられるオペアンプの各端子は外部からアクセスできるようになっており、フィードバック抵抗を接続してそこに流れるセンサからの光電流による電圧降下の値を検出することが可能になる。提案したフィルタフリー波長検出センサを豊橋技術科学大学のLSI工場にてCMOS準拠の5.0 μmルールのカスタムプロセスで製作した。作成した4-inch waferの写真と1画素, 3×3, 10×10のアレイセンサの顕微鏡画像を図1に示し、二重拡散well構造を有するフィルタフリー波長検出センサのCMOSプロセス条件を確立した。

(3) デバイスの評価

単一波長に対する作製したデバイスの特性評価を行った。レーザー駆動型の波長可変光源を利用し、波長は460~800 nm, 半値幅(FWHM)は5~10 nmを有する光をセンサに照射し、出力される電流を計測した。図2(a)にセンサの波長依存性と光強度依存性の検出結果を示す。波長の変化に応じて電流比(I_{n-well}/I_{PG})が指数関数的に0.09~8.35まで変化し、シミュレーションによる電流比と比較し10%の誤差内に収まる結果が得られた。センサの電流比は、シリコンに対する波長の吸収係数から算出され、光の吸収深さ(1/e)に依存していることが確認された。センサの光強度依存性を評価するため、光強度をNDフィルタを用いて1/10,100に減衰させ、460 ~ 800 nmの波長を照射して電流比を計測した。結果より、光強度の変化における比率の変化は極小であることが確認された。これは、光強度が変化しても波長による光の侵入深さ(光強度が1/eになる深さ)は一定で変化しないためだと考えられる。この結果から、提案するセンサは光強度に依存せず、波長の識別が可能であることが示唆された。

プログラブル光源を用いて、波長の半値幅による電流比の評価を行った。3種類の中心波長450, 500, 550 nmを有する光源を15 mW/cm²の光強度で照射して電流比の測定を行った。ここで、光源の半値幅を10~30 nmまで5 nm毎に5点測定した結果を図2(b)に示す。結果より、波長500 nm(半値幅10 nm)の時の電流比を基準とすると、半値幅が30 nmに増加したときに、電流比の変化は-0.0046で誤差率は1.48%となった。先行研究のSingle-well構造では約5.11%の誤差率であったため、約3.6%の低減が得られた。この時に、比率の波長感度は0.008/nmであったため、感度が1 nm以上の波長識別において半値幅の変化に依存しないことが確認された。この結果は、ピーク波長を中心に半値幅が広がっても電流比は変化しないため、単一スペクトルを有する光の波長を識別可能であると考えられる。

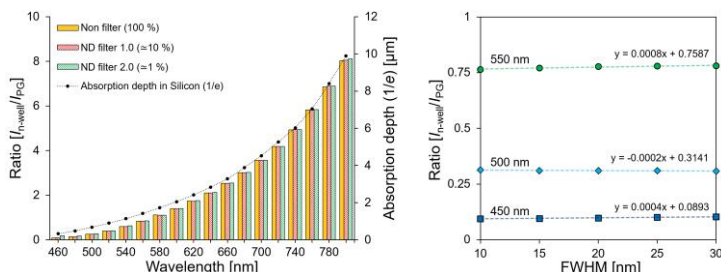


図2 単一スペクトルを有する波長によるセンサの電流特性: (a)波長と光強度依存性, (b)半値幅依存性

(4) 小型システムの製作

提案のシステムには、LEDとフィルタフリー波長センサからなるターゲットサンプルの検出部と、オペアンプを含むI/V変換回路(LMP7721, Texas Instrument), A/Dコンバータ(ADS1115, Texas Instrument), マイコン(ESP32-DevKitC, Espressif Systems)からなる小型信号処理システムで構成され、Bluetooth通信によりデバイスの制御やデータ受信が可能である。製作した小型信号処理システムの寸法は縦13.5 cm, 横3.5 cmであり、分解能は1.25 pAであるため、センサの数10pAの暗電流より小さな電流の測定が可能である。製作した信号処理システムによる光強度の計測結果を示し、数nWの光強度に対してpAの電流計測が可能であることが検証された。

(5) フィルタフリー波長検出センサによる応用実験への展開

① 蛍光試薬の定量分析

蛍光検出法はバイオサイエンス分野において得られる情報量が多く取り扱いが容易であるため、細胞構造の解析や疾患の早期診断において広く用いられている。近年、蛍光検出法を応用したPOCT(Point of Care Testing)システムが注目され、被験者の傍らで迅速かつ適切な診療・看護への期待が高まっている。これに伴い、システムの小型化、低コスト化、高感度化などに関する研究が盛んになっている。そこで、CMOSイメージセンサ上に吸収フィルタや干渉フィルタを組み込んだオンチップ型蛍光検出システムが報告されている。しかし、多様な蛍光波長の変化に対応できないため、デバイスの変更が必要となる。光学フィルタを使用する一般的な蛍光センサは、フィルタを透過した蛍光成分のみの強度を検出して、

蛍光定量を行っている。提案するセンサは励起光と蛍光を同時に照射された場合、波長の変化に応じた電流の比率を検出することで蛍光の定量が可能であると考え応用研究を行った。蛍光試薬に3種の励起光を照射し、比率の試薬濃度依存性と分光特性の評価を行った。試薬に励起光を照射することで蛍光が生じることを、センサの比率と分光特性から確認した。また、試薬の濃度に依存してAF488では0.31~0.36、AF594では1.39~1.42、AF680では3.22~3.45の比率変化が見られた。電流比率から試薬の濃度と蛍光の検出が可能であることを意味し、多様な蛍光検出への応用が可能であることを示した。今後、光学部品を使用しない蛍光検出センサとして、バイオ分野への応用が期待される。

② 小型LSPRウイルス検出システムの開発

生体内における微量な被検物質を高感度で検出するために多様な手法を用いたバイオセンサが開発され、局在表面プラズモン共鳴(LSPR)を応用したバイオセンサは、分子吸着による透過波長の変化を計測することでナノ金属構造の表面における分子吸着をリアルタイムで検出が可能である。しかし、透過波長の計測には光学部品が集積された分光装置を用いるため、小型化かつ多項目の同時検出は困難である。本研究では、LSPRバイオセンサによる透過スペクトルを計測可能な小型ウイルス検出システムを提案した(図3)。また、ウイルスの検出に最適化された金ナノ構造を設計・製作し、提案するシステムを用いたS-protein(SARS-CoV-2)の定量結果を報告した。集束イオンビーム(FIB)加工により作製した120×120×40 nmサイズの金ナノ構造は分子の吸着が予想される領域に強い電界が発生する結果が得られた。作製した金ナノ構造のFDTD解析による透過スペクトルシミュレーション結果と実測値は波長5 nm以内の誤差が得られた。分子吸着の妥当性を検証するため、SAM, NHS/WSC, IgG抗体, S-protein RBDの順に分子修飾し、原子間力顕微鏡(AFM)を用いて各分子修飾プロトコルによる表面の変化を観察し、各分子の修飾による高さと位相の変化量からプロトコルの妥当性が実証された。図4にIgG抗体, S-protein RBD (1 ng/ml)修飾後のLSPRバイオセンサの光透過波長特性、フィルターフリーセンサの電流特性を示す。分子吸着により透過波長は短波長側に変化とともに電流比率も変化した。この結果から、提案システムを用いてS-protein RBDの吸着を検出可能であることが確認できた。S-protein RBD濃度における分子修飾前後の電流比率の差を示して、濃度変化に伴い異なる電流比率が得られた。提案するシステムを用いてS-protein RBDの定量測定が可能であることを確認できた。以上の結果より、迅速かつ小型化されたウイルス検出システムの実現が期待される。

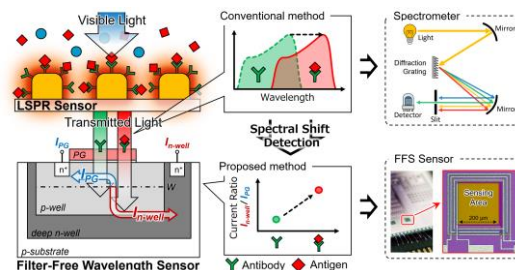


図3 提案する小型LSPRウイルス検出システム

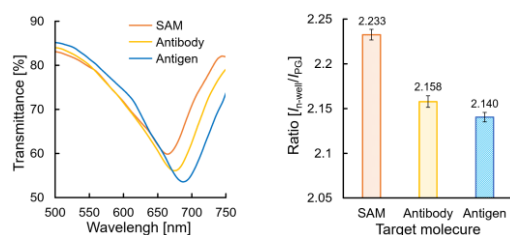


図4 分子修飾による透過波長とセンサの電流比率

③ 植物のクロロフィル計測

人口増加の激化に伴い食用作物の需要が増加しており、農業現場では施設内で植物の栽培を行う植物工場の導入が盛んになっている。植物の生体情報を計測する手法の一つに植物体内のクロロフィル(Chl)を計測する手法がある。陸上植物のクロロフィルには主にクロロフィルa (Chl a)とクロロフィルb (Chl b)の2種類が存在する。Chl aおよびChl bは異なる波長の光を吸収するため、その比率(Chl a/b)を調整することで多様な光環境に適応し、光エネルギーを効率的に利用することが出来る。Chl a/bから生育を阻害する原因の一つである光環境応答の影響を特定できるため、植物の生育状態に応じた栽培環境の制御に役立てることができる。本研究では、Chl aとChl bが異なる波長を吸収することに着目し、農業現場での応用に向けた小型クロロフィル測定システムを提案・製作した。図5(a)に分光器を用いて透過光スペクトルを測定した結果を示す。葉中のChl aおよびChl bがそれぞれ特定波長を吸収することにより、Chl aおよびChl b濃度の違いによる透過光スペクトルの変化を確認できた。また、各波長の重心波長を算出した結果、重心波長が0.6 nm程度長波長側にシフトしていることを確認した。このように、重心波長が長波長側にシフトすることは、Chl bの割合が多くChl a/b比が低下していることが考えられるため、フィルターフリー波長センサを用いて重心波長のシフト量を測定することで、Chl a/b比を推定することが可能である。図5(b)にセンサを用いて透過光を測定した結果を示す。各波長の重心波長が長波長側にシフトすることで、

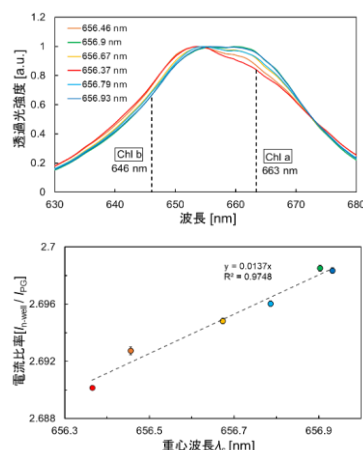


図5 トマト葉の(a)分光特性(b)センサの電流比率

センサ電流比率($I_{n\text{-well}} / I_{PG}$)が線形的に増加していることを確認した。また重心波長が1 nmシフトすることで、センサ電流比率は0.0137変化しており、決定係数は0.975が確認された。これより、実際の葉のChl a/b計測に本システム的应用が可能であることが示唆された。これらの結果から、フィルタフリー波長センサを用いることで、小型装置で植物のChl a/b計測に適用可能であると考えられる。

④ レジオネラ菌の識別システム

レジオネラ菌は温泉やビルの空調室外機等の循環水を利用する設備に多く生息し、飛沫やエアロゾルなどを介してレジオネラ肺炎等の重篤な細菌感染症を引き起こすとされており、現場での即時検査やモニタリングが求められている。菌種の識別を行うためには、細菌による蛍光波長や蛍光強度の励起光照射時間依存性等のパラメータを予め知る必要がある。我々は、青色蛍光を発する *Legionella dumoffii*, 赤色蛍光を発する *Legionella erythra* の蛍光強度の時間依存性をこのセンサで観測することに成功している。また、これまで長波長の赤色蛍光を放出する *Legionella erythra* の特徴的な蛍光の観測には光学フィルタを要していたが、センサの表面側電流と基板側電流を同時に取得することにより菌種の識別可能性を示した。本研究では従来用いていた測定系である蛍光顕微鏡や分光器など大型かつ高価な装置に代わる、小型かつ安価な測定系を制作し可搬性に優れたシステムについて検討した。図6は *Legionella dumoffii* と *Legionella erythra* の計測した結果を示し、各レジオネラ種により放出する自家蛍光の波長が異なるため、フィルタフリー波長検出センサより識別が可能である。この結果から、菌種により蛍光強度の時間的変化や蛍光波長が異なるレジオネラ属菌の識別に提案するシステムで適用可能であると考えられる。

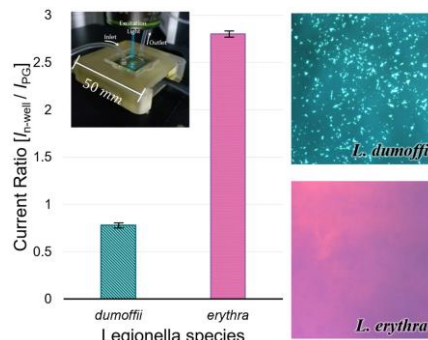


図6 レジオネラ菌の検出結果

⑤ 細胞定量に向けた小型マイクロフローサイトメトリー

細胞の相対的な情報からソーティングすることで病気や疾患の早期診断、細胞構造の解析につながるためさまざまな研究が行われている。特に、蛍光検出法は生化学や医療分野において、高感度で容易に測定が可能で得られる情報量が多く、広く用いられている。これを応用したフローサイトメトリーという細胞測定方法は測定対象を1列に流し、1細胞単位で高速にカウントしながら蛍光観察することで、個々の細胞の異なる性質から識別することができる。しかし、蛍光を選択的に検出するため、蛍光顕微鏡と同様に光学部品が多く含まれており、大規模かつ複雑な構造で高価な装置となっており、その取り扱いや導入が容易でないといった問題がある。本研究では、PG電圧を可変させることなく高速に波長を識別するために、センサ中に発生するPG側およびn-well側に移動する電子による

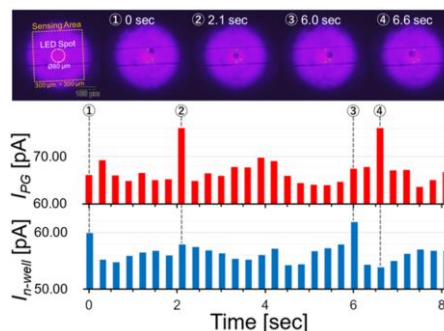


図7 蛍光ビーズによる電流の変化

光電流に着目した新しい波長の識別手法を提案した。従来は複数回の計測が必要であったフィルタフリー蛍光センサにおいて、新たにIn-wellを用いた電流比から1回の計測で波長を特定する手法を提案した。PDMS製のマイクロ流路とフィルタフリー蛍光センサを一体化させ、オンチップマイクロフロー計測システムの実験を行った。図7は直径31 μm の緑(508 nm)と赤(612 nm)色の蛍光ビーズを流路に導入し、各ビーズから放出される蛍光の計測結果を示す。顕微鏡映像とセンサからの電流ピークを比較しながら各ビーズがセンサ上を通過する際に、それぞれ明らかに異なる電流比の平均値が得られ、提案した I_{PG} および $I_{n\text{-well}}$ の電流比を用いて全く光学部品を用いることなく蛍光ビーズを識別することに成功した。この結果より、細胞を扱う大規模な蛍光顕微鏡やフローサイトメトリーが導入されている生化学および医療分野への応用が期待される。

5. 研究成果

- ・論文：8件
- ・プロシーディング：1件
- ・国際学会発表：6件
- ・国内学会発表：18件
- ・産業財産権：1件
- ・著書：1件
- ・受賞：7件
- ・ホームページ：<https://int.ee.tut.ac.jp/bio/>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 7件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Honda Yuto, Ichikawa Ryosuke, Choi Yong Joon, Murakami Kensuke, Takahashi Kazuhiro, Noda Toshihiko, Sawada Kazuaki, Ishii Hiromu, Machida Katsuyuki, Ito Hiroyuki, Miyahara Satoshi, Nikaido Yasuhiko, Saito Mitsumasa	4. 巻 61
2. 論文標題 Detection system for Legionella bacteria using photogate-type optical sensor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SD1010 ~ SD1010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac5a25	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 Ide Tomoya, Choi Yong-Joon, Kimura Yasuyuki, Hizawa Takeshi, Takahashi Kazuhiro, Ishii Hiromu, Noda Toshihiko, Sawada Kazuaki	4. 巻 350
2. 論文標題 Development of an on-chip microfluidic system with filter-free multiple-wavelength sensor for microflow cytometry	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators B: Chemical	6. 最初と最後の頁 130896 ~ 130896
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.snb.2021.130896	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 Noda Toshihiko, Teshima Takuya, Choi Yong-Joon, Hizawa Takeshi, Takahashi Kazuhiro, Ishii Hiromu, Sawada Kazuaki	4. 巻 141
2. 論文標題 Performance Improvement of Filter-Free Fluorescence Sensor in Near-Ultraviolet Region Aiming for Biosensing Application	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines	6. 最初と最後の頁 77 ~ 82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejsmas.141.77	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 Tanaka Sawako, Choi Yong Joon, Ishida Makoto, Sawada Kazuaki, Ishii Hiromu, Machida Katsuyuki, Nikaido Yasuhiko, Saito Mitsumasa, Yoshida Shin ichi	4. 巻 103
2. 論文標題 Sensing Legionella by photogate type fluorescence sensor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Electronics and Communications in Japan	6. 最初と最後の頁 83 ~ 89
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ecj.12269	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 Choi Yong-Joon, Watanabe Nobuhiro, Takahashi Kazuhiro, Toda Seitaro, Takayama Kotaro, Noda Toshihiko, Sawada Kazuaki	4. 巻 61
2. 論文標題 Proposal of leaf chlorophyll content and its a/b ratio measurement method using a filter-free multiple wavelength sensor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SD1041 ~ SD1041
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac6387	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 該当する

1. 著者名 Choi Yong-Joon, Nakano Kakeru, Ide Tomoya, Sakae Tsugumi, Ichikawa Ryosuke, Hizawa Takeshi, Akai Daisuke, Takahashi Kazuhiro, Noda Toshihiko, Sawada Kazuaki	4. 巻 12
2. 論文標題 Demonstrating a Filter-Free Wavelength Sensor with Double-Well Structure and Its Application	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Biosensors	6. 最初と最後の頁 1033 ~ 1033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/bios12111033	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 該当する

1. 著者名 Choi Yong-Joon, Tsugumi Sakae, Tomoya Ide, Takahashi Kazuhiro, Noda Toshihiko, Sawada Kazuaki	4. 巻 16
2. 論文標題 Proposal of compact LSPR sensor system by filter-free wavelength sensor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 012012 ~ 012012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/acae69	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 該当する

1. 著者名 Tomoya Ide, Yong-Joon Choi, Ryoya Matsubara, Yasuyuki Kimura, Kensuke Murakami, Takeshi Hizawa, Daisuke Akai, Yoshiko Noda, Kazuhiro Takahashi, Hiromu Ishii, Toshihiko Noda, Kazuaki Sawada	4. 巻 359
2. 論文標題 Realization of a filter-free wavelength image sensor and imaging system for visualization of wavelength information	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 114499 ~ 114499
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sna.2023.114499	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

〔学会発表〕 計26件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 坂江 亜弥, 崔 容俊, 井出 智也, 高橋 一浩, 石井 仁, 野田 俊彦, 澤田 和明
2. 発表標題 フィルタフリーセンサによる局在表面プラズモン共鳴を用いた小型ウイルス検出システムの提案
3. 学会等名 第69回 応用物理学会春季学術講演会 2022年3月24日 応用物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 仲野 翔, 崔 容俊, 井出 智也, 石井 仁, 高橋 一浩, 野田 俊彦, 澤田 和明
2. 発表標題 入射光の半値幅によらないフィルタフリー波長識別センサの作製
3. 学会等名 第69回 応用物理学会春季学術講演会 2022年3月23日 応用物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 市川 亮介, 崔 容俊, 渡邊 信太, 戸田 清太郎, 高橋 一浩, 高山 弘太郎, 石井 仁, 野田 俊彦, 澤田 和明
2. 発表標題 フィルタフリーセンサを用いたクロロフィルa/b計測システムの提案
3. 学会等名 第69回 応用物理学会春季学術講演会 2022年3月23日 応用物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本田優斗, 崔 容俊, 村上 健介, 高橋 一浩, 野田 俊彦, 澤田 和明, 石井 仁, 町田 克之, 伊藤 浩之, 宮原 敏
2. 発表標題 フォトゲート型蛍光センサによるレジオネラ属菌検知システムの検討
3. 学会等名 第38回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム 2021年11月10日 電気学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊 信太, 崔 容俊, 高橋 一浩, 戸田 清太郎, 高山 弘太郎, 野田 俊彦, 澤田 和明
2. 発表標題 フィルタフリー多波長検出センサを用いたクロロフィルa/b比計測法の提案
3. 学会等名 第38回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム 2021年11月10日 電気学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuto Honda, Yong-Joon Choi, Kensuke Murakami, Kazuhiro Takahashi, Toshihiko Noda, Kazuaki Sawada, Hiromu Ishii, Katsuyuki Machida, Hiroyuki Ito, Satoshi Miyahara, Yasuhiko Nikaido, Mitsumasa Saito
2. 発表標題 Detection system of bacteria, Legionella by photogate type optical sensor
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2021) 2021年10月28日 Japan Society of Applied Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuhiro Watanabe, Yong-Joon Choi, Kazuhiro Takahashi, Seitaro Toda, Kotaro Takayama, Toshihiko Noda, Kazuaki Sawada
2. 発表標題 Proposal of chlorophyll concentration and a/b ratio measurement method using a filter-free multiplewavelength detection sensor
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference(MNC2021) 2021年10月27日 Japan Society of Applied Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoya Ide, Yong-Joon Choi, Yasuyuki Kimura, Takeshi Hizawa, Kazuhiro Takahashi, Hiromu Ishii, Toshihiko Noda, Kazuaki Sawada
2. 発表標題 Realization of On-Chip Microfluidic System with Filter-Free Fluorescence Sensor for Lens-Less Flowcytometry
3. 学会等名 2021 21st International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers) 2021年6月20日 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井出 智也, 崔 容俊, 手島 拓哉, 高橋 一浩, 野田 俊彦, 石井 仁, 澤田 和明
2. 発表標題 オンチップフローサイトメトリー実現に向けたフィルタフリー蛍光センサの提案と実証
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井出 智也, 崔 容俊, 手島 拓哉, 木村 安行, 高橋 一浩, 石井 仁, 野田 俊彦, 澤田 和明
2. 発表標題 オンチップフローサイトメトリー実現に向けたフィルタフリー蛍光センサの提案と実証
3. 学会等名 第37回センサ・マイクロマシンと応用システム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井出 智也, 崔 容俊, 木村 安行, 高橋 一浩, 石井 仁, 野田 俊彦, 澤田 和明
2. 発表標題 バイオイメージングに向けたフィルタフリー蛍光イメージセンサの検討
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 本田 優斗, 田中 佐和子, 崔 容俊, 野田 俊彦, 高橋 一浩, 澤田 和明, 石井 仁, 町田 克之, 伊藤 浩之, 二階堂 靖彦, 齋藤 光正, 吉田 真一
2. 発表標題 フォトゲート型蛍光センサによるレジオネラ属菌の識別方法の検討
3. 学会等名 令和2年度電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会 バイオ・マイクロシステム研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本田 優斗, 田中 佐和子, 崔 容俊, 野田 俊彦, 高橋 一浩, 澤田 和明, 石井 仁, 町田 克之, 伊藤 浩之, 二階堂 靖彦, 齋藤 光正, 吉田 眞一
2. 発表標題 レジオネラ属菌の識別に向けたフォトゲート型蛍光センサによる計測手法の検討
3. 学会等名 応用物理学会集積化MEMS技術研究会 第12回「集積化MEMSシンポジウム」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本田 優斗, 崔 容俊, 村上 健介, 野田 俊彦, 高橋 一浩, 澤田 和明, 石井 仁, 町田 克之, 伊藤 浩之, 二階堂 靖彦, 齋藤 光正
2. 発表標題 レジオネラ属菌識別に向けたフォトゲート型蛍光センサによる計測システムの検討
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 渡邊 信太, 崔 容俊, 高橋 一浩, 戸田 清太郎, 高山 弘太郎, 野田 俊彦, 澤田 和明
2. 発表標題 フィルタフリー多波長検出センサを用いたクロロフィル測定の基礎検討
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 崔 容俊, 高橋 一浩, 野田 俊彦, 石井 仁, 澤田 和明
2. 発表標題 フィルタフリー蛍光センサの新しい波長検出法の提案と実証
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tsugumi Sakae, Yong-Joon Choi, Tomoya Ide, Kazuhiro Takahashi, Toshiaki Noda, Kazuaki Sawada
2. 発表標題 Proposal of a Virus Detection System using Localized Surface Plasmon Resonance with Filter-Free Wavelength Sensor
3. 学会等名 Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology 2022 (APCOT 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ruosuke Ichikawa, Yong-Joon Choi, Nobuhiro Watanabe, Seitaro Toda, Kazuhiro Takahashi, Kotaro Takayama, Toshiaki Noda, Kazuaki Sawada
2. 発表標題 Proposal of Chlorophyll a/b Measurement System using Filter-Free Wavelength Sensor
3. 学会等名 Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology 2022 (APCOT 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kakeru Nakano, Yong-Joon Choi, Tomoya Ide, Kazuhiro Takahashi, Toshiaki Noda, Kazuaki Sawada
2. 発表標題 Proposal of Filter-Free Wavelength Identification Sensor with Triple-well Structure
3. 学会等名 Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology 2022 (APCOT 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井出 智也, 崔 容俊, 仲野 翔, 坂江 亜弥, 松原 稜弥, 木村 安行, 飛沢 健, 高橋 一浩, 石井 仁, 野田 俊彦, 澤田 和明
2. 発表標題 波長情報を可視化するフィルタフリー波長センサのアレイ化に向けた製作と実証
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 坂江 亜弥, 崔 容俊, 井出 智也, 高橋 一浩, 野田 俊彦, 澤田 和明
2. 発表標題 フィルタフリー波長センサによる小型LSPRウイルス検出システムの提案と実証
3. 学会等名 第39回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 仲野 翔, 崔 容俊, 井出 智也, 高橋 一浩, 野田 俊彦, 澤田 和明
2. 発表標題 二重拡散well構造を有するフィルタフリー波長検出センサの検証と応用
3. 学会等名 第39回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 市川亮介, 崔 容俊, 戸田 清太郎, 高橋 一浩, 高山 弘太郎, 野田 俊彦, 澤田 和明
2. 発表標題 フィルタフリー波長センサによる クロロフィル a/b 計測システムの提案と検証
3. 学会等名 第39回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 波長情報を可視化するCMOS イメージセンサの開発と実証
2. 発表標題 井出 智也, 崔 容俊, 仲野 翔, 坂江 亜弥, 松原 稜弥, 木村 安行, 飛沢 健, 高橋一浩, 石井 仁, 野田 俊彦, 澤田 和明
3. 学会等名 第39回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松原 稜弥, 崔 容俊, 井出 智也, 木村 安行, 飛沢 健, 高橋 一浩, 野田 俊彦, 澤田 和明
2. 発表標題 アレイ化に向けたフィルタフリー波長センサの画素構造の検討と製作
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 Mibu Ryoma, Ichikawa Ryosuke, Ide Tomoya, Choi Yong-Joon, Toda Seitaro, Takahashi Kazuhiro, Takayama Kotaro, Noda Toshihiko, Sawada Kazuaki
2. 発表標題 Development of compact chlorophyll measurement system by filter-free wavelength sensor for agriculture
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

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Yong-Joon Choi , Kazuaki Sawada	4. 発行年 2023年
2. 出版社 Elsevier BV	5. 総ページ数 19
3. 書名 Physical Sensors: Fluorescence Sensors	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 半導体光センサを用いた光波長の特定方法	発明者 崔 容俊 , 澤田 和明	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-077131	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

[受賞](計7件)

- (2023年4月)電気学会優秀論文発表賞, 一般社団法人電気学会, 坂江 亜弥, 崔 容俊, 井出 智也, 高橋 一浩, 野田 俊彦, 澤田 和明
- (2023年4月)電気学会優秀論文発表賞, 一般社団法人電気学会, 仲野 翔, 崔 容俊, 井出 智也, 高橋 一浩, 野田 俊彦, 澤田 和明
- (2022年11月)第39回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム 五十嵐賞, 一般社団法人電気学会 センサ・マイクロマシン部門, 仲野 翔, 崔容俊, 井出 智也, 高橋 一浩, 野田 俊彦, 澤田 和明
- (2022年11月)第39回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム 奨励賞, 一般社団法人電気学会 センサ・マイクロマシン部門, 坂江亜弥, 崔容俊, 井出智也, 高橋一浩, 野田俊彦, 澤田和明
- (2022年10月) The IEEJ-E APCOT Excellent Paper Award, IEEJ, 坂江亜弥, 崔 容俊, 井出 智也, 高橋 一浩, 野田 俊彦, 澤田 和明
- (2022年10月) The IEEJ-E APCOT Best Paper Award Finalists, IEEJ, 仲野 翔, 崔 容俊, 井出 智也, 高橋 一浩, 野田 俊彦, 澤田 和明
- (2020年10月)第38回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム 奨励賞, 一般社団法人電気学会, 井出 智也, 崔 容俊, 手島 拓哉, 木村 安行, 高橋 一浩, 石井 仁, 野田 俊彦, 澤田 和明

[ホームページ]
<https://int.ee.tut.ac.jp/bio/>

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
研究協力者	澤田 和明 (Sawada Kazuaki)		
研究協力者	石井 仁 (Ishii Hiromu)		
研究協力者	高橋 一浩 (Takahashi Kazuhiro)		
研究協力者	野田 俊彦 (Noda Toshihiko)		

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