

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02157

研究課題名（和文）超広帯域ベクトル光の単一ショット分光偏光検出による環境・産業用高感度光センシング

研究課題名（英文）Highly sensitive optical sensing for environmental and industrial applications by single-shot spectral polarization detection by supercontinuum vector beam

研究代表者

東口 武史（Higashiguchi, Takeshi）

宇都宮大学・工学部・教授

研究者番号：80336289

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：高出力超広帯域ベクトル光を発生させる光源技術を駆使し、単一ショットで光学材料や環境ガスを分光し、同時に偏光検出する高感度の光センシングすることを目的として、研究を実施した。具体的には、可視域から赤外域に至る高出力超広帯域光の発生の物理と光源技術を明らかにした。また、超広帯域ベクトル光に効率よく変換する技術と変更技術を確立した。これを踏まえ、波長板をサンプルとして分光偏光検出を試み、所望の特性が得られることを確認した後、石英ガラスの欠陥検出を試みた。また、ガスセンシングも試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スマートフォンや透明ディスプレイなどには多くの薄肉光学フィルムや透明電極、透明接着法が用いられている。しかしながら、欠陥や内部応力が大きいとディスプレイの画像がゆがむなどの問題が起こる。そこで、高感度欠陥検出法は非常に重要であるが、赤色でしか実施しておらず、三原色（RGB）での欠陥検出法は確立できていない。本研究では、RGBから赤外域を含む超広帯域光を用い、高感度検出法を確立することにした。超広帯域ベクトル光は粒子種や分子種を同定する必要がある環境センシングにも適用することができ、新しい検出法として拡張性が高いところに特徴がある。産業的にも環境にも適用できる社会的意義のある研究である。

研究成果の概要（英文）：This research aimed to develop a susceptible optical sensing technique for the spectroscopy of optical materials and environmental gases with a single shot and simultaneous polarization detection using a light source technique that generates high-power ultra-broadband spectral light. Specifically, we clarified the physics and light source technology for generating high-power ultra-broadband light ranging from visible to infrared regions. In addition, we established the technology to efficiently convert the light into ultra-broadband vector light and the modification technology. Based on this, we attempted spectro-polarization detection using waveplates as samples, confirmed that the desired characteristics could be obtained, and then attempted defect detection in quartz glass. Gas sensing was also attempted.

研究分野：レーザー応用

キーワード：超広帯域 ベクトルビーム レーザー ファイバー 偏光 分光 欠陥検出 環境

1. 研究開始当初の背景

フレキシブル基板や透明電極を計測し、複屈折位相差計測による欠陥検出で品質管理し、省資源化することが必要である。産業での薄肉ガラス基板、透明電極などの透明材料をインライン計測し、複屈折位相差 5 mrad 以下での欠陥検出と分光情報が必要である。しかしながら、分光情報と空間位相変化を同時に捉えるハイブリッド計測には、偏光を時空間で制御し、検出するのが有効であるが、以下の問題があるため、高感度、高分解能計測は難しい。つまり、単色計測で、精度 (5 mrad) しかなく、RGB を含む三原色、すなわち超広帯域スペクトルでの複屈折位相差計測や欠陥検出法はなかった。加えて、単色・低出力では幾何学的位相を制御できつつあるが、多色 (マルチ波長光)・高出力では幾何学的位相は制御できず、ほとんどが光渦で、任意のベクトル偏光に制御できない報告が多い。さらに、マイクロ偏光子アレイでの偏光検出は円偏光成分に感度がなく、任意偏光の検出は難しい。

一方、環境の清浄化への対策を施す過程で大気汚染物質の粒径分布と粒子種の環境計測は重要である。PM 2.5 をはじめとする大気汚染物質の粒子径・粒子種の環境計測は、環境の清浄化対策における重要な指標の一つである。このほか、環境計測では CO₂ ガスを 1 ppm で検出できる感度達成が標準である。従来は、これらを独立に計測している上、前述の欠陥検出同様、超広帯域スペクトル分光偏光計測はできていない。われわれが独自に開発した超広帯域ベクトル光は、超広帯域スペクトルで分光特性を取得できる上、空間的に異なる偏光を同時にもつため、ビーム径よりも小さい空間領域における偏光変化を高感度・高分解で計測することが期待できる。

これらのことを踏まえ、前述の課題を解決するには、われわれが独自に開発した超広帯域ベクトル光と偏光検出法が有効であると考えている。ベクトル光変換法は、超広帯域で任意の偏光に自在に変換できる。具体的には、幾何学的位相を能動的に制御し、渦成分の有無を任意に作り出すことができている。これを駆使すると、高出力超広帯域光 (近赤外域、超広帯域) の幾何学的位相を制御できる。さらに、単一ショットで偏光状態を検出できる偏光検出法も適用できる。これは、光学素子の波長分散 (応答関数) をあらかじめ評価することで、線形問題を解き、単一 (シングル) ショットでビーム断面の偏光 (偏光分布、幾何学的位相) を評価する計測法である。2 種類の高出力超広帯域光源 (近赤外域、超広帯域) を開発し、幾何学的位相を制御したベクトルビームの発生に成功している。

しかしながら、複屈折位相差や粒子種・分子種計測の分光計測には、マルチ波長の高出力超広帯域ベクトル光と偏光検出法が有効であるが、これらを同時に実現することは難しい。例えば、ベクトルビームは単色で、偏光制御されていない光渦である。さらに、偏光検出法については、回転検光子法が一般的で、計測に時間がかかり、単一ショット計測できない問題がある。そこで、時間変化や偶発的な現象を独自の超広帯域ベクトル光と偏光検出技術で高感度・高分解能で単一ショット計測できるか、物理的・工学的に妥当かどうか、環境計測や産業計測のセンシング技術に有効かどうかを検討する必要がある。

われわれが研究してきた超広帯域ベクトル光と偏光解析法を駆使し、超広帯域ベクトル光をプローブ光とし、単一ショット偏光検出法を適用することで本研究を行った。環境モニターや透明ディスプレイの品質向上で得られる成果の適用範囲が広く、実社会に確実に還元できる革新的なハイブリッド分光偏光計測であり、本研究の意義があると考えている。

2. 研究の目的

本研究では、超広帯域ベクトル光変換法と単一ショット偏光検出法を駆使し、新しい分光偏光計測法を実証することで従来にないハイブリッド計測法を開拓することを目的とした。

3. 研究の方法

超短パルスレーザーを励起光源として超広帯域光を発生する。さらに、超広帯域光をアクロマティック軸対称波長板でベクトルビームに変換し、実際にサンプルの複屈折位相差と主軸方位を計測した。

超広帯域光は波長 400 nm から 1100 nm の帯域を持つことがわかった。波長 343 nm のピークは、基本波長 1030 nm の第 3 高調波である。また、波長 1030 nm のピークは SiO₂ バルクに入射した励起光である。このとき、SiO₂ バルクへ入射したパルスのパルスエネルギーは 200 μ J とした。ビーム断面内の波長分布がばらつく計測用光源には適さない。そこで、帯域幅が $\Delta\lambda = 10$ nm (FWHM) の BPF を用いてビーム断面内の波長分布を測定した。その結果を図 1 に示す。ビーム断面内に各波長 (各色) とも一様に分布した。これは、励起光の強度分布がガウス分布を維持しつつ、バルクが損傷することなく超広帯域光を発生できたことによるものと考えている。この結果から、計測用光源として適用できることがわかった。

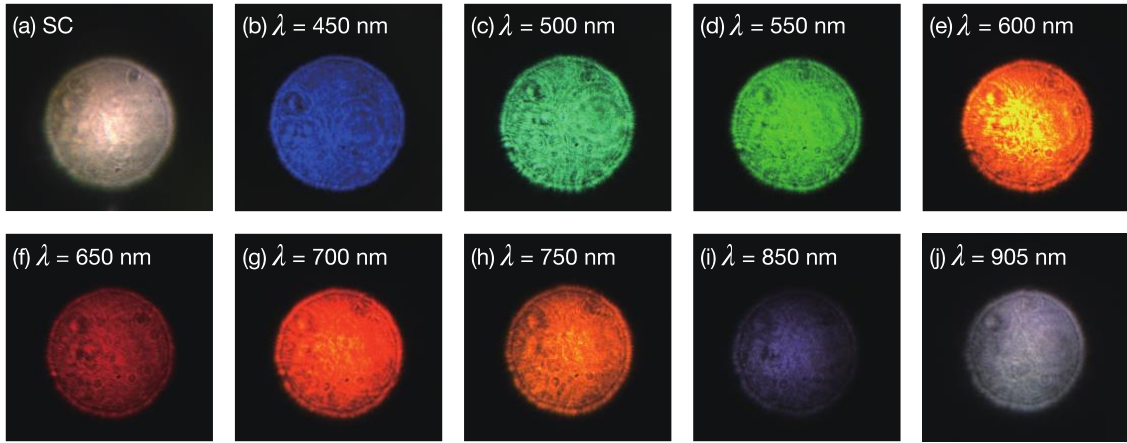


図 1：超広帯域光のビーム断面内の波長分布

4. 研究成果

本節では、本研究成果について述べる。ここでは、超広帯域ベクトル光の発生と複屈折検出について述べる。図 4 にベクトルビームへの変換と複屈折位相差計測のための実験配置を示す。アクロマティック軸対称波長板を用いて超広帯域光の幾何学的位相を制御することで、ベクトルビームに変換した。超広帯域光をベクトルビームに変換し、サンプルに入射した。サンプルの複屈折はベクトルビームの軸対称偏光変調の中に書き込まれる。サンプルの複屈折により、変調されたベクトルビームはアクロマティック 1/4 波長板 (Achromatic quarter-wave plate: AQWP) と PBS、帯域幅が $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$ (FWHM) の BPF を通過したのち、2次元検出器で光強度分布を検出した。2次元検出器には、iDS 社製のピクセルサイズが 4912×3684 の CMOS カメラ (型番: UI-3590CP) を用いた。CMOS カメラは波長 750 nm より長波長の光の感度が低い。超広帯域ベクトルビームは波長 400 nm から 1100 nm の帯域幅を持つため、全波長域をシングルショットで撮像した画像データで偏光解析すると、長波長側の S/N 比が低下する。そこで、本実験では、BPF によって超広帯域ベクトルビームから波長を選択した。これにより、シングルショットマルチスペクトル複屈折マッピングの原理検証をした。各波長で強度分布を検出し、偏光解析することでサンプルの複屈折位相差と主軸方位を評価した。サンプルは波長 532 nm の光に対して 90° の複屈折位相差が与えられるサファイア製の 1/4 波長板とした。

図 2(a) は、CMOS カメラで検出した強度分布である。左側の図から順に超広帯域ベクトルビーム、中心波長が 450 nm 、 550 nm 、 650 nm のベクトルビームの強度分布である。サンプルの複屈折の波長依存性によって十字が消光している部分が若干変化した。放射状の縞模様はアクロマティック軸対称波長板の研磨精度によるものである。CMOS カメラで検出した図 2(a) に示す画像の偏光解析結果を図 2(b) と図 2(c) に示す。図 2(b) は偏光解析で得られた複屈折位相差の空間分布である。波長 450 nm の光ではおよそ 110° の複屈折位相差が与えられることがわかった。一方、波長 550 nm と波長 650 nm の光に対して与えられる複屈折位相差は長波長になるにつれて小さくなった。複屈折位相差はサンプルの厚み (光路長) に依存する。すなわち、波長依存性を持つため、計測で用いた波長によって複屈折位相差が変化したからである。また、超広帯域ベクトルビームによる計測結果は波長 450 nm から 905 nm の帯域において BPF を用いて各波長で計測した結果の平均値になるため、複屈折位相差の値が 60° と他の 3 波長の結果と比較すると小さくなった。図 2(c) は、主軸方位の空間分布である。主軸方位は結晶の方向性を表すため、波長依存性を持たない。そのため、どの波長における計測においてもほぼ一定であった。

図 3 は複屈折位相差と主軸方位の角度分布である。青色の破線は波長 450 nm のベクトルビーム、緑色の破線は波長 550 nm のベクトルビーム、赤色の破線は波長 650 nm のベクトルビームによる計測結果である。波長 450 nm から 905 nm 帯域で計測した結果の平均値を超広帯域ベクトルビームでの計測結果とし、黒線で示した。複屈折位相差は計測に用いた光源の波長に依存した。一方で、前述したように主軸方位は波長に依存しないため、どの波長においてもほぼ一定であった。

図 3 から複屈折位相差と主軸方位の分解能を求めた。超広帯域ベクトルビームによる複屈折位相差および主軸方位計測の分解能はそれぞれ 0.4° 、 0.2° であった。ここで、主軸方位の分解能の 0.2° は複屈折位相差が 90° のときの結果である。主軸方位計測の分解能は、複屈折位相差の大きさに依存する。回転検光子法や従来の複屈折位相差計測法と比較して、本研究で提案した計測法は同等の性能を示すことがわかった。

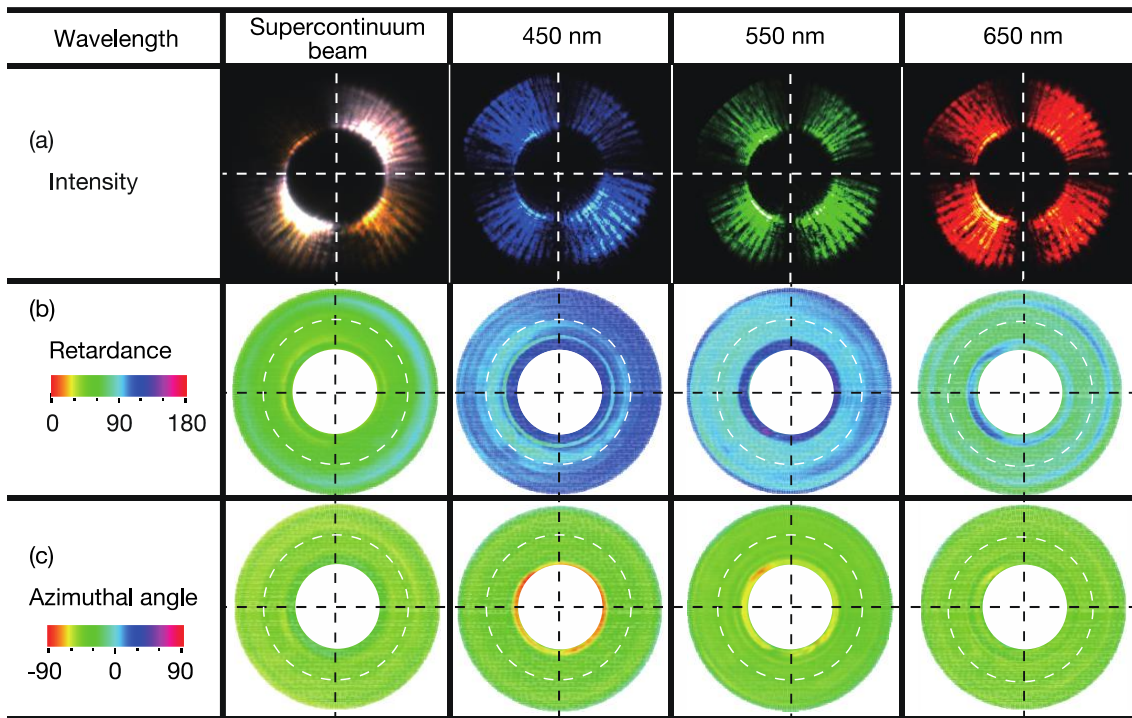


図 2 : (a) 強度分布, (b) 複屈折位相差の空間分布, (c) 主軸方位の空間分布

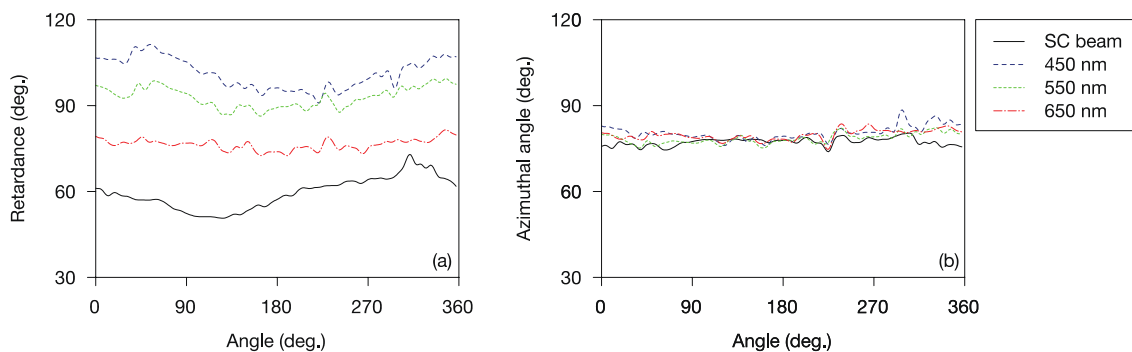


図 3 : (a) 複屈折位相差の角度分布, (b) 主軸方位の角度分布

超広帯域ベクトルビームから BPF で波長を選択して複屈折位相差と主軸方位を計測した。各波長で光強度分布を検出し、偏光解析によって得られた複屈折位相差と主軸方位を図 4 に示す。赤色のプロット点が複屈折位相差、青色のプロット点が主軸方位である。また、サファイア製の 1/4 波長板の複屈折位相差の計算値を破線で示した。超広帯域ベクトルビームにより計測した複屈折位相差は計算値とほぼ一致した。波長 450 nm の光パルスでの結果は、光源（波長 450 nm のベクトルビーム）の出力が低く、偏光解析したときの S/N 比が低くなったことから、計算値と一致しなかった。また、主軸方位は波長に依存しないため、ほぼ一定であった。波長 450 nm から 905 nm の帯域において各波長で計測した結果の平均値が赤色のハッチと青色のハッチである。赤色のハッチの複屈折位相差は $59.0^\circ \pm 5.6^\circ$ 、青色のハッチの主軸方位は $-42.8^\circ \pm 1.4^\circ$ であった。それぞれ生じたエラーバーはアクロマティック軸対称波長板の放射状の縞模様によるものである。

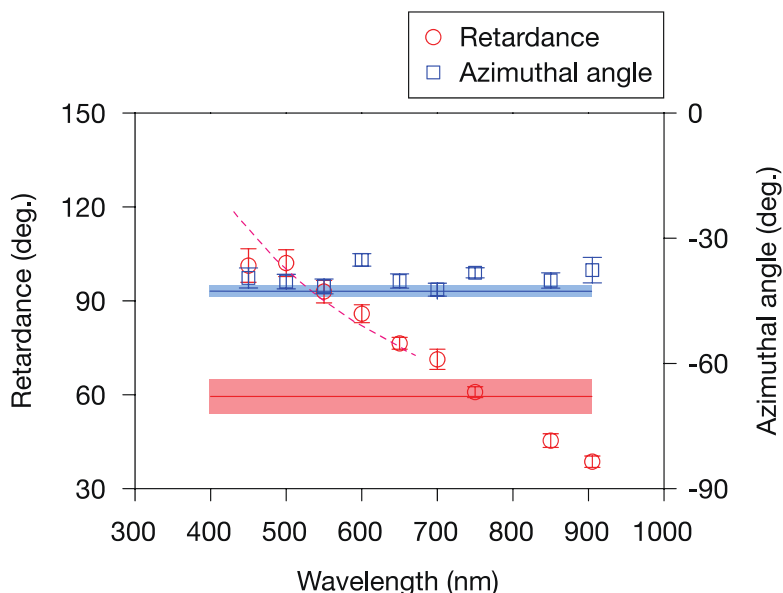


図4：各波長における複屈折位相差と主軸方位

実験結果の妥当性を検討するため、光ヘテロダイン干渉法と本研究の計測法で MgF_2 基板の複屈折位相差を計測し、比較した。波長 632.8 nm の He-Ne レーザーを用いて光ヘテロダイン干渉法により、 MgF_2 の基板上的 12 点で複屈折位相差を計測した。光ヘテロダイン干渉法で計測した複屈折位相差は $92.9^\circ \pm 9.3^\circ$ であった。一方で、本研究の計測法による波長 650 nm の光パルスでの計測結果は $87.1^\circ \pm 18.7^\circ$ であった。光ヘテロダイン干渉法による計測のときの波長よりも長い波長で計測している。そのため、光ヘテロダイン干渉法で計測した結果と比較して、複屈折位相差は小さかった。また、光ヘテロダイン干渉法に使用したレーザーのビーム径はこのときの空間分解能は 1 mm であった。空間分解能はビーム径で決まるため、 1 mm である。一方、本研究の計測法に用いた光源の空間分解能は $60 \mu\text{m}$ であった。これは、ベクトルビームの半径と偏光解析のときの高速フーリエ変換のサンプリング数に依存する。一方、今回の実験では対物レンズなどは用いていない。2次元検出器で強度分布を検出するときに、対物レンズを用いるとさらなる高分解能化が期待できる。超広帯域ベクトルビームを分光することで各波長における複屈折位相差と主軸方位を検出できることがわかった。複屈折位相差は 12 mrad であり、目標値の 2.4 倍であった。

本研究で提案する手法で、シングルショットマルチスペクトル複屈折マッピングが可能であることを実証した。さらに、超広帯域ベクトルビームを検出する前に、同心円回折格子を挿入すると、半径方向には分光データ、周方向には強度分布がシングルショットで記録される。超広帯域ベクトルビームの全波長域に対して量子効率が高い検出器で画像を検出し、偏光解析する。あるいは、本実験のように検出器に合わせて超広帯域ベクトルビームから適切に波長域を選択することで、シングルショットマルチスペクトル複屈折マッピングが可能になる。この複屈折計測法は、材料技術や生物医学などの分野において新たな発見を導く有効な技術である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tatsunori Shibuya, Kazuyuki Sakaue, Hiroshi Ogawa, Daisuke Satoh, Thanh-Hung Dinh, Masahiko Ishino, Masahito Tanaka, Masakazu Washio, Takeshi Higashiguchi, Masaharu Nishikino, Akira Kon, Yuya Kubota, Yuichi Inubushi, Shigeki Owada, Yohei Kobayashi, and Ryunosuke Kuroda	4. 巻 29
2. 論文標題 Independent contribution of optical attenuation length in ultrafast laser-induced structural change	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 33121-33133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.432130	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 Juri Ogawa, Misaki Shoji, Ryo Kageyama, Toshitaka Wakayama, and Takeshi Higashiguchi	4. 巻 11908
2. 論文標題 Birefringence mapping of optical material by use of supercontinuum vector beams	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 119080Q-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2601123	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 Shoji Misaki, Wakayama Toshitaka, Ishida Hirokazu, Kowa Hiroyuki, Sakaue Kazuyuki, Miura Taisuke, Higashiguchi Takeshi	4. 巻 59
2. 論文標題 Single-shot multispectral birefringence mapping by supercontinuum vector beams	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 7131 ~ 7131
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.393419	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 Shoji Misaki, Wakayama Toshitaka, Ishida Hirokazu, Kowa Hiroyuki, Sakaue Kazuyuki, Miura Taisuke, Higashiguchi Takeshi	4. 巻 59
2. 論文標題 Detection of birefringence singularity by supercontinuum vector beam	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 10846 ~ 10846
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.409477	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Juri Ogawa, Misaki Shoji, Ryo Kageyama, Toshitaka Wakayama, and Takeshi Higashiguchi
2. 発表標題 Birefringence mapping of optical material by use of supercontinuum vector beams
3. 学会等名 Photomask Japan 2021 (PMJ2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 庄司 美咲, 東口 武史
2. 発表標題 超広帯域ベクトルビームによる光学材料の評価
3. 学会等名 レーザー学会 九州支部第9回学生講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Misaki Shoji, Ryo Kageyama, Juri Ogawa, Gerry O'Sullivan, Atsushi Sunahara, Kazuyuki Sakaue, Martin Smrz, Tomas Mocek, Taisuke Miura, and Takeshi Higashiguchi
2. 発表標題 Development of Yb:YAG thin-disk regenerative amplifier
3. 学会等名 2020 Source Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takeshi Higashiguchi, Toshitaka Wakayama, Misaki Shoji, and Takeo Ejima
2. 発表標題 Stimulated emission depletion phenomenon in luminescence of scintillator excited by soft x-ray toward high resolution water-window microscope
3. 学会等名 2020 Source Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 庄司 美咲, 小川 純里, 影山 稜, 坂上 和之, 若山 俊隆, 東口 武史
2. 発表標題 超広帯域ベクトルビームによる複屈折検出
3. 学会等名 レーザー学会 学術講演会第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金田 凌祐, 影山 稜, 庄司 美咲, 坂上 和之, 東口 武史
2. 発表標題 Yb添加PCFによる高繰り返し高平均出力レーザーの開発
3. 学会等名 レーザー学会 学術講演会第41回年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究業績 http://photonics.sixcore.jp/

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	坂上 和之 (Sakaue Kazuyuki) (80546333)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	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	若山 俊隆 (Wakayama Toshi taka) (90438862)	埼玉医科大学・保健医療学部・教授 (32409)	

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