

令和元年6月5日現在

機関番号：12201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14125

研究課題名(和文)非常に滑らかな切断加工のための中赤外ベクトルビームの発生と縦電場生成への挑戦

研究課題名(英文)Production of vertical electric field by mid-infrared vector beams for laser micro-machining

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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：数mJの高エネルギーパルスCO<sub>2</sub>ラジアル偏光をパッシブに生成するため、ラジアル偏光を生成できるような軸対称波長板を設計した。ZnSe軸対称波長板の傾斜角度が65°のとき、位相差は90°となることがわかった。今回の設計されたZnSe軸対称波長板は波長依存性の小さいアクロマティックな位相差を与えることがわかった。楕円率とベクトル表示された主軸方位が周方向に対して変化していることから、軸対称の偏光状態をもったベクトルビームが生成されていることがわかった。また、ポアンカレ球上に周方向のストークスパラメータをマッピングすると、偏光度は0.95と極めて高い偏光度を有していることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、中赤外波長域におけるベクトルビームの発生と縦電場生成に関するものであり、その具体的応用例はレーザー切断加工である。これまでになかったビーム形態により、加工面の違いが出てきた。将来のレーザー加工に一つの新しい方法が加わると考えている。また、この研究は、他の分野に広がる可能性もある。中赤外波長域でのベクトルビームと縦電場生成技術が確立されると、金属切断面を滑らかにするだけでなく、微細周期構造を生成できる可能性もある。また異なる分野として、高分子材料の配向技術や生体細胞関係、超高周波超マイクロ電子加速器の実現など、本研究をきっかけにして、幅広い分野への波及効果が期待できる。

研究成果の概要(英文)：We demonstrated the generation of the intense radially polarized mid-infrared optical vortex at a wavelength of 10.6 μm by use of a passive axially symmetric zinc selenide (ZnSe) waveplate with high energy pulse throughput. The phase of the radially polarized optical vortex with the degree of polarization of 0.95 was spirally distributed in regard to the angle. The converted laser beam energy of about 2.6 mJ per pulse was obtained at the input pulse energy of 4.9 mJ, corresponding to the energy conversion efficiency of 56%.

研究分野：レーザー応用

キーワード：ベクトルビーム レーザー加工 中赤外レーザー 縦電場 偏光解析

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

普通用いられている一様な偏光と位相のガウスビームにはない特長を有するベクトルビームには、超集光、高電場などの新奇な特長がある。近赤外から可視光領域の波長域でこの研究が盛んに行われており、加工技術の新たな可能性を切り開く重要な研究分野である。しかしながら、偏光解析技術も高度でなければならない。われわれは図1に示すようなシングルショットでの偏光解析法を開発し、ショットバイショットで偏光状態を評価できるようにした。一方、これまで提案されてきた様々な光学素子は、高エネルギービームに耐えられるものではない上に、(1) 精密な光学調整が必要で大変である、(2) レーザー共振器内にビーム変換光学用素子を組み込むと出力が不安定になる、(3) 光学素子の波長依存性が大きいなどの問題があり、高エネルギー短パルスレーザーに適用できる光学素子は皆無であったことから、応用研究が制限を受けてきた。そこで、高エネルギーで色消し性が担保された光学素子により、入射偏光を改善してベクトルビームを発生し、高エネルギー中赤外ビームを発生することにした。

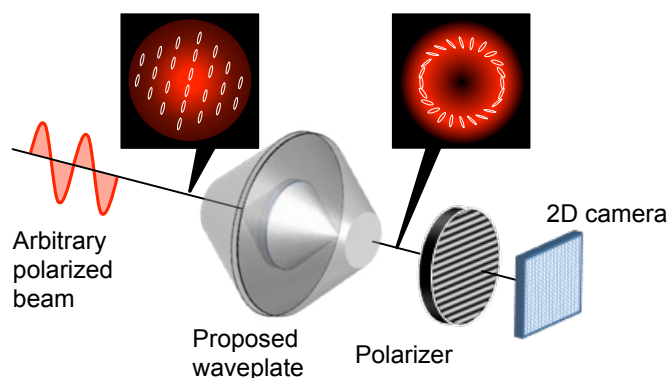


図1：シングルショット偏光解析技術の実現

### 2. 研究の目的

本研究では、中赤外レーザーの波長依存のない高出力・高エネルギーベクトルビームを簡便な方法で生成することを目的とする。そして、このビームをレンズで集光することで、縦電場を発生させ、焦点深度が深い低エネルギー閾値材料加工につなげ、省エネ化に貢献しようとするものである。ここでは、波長  $10.6 \mu\text{m}$  用の新しい光学素子により、高エネルギーベクトルビームを発生させる。

### 3. 研究の方法

本研究では、ZnSe（セレン化亜鉛）により軸対称波長板を設計した。本節では、この設計方法について述べる。数 mJ の高エネルギーパルス  $\text{CO}_2$  ラジアル偏光をパッシブに生成するために、波長  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$  のときにラジアル偏光を生成できるような軸対称波長板を設計した。まず、ZnSe 製の軸対称波長板の位相差の角度依存性を計算した。図 2(a) に位相差の角度依存性を示す。レーザーのアライメント用の He-Ne レーザー ( $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ )、レーザー加工機への応用を考慮して、Nd:YAG レーザー ( $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ )、 $\text{CO}_2$  レーザー ( $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ) の代表的な 3 つのレーザーの波長で比較した。今回、ZnSe 軸対称波長板の傾斜角度  $\beta = 65^\circ$  のとき、 $\lambda = 0.63, 1.06, 10.6 \mu\text{m}$  において位相差は  $\Delta = 90^\circ$  になる。この結果から、可視光から中赤外領域における波長に対して ZnSe 軸対称波長板から出射されるビームの位相差の波長依存性と ZnSe 軸対称波長板の透過係数を算出した。図 2(b) は位相差の波長依存性（青実線）と ZnSe 軸対称波長板の透過係数（赤破線）である。位相差に関しては  $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$  から  $\lambda = 15 \mu\text{m}$  の範囲で位相差  $\Delta = 3^\circ$  の

広がりを持っており、設計した ZnSe 軸対称波長板は波長依存性の小さいアクロマティックな位相差で動作し、透過係数は  $T=58\%$  であることが分かった。ZnSe を用いて設計された軸対称波長板は可視から中赤外領域において高いスループットを有した広帯域な軸対称波長板である。以上の計算結果を踏まえて、ZnSe を用いて軸対称波長板を試作し、ZnSe 軸対称波長板から出射されるビームの偏光状態を評価した。

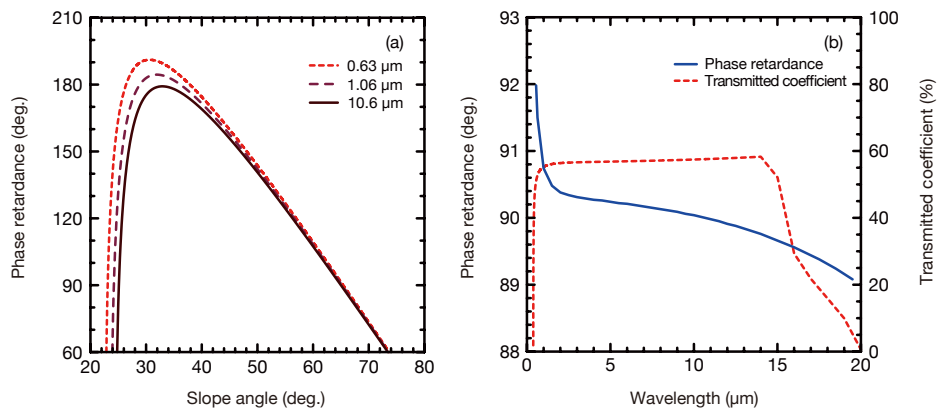


図 2 : (a)位相差の角度依存性, (b) 位相差の波長依存性 (青実線) と ZnSe 軸対称波長板の透過係数 (赤破線)

#### 4. 研究成果

入射偏光状態を  $90^\circ$  の直線偏光にして、パイロエレクトリックカメラを用いて二次元画像を取得した。得られた結果を図 3 に示す。図 3(a)–図 3(d) は、出射されるビームのストークスパラメータ  $s_0-s_3$  を示している。図 3(a) は光強度分布, 図 3(b) は  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  の直線偏光成分, 図 3(c) は  $45^\circ$ ,  $-45^\circ$  の直線偏光成分, 図 3(d) は左右円偏光成分を示している。中心のビームは素子にあいた穴を抜けてきたビームであるが、その周りにリング状に示されているのが ZnSe 軸対称波長板で生成されたビームである。図 3(e) は出射されたビームの偏光状態を楕円率とその主軸方位でマッピングした解析結果である。楕円率とベクトル表示された主軸方位が周方向に対して変化していることから、軸対称の偏光状態をもったベクトルビーム (ベクトルビームの中の一つがラジアル偏光ビームである) が生成されていることがわかる。ポアンカレ球上に周方向のストークスパラメータ  $s_0-s_3$  をマッピングすると、ポアンカレ球上に分布している。偏光度は 0.95 であり、高い偏光度を有していることがわかった。

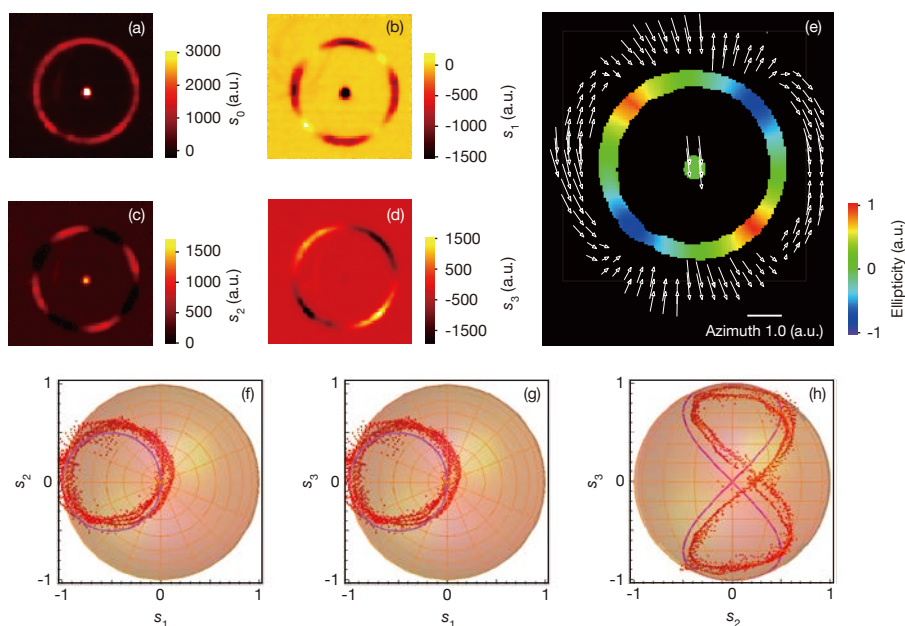


図 3 : 偏光解析結果

ZnSe 軸対称波長板に対する高エネルギーのパルス CO<sub>2</sub> レーザービームの有効ビーム径を実験的に明らかにした。入射前のビームプロファイルはガウス分布を有しており、出射後のビームはドーナツ状（円環状）であった。本研究で用いた ZnSe 軸対称波長板は研磨加工の都合から中心部分に穴があいているため、中心がそのまま抜けたドーナツビームとなっている。この抜けた部分はビームストップで遮蔽し、入射ビームの直径を変化させながら、ZnSe 軸対称波長板の透過係数を測定した。ビーム径が 4 mm のときに透過係数は最大になり、ビーム径が 4 mm よりも大きくなった場合と、小さくなった場合ではそれぞれ透過係数が低下した。光線追跡から ZnSe 軸対称波長板の有効ビーム径は 4.2 mm であり、実験結果と良く一致した。ビーム径が 4 mm を超えると、光学素子内部におけるミスアライメントが生じるため、透過係数は低下した。一方で、ビーム径が 4 mm を下回るとその透過係数は変わらないはずであるが、今回の実験結果では低下した。今回の実験ではビーム径を制御するために、絞りを用いている。ビーム径を小さくすることで、回折の影響が軸対称波長板の光学素子内部でのビームのミスアライメントを引き起こし、透過係数が低下した。開発した軸対称波長板は、ビーム径と共にそのアライメントが重要である。入射ビーム径 4 mm において入力パルスエネルギーを変化したときの出力パルスエネルギーを測定した。入力パルスエネルギーが 4.9 mJ のとき、出力は 2.6 mJ であり、透過係数は 56%であった。これは、図 2(b) の透過係数 58%とよく一致した。この出力は、レーザー孔あけ加工などに応用するのに十分なパルスエネルギーである。

この高出力ベクトルビームの偏光分布をシングルショット計測した。図 4(a) は楕円表示を使ってドーナツビーム上の周方向の偏光分布である。また、周方向の角度に対する楕円率と主軸方位が図 4(b) である。これらの結果は、回転補償子法で得られたよく一致している。本研究では、回転偏光子法や回転補償子法に換わるシングルショット偏光検出法を実証することもでき、ビームモニタリング法も提案するに至った。

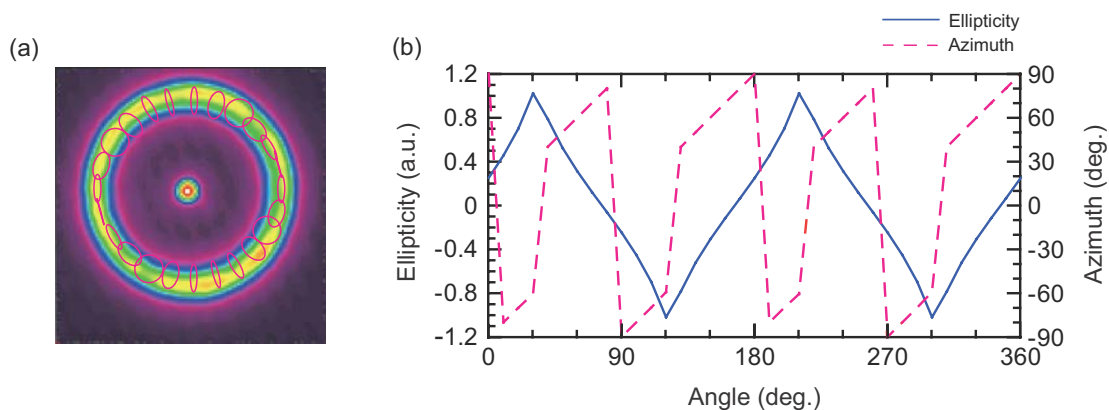


図 4 : (a) ドーナツビーム上の周方向の偏光分布, (b) 周方向の角度に対する楕円率と主軸方位

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 7 件)

- ① Misaki Shoji, Natsumi Shinozaki, Takuya Gisuji, Yusuke Fujii, Masayuki Iigo, Kenji Yamane, Kazuyuki Sakaue, Taisuke Miura, and Takeshi Higashiguchi, “Efficient near-infrared supercontinuum beam generation in ytterbium-doped double-clad passive fiber,” *Journal of the Optical Society of America B*, 査読有, 36 巻, 2018, pp. 48-52, DOI: 10.1364/JOSAB.36.000048
- ② Tatsunori Shibuya, Takashi Takahashi, Kazuyuki Sakaue, Thanh Hung Dinh, Hiroyuki Hara, Takeshi Higashiguchi, Masahiko Ishino, Yuya Koshiba, Masaharu Nishikino, Hiroshi Ogawa, Masahito Tanaka, Masakazu Washio, Yohei Kobayashi, and Ryunosuke Kuroda, “Deep-hole

- drilling of amorphous silica glass by extreme ultraviolet femtosecond pulses,” Applied Physics Letters, 査読有, 113 巻, 2018, 151901 (4 pages),  
DOI: 10.1063/1.5046125
- ③ Toshitaka Wakayama, Yuta Takahashi, Yuichi Ono, Yusuke Fujii, Takuya Gisuji, Takuto Ogura, Natsumi Shinozaki, Shun Yamauchi, Misaki Shoji, Hiromu Kawasaki, Takeshi Higashiguchi, and Toru Yoshizawa, “Three-dimensional measurement of an inner surface profile using a supercontinuum beam,” Applied Optics, 査読有, 57 巻, 2018, pp. 5371-5379,  
DOI: 10.1364/AO.57.005371
  - ④ Reiho Amano, Thang-Hung Dinh, Atsushi Sasanuma, Goki Arai, Hiroyuki Hara, Yusuke Fujii, Tadashi Hatano, Takeo Ejima, Weihua Jiang, Atsushi Sunahara, Akihiko Takahashi, Daisuke Nakamura, Tatsuo Okada, Kazuyuki Sakaue, Taisuke Miura, Gerry O’Sullivan, and Takeshi Higashiguchi, “Influence of short pulse duration of carbon-dioxide lasers on extreme ultraviolet emission from laser produced plasmas,” Japanese Journal of Applied Physics (Rapid Communication), 査読有, 57 巻, 2018, 070311 (5 pages),  
DOI: 10.7567/JJAP.57.070311
  - ⑤ Toshitaka Wakayama, Takeshi Higashiguchi, Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, and Yukitoshi Otani, “Demonstration of a terahertz pure vector beam by tailoring geometric phase,” Scientific Reports (Nature), 査読有, 8 巻, 2018, 8690 (11 pages),  
DOI: 10.1038/s41598-018-26964-7
  - ⑥ Toshitaka Wakayama, Takeshi Higashiguchi, and Yukitoshi Otani, “Generation of the determined vectorial vortex beams by use of an achromatic axially symmetric waveplate,” Optical Review, 査読有, 24 巻, 2017, pp. 449-461,  
DOI: 10.1007/s10043-017-0315-1
  - ⑦ Siva Sankar Nagisetty, Patricie Severova, Taisuke Miura, Martin Smrz, Hitoe Kon, Miyuki Uomoto, Takehito Shimatsu, Masato Kawasaki, Takeshi Higashiguchi, Akira Endo, and Tomas Mocek, “Lasing and thermal characteristics of Yb:YAG/YAG composite with atomic diffusion bonding,” Laser Physics Letters, 査読有, 14 巻, 2017, 015001 (6 pages),  
DOI: 10.1088/1612-202X/14/1/015001

〔学会発表〕 (計 16 件)

- ① 若山 俊隆, 篠崎 夏美, 庄司 美咲, 石山 貴之, 坂上 和之, 江島 丈雄, 東口 武史, 「広帯域ベクトルビームの幾何学的位相の制御」, 2019 年 第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 9a-M116-6, 東京工業大学 大岡山キャンパス (2019.3.9).
- ② 小倉 拓人, 前田 啓吾, 庄司 美咲, 篠崎 夏美, 山内 駿, 田丸 裕基, 三浦 泰祐, 東口 武史, 「アクティブミラーの波面と表面温度の評価」, レーザー学会学術講演会第 39 回年次大会, Poster13-9, 東海大学 高輪キャンパス (東京都港区) (2019.01.13).
- ③ 山内 駿, 篠崎 夏美, 小倉 拓人, 庄司 美咲, 坂上 和之, 東口 武史, 「コンパクトな Yb:YAG アクティブミラー再生増幅器の開発と中赤外光の発生」, レーザー学会学術講演会第 39 回年次大会, Poster13-6, 東海大学 高輪キャンパス (東京都港区) (2019.01.13).
- ④ 庄司 美咲, 篠崎 夏美, 坂上 和之, 東口 武史, 「Yb 添加ダブルクラッドファイバーによる超広帯域赤外光の発生」, レーザー学会学術講演会第 39 回年次大会, Poster13-5, 東海大学 高輪キャンパス (東京都港区) (2019.01.13).
- ⑤ 篠崎 夏美, 庄司 美咲, 山内 駿, 小倉 拓人, 坂上 和之, 東口 武史, 「コンパクトな Yb:YAG アクティブミラー再生増幅器の開発と超広帯域光の発生」, レーザー学会学術講演会第 39 回年次大会, Poster13-4, 東海大学 高輪キャンパス (東京都港区) (2019.01.13).
- ⑥ Takuto Ogura, Keigo Maeda, Ryo Kageyama, and Takeshi Higashiguchi, “High beam quality laser pulse amplification by multipass amplification using Yb: YAG active mirror,” The 2nd QST international symposium, P-15, Nara Kasugano International Forum, Nara, Japan (2018.11.28).
- ⑦ Shun Yamauchi, Natsumi Shinozaki, Takuto Ogura, Keigo Maeda, Yuta Shimada, Hiromu Kawasaki, Misaki Shoji, and Takeshi Higashiguchi, “Mid-IR generation pumped by a home-made 10-kHz Yb:YAG active mirror regenerative amplifier,” The 2nd QST international symposium, P-14, Nara Kasugano International Forum, Nara, Japan (2018.11.28).
- ⑧ 若山 俊隆, 高橋 優太, 小野 祐一, 藤井 雄介, 宜寿次 拓弥, 小倉 拓人, 篠崎 夏美, 山内 駿, 庄司 美咲, 川崎 太夢, 東口 武史, 吉澤 徹, 「スペckルを低減した内面形状計測による摩耗深さの検出」, 2018 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2A(B)53, 函館アリーナ (北海道 函館市) (2018.9.6).
- ⑨ 若山 俊隆, 高橋 優太, 小野 祐一, 藤井 雄介, 宜寿次 拓弥, 小倉 拓人, 篠崎 夏美, 山内 駿, 庄司 美咲, 川崎 太夢, 吉澤 徹, 東口 武史, 「広帯域レーザー光源によるスペckル低減」, 2018 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2A(B)52, 函館アリーナ (北海道 函館市) (2018.9.6).
- ⑩ 篠崎 夏美, 山内 駿, 庄司 美咲, 東口 武史, 「Yb:YAG 再生増幅器によるレーザーパルス発生と非線形効果によるスペckルの広帯域化」, プラズマ科学のフロンティア研究会 2018, P04, 核融合科学研究所 (岐阜県土岐市) (2018.8.30).

- ⑪ 小倉 拓人, 前田 啓吾, 東口 武史, 「Yb:YAG アクティブミラーを用いたマルチパス増幅法による高いビーム品質のレーザーパルス増幅」, プラズマ科学のフロンティア研究会 2018, P03, 核融合科学研究所 (岐阜県土岐市) (2018.8.30).
- ⑫ 山内 駿, 篠崎 夏美, 小倉 拓人, 前田 啓吾, 島田 悠太, 川崎 太夢, 庄司 美咲, 東口 武史, 「高繰り返し・高平均出力 Yb:YAG アクティブミラーレーザーの開発」, プラズマ科学のフロンティア研究会 2018, P02, 核融合科学研究所 (岐阜県土岐市) (2018.8.30).
- ⑬ 東口 武史, 山内 駿, 篠崎 夏美, 小倉 拓人, 庄司 美咲, 川崎 太夢, 坂上 和之, 三浦 泰祐, 「コンパクトな高平均出力パルスレーザーの開発」, レーザ・量子エレクトロニクス研究会 (LQE), LQE2018-10, 芦原温泉清風荘, 福井県あわら市 (2018.5.24).
- ⑭ 若山 俊隆, 東口 武史, 坂上 和之, 鷺尾 方一, 大谷 幸利, 「渦成分を低減したラジアル偏光ビームの実証」, 第 78 回応用物理学学会秋季学術講演会, 8a-S44-4, 福岡国際会議場 (福岡県福岡市) (2017.9.8).
- ⑮ 若山 俊隆, 東口 武史, 坂上 和之, 鷺尾 方一, 大谷 幸利, 「ベクトルビームの偏光分布のシングルショット決定」, 第 78 回応用物理学学会秋季学術講演会, 8a-S44-3, 福岡国際会議場 (福岡県福岡市) (2017.9.8).
- ⑯ 若山 俊隆, 東口 武史, 坂上 和之, 鷺尾 方一, 大谷 幸利, 「ラジアル偏光内の渦成分の低減」, 第 78 回応用物理学学会秋季学術講演会, 8a-S44-2, 福岡国際会議場 (福岡県福岡市) (2017.9.8).

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 広帯域レーザー出力装置

発明者: 東口 武史

権利者: 国立大学法人宇都宮大学

種類: 特許

番号: 特願 2016-127278, 特開 2018-004722

出願年: 平成 28 年

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://photonics.sixcore.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究協力者

研究協力者氏名: 若山 俊隆

ローマ字氏名: (WAKAYAMA Toshitaka)

※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、研究者個人に帰属されます。