

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：32409

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420205

研究課題名(和文)近赤外・中赤外領域アクロマティック・ベクトルビームの制御

研究課題名(英文)Control of achromatic vectorial vortex beam in near and middle infrared spectral regions

研究代表者

若山 俊隆 (WAKAYAMA, Toshitaka)

埼玉医科大学・保健医療学部・准教授

研究者番号：90438862

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：ベクトルビームは、偏光と位相において空間的な特異点を有し、そのユニークな光学特性から超解像顕微鏡、レーザー加工機、光通信や光記録といった様々な応用が行われている。一般的にこのようなビームは波長依存性が存在しており、波長依存性のないアクロマティックなベクトルビームの生成と制御は難しかった。我々のグループでは内部フレネル反射を用いることで近赤外および中赤外領域において波長依存性なくベクトルビームの制御を行い、ベクトルビーム解析によるシングルショット偏光決定法を実証した。

研究成果の概要(英文)：Vectorial vortex beam, which has spatial singularity in polarization and phase, has been studied several applications such as super resolution microscope, laser processing, optical communications, and optical storages, due to their unique optical characterization. In general, it is difficult to achromatically generate and control the vectorial vortex beams, because such beams has strongly depended on the wavelength. We demonstrate to control achromatic vectorial vortex beams by use of internal Fresnel reflections in near and middle infrared spectral regions and to determine the arbitrary polarization states by use of vectorial vortex analysis.

研究分野：医用生体工学

キーワード：ベクトルビームの制御 アクロマティック 内部フレネル反射

1. 研究開始当初の背景

近年、光軸に沿って軸対称な偏光分布を有するベクトルビームが新たな学術分野を創生している。ベクトルビームの中で放射状偏光分布をもつラジアル偏光を高 NA の対物レンズで集光したとき、焦点近傍で縦電場が発生する。この縦電場は電子加速器の応用が議論され、顕微鏡における横分解能の向上が明らかにされた。共焦点顕微鏡やレーザー加工の超解像が達成された一方で、偏光は均一ながら、位相面が「らせん」に変化する光渦も注目され、STED 顕微鏡は生命科学で新たな現象を発見し、光渦レーザーはキラル・ナノ構造の生成を可能にした。このような背景からベクトルビームの簡易な生成法が望まれ、現在までに可視光領域で液晶や微細周期構造を用いた手法が提案されている。しかし、これらは波長依存性が強く、従来の方法ではアクロマティック軸対称波長板の作製は困難であった。

この問題点を解決するために、現在までに申請者らは内部フレネル反射に基づいたアクロマティック軸対称波長板を開発してきた。しかしながら、この段階では近・中赤外領域においてベクトルビームを波長依存性無く高効率に変換する技術は提案されていなかった。近・中赤外領域では「光と分子の相互作用」が強いため、計測・分析、加工、操作および治療や診断においてベクトルビームの様々な応用が開拓できると予想された。このように広範囲に広がる波及性があるにもかかわらず、現在までに、簡易に近・中赤外領域でアクロマティック・ベクトルビームを生成できるアクロマティック軸対称波長板の提案は国内外で皆無であった。

2. 研究の目的

近・中赤外領域においてアクロマティック・ベクトルビームが精密に制御されれば、光と分子の相互作用から新たな光科学を切拓することができる。しかし、現在までにその有効な方法は国内外に皆無であった。申請者は内部フレネル反射に基づいたアクロマティック軸対称波長板から可視光と THz の各領域でベクトルビームの生成に成功した。本研究はこの手法を ZnSe 結晶に展開し、近・中赤外領域アクロマティック・ベクトルビームの精密制御から電子や微粒子のレーザー・マニピュレーションを行う。本研究が達成されたとき、レーザー計測・加工分野で国際的に極めて強いインパクトを与え、我が国の国際力強化にも寄与すると考えられる。

3. 研究の方法

近・中赤外域においてベクトルビームをアクロマティックに精密制御するために以下を行った。

- (1) シングルショット偏光決定法の構築
- (2) 近・中赤外領域アクロマティック軸対称波長板を設計、試作、及び評価

(3) 中赤外高強度ラジアル偏光渦の生成

4. 研究成果

内部フレネル反射に基づいた軸対称波長板を設計するために角度に対する内部フレネル反射による位相差を数値計算した。図 1(a)にその結果を示す。まず、原理実証を行うために光学素子の加工精度を考慮して波長が長いテラヘルツ光源を用いて数値計算を行った。テラヘルツ光に対してポリテトラフルオロエチレンは 0.1~1.6 THz において屈折率 $n = 1.44$ とされている。これを元に位相差を計算すると、傾斜角度に対する位相差が得られた。今回は加工しやすいように傾斜角度を 55° として軸対称波長板を試作することにした。その図面を図 1(b)に示す。設計・試作した軸対称波長板はフレネルロムを光軸に対して回転対称体にした構造である。図 1(b)に示された軸対称波長板の内部を 2 回内部フレネル反射することでドーナツビームが生成される。その光は角度によって異なる偏光を有している。この軸対称波長板を 1 対にすることで同軸上にビームを戻すことが可能になる。

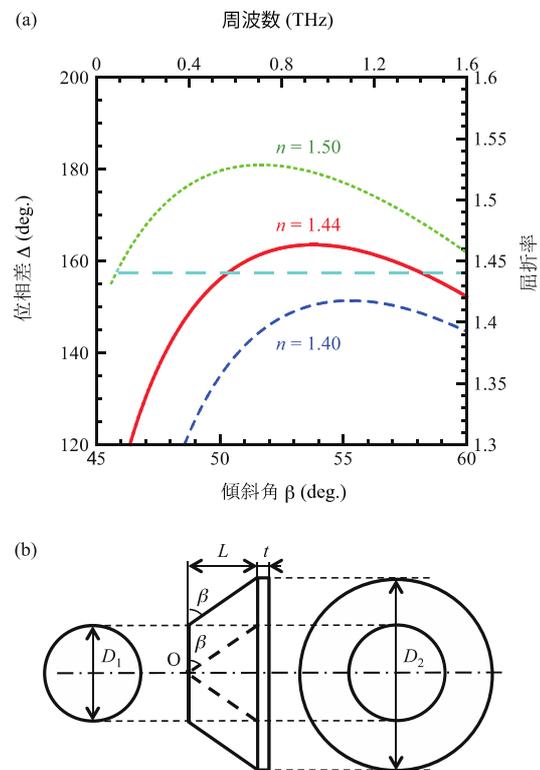


図 1 内部フレネル反射の計算と軸対称波長板の構造 (a)内部フレネル反射の数値計算結果 (b)軸対称波長板の構造

設計された 1 対の軸対称波長板と偏光子および 2D 検出器を用いてベクトルビームの検証実験を行った。またここでは入射ビームの任意偏光が軸対称波長板によって線形変換されることを考慮して、入射偏光のシングルショット検出も同時に行った。図 2 がそのときに使用した光学系である。

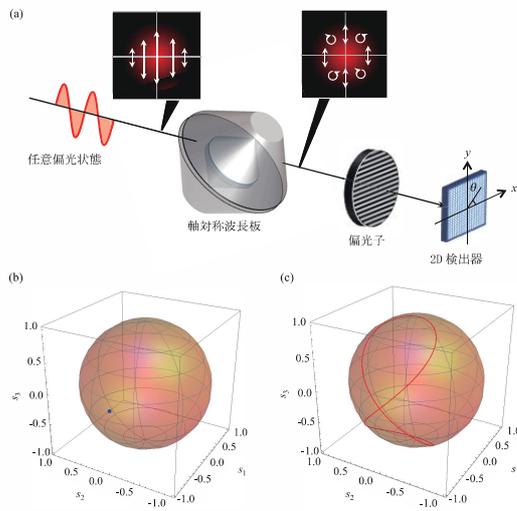


図 2 軸対称波長板を用いたシングルショット偏光決定の光学系 (a)実験光学系 (b)入射する偏光と(c)軸対称波長板によってベクトルビームにされた角度変調偏光のポアンカレ球表示

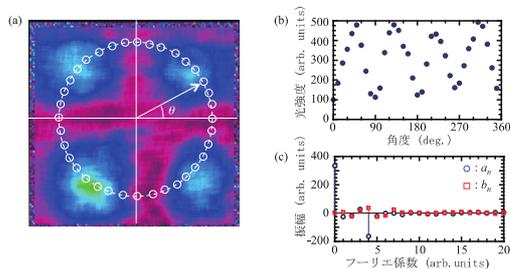


図 3 計測された画像 (a)計測された画像、(b)角度毎の光強度分布、(c)フーリエ解析結果

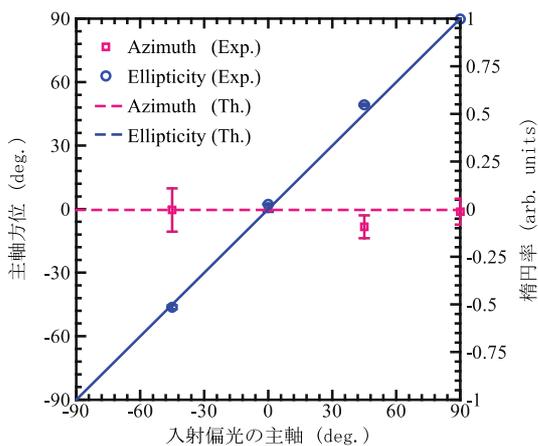


図 4 入射偏光の任意偏光検出結果

図 2(a)は入射光の任意偏光をポアンカレ球で示している。図 2(b)は軸対称波長板によって角度によって異なる偏光を有したベクトルビームの偏光をポアンカレ球で表している。今回の実験では0.16 THzと0.36 THzの周波数を有したテラヘルツ光源を用いて実験を行った。

図 3 は 0.16 THz 光源を用いてベクトルビームを生成し、2D 検出器によって取得された THz 光強度分布である。図 3(b)は図 3(a)の白丸上の光強度分布を表している。この図が示すように角度に対して正弦状に光強度が変化している。これをフーリエ解析することで振幅成分を得る。この振幅成分の中には入射偏光を表すストークスパラメータが含まれているので、シングルショットで偏光決定することが可能となる。

以上の原理を用いて、原理検証実験を行った。その結果を図 4 に示す。図 4 では入射するテラヘルツ光の偏光を 45° ずつ変化させてそのストークスパラメータを取得し、そこから楕円率と主軸方位を得た。入射偏光に対して出射偏光がよく一致していることからシングルショット偏光検出実証された。

次に軸対称波長板は線形変換であるため、入射光の任意偏光を決定できているならば、軸対称波長板を出射されたベクトルビームの偏光分布も決定できる。この考えを原理検証した結果を図 5 に示す。ここでは入射偏光に直線偏光と楕円偏光を用いた。図 5(a)は直線偏光を入力した時の 2D 検出器で取得された光強度分布である。この画像から入射偏光図 5(c)を取得し、順問題を解くことでベクトルビームに変換された後のベクトルビームの偏光分布図 5(e)も決定した。同様に入射偏光が楕円偏光 (図 5(b)) だった場合は、逆問題を解くことで図 5(d)のような入射偏光が決定され、さらに順問題を解くことでベクトルビームの角度毎の偏光分布(図 5(f))もシングルショットで決定された。

従来の偏光解析法では光学素子を回転させたり、電気的な偏光変調が必要であったためシングルショットでの偏光決定は困難であった。この方法を用いれば、例えば、レーザー加工をしながらそのビームの偏光もモニタリングすることが可能となり、より高品質なレーザー加工を実現することができると考えられる。

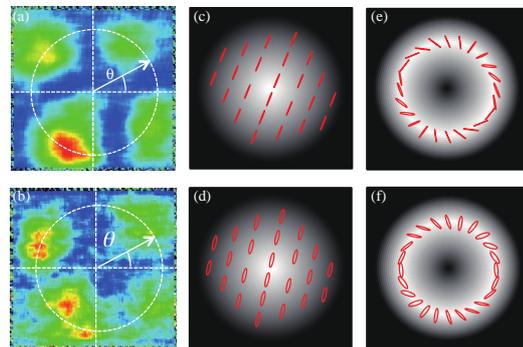


図 5 軸対称波長板の前後のシングルショット偏光検出の結果 (a), (b)2D 検出器で検出された画像 (c)直線偏光と(d)楕円偏光を入射したとき (e) 直線偏光および(f)楕円偏光が軸対称波長板から出射された後のベクトルビームの決定結果

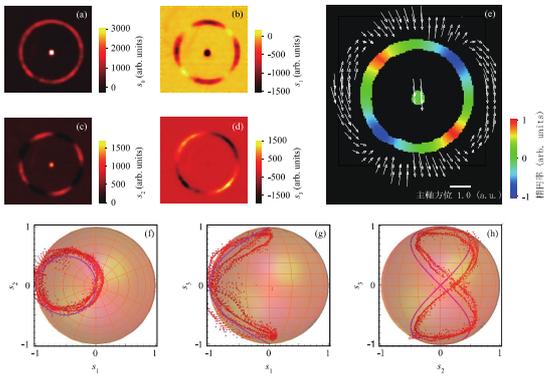


図 6 ZnSe を用いた軸対称波長板から出射された偏光ビーム (a)-(d) ストークスパラメータ s_0, s_1, s_2, s_3 (e) 楕円率と主軸方位分布, (f)-(h) ポアンカレ球表示 $s_1-s_2, s_1-s_3, s_2-s_3$ 平面

今回、数 mJ の高エネルギーパルス CO₂ ラジアル偏光をパッシブに生成するために、波長 = 10.6 μm 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(セレン化亜鉛)製の軸対称波長板の位相差の角度依存性を計算した。レーザーのライメント用の 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えて、Nd:YAG レーザー ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$), そして、CO₂ 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 $\theta = 65^\circ$ のとき、 $\lambda = 0.63, 1.06$, そして、 $10.6 \mu\text{m}$ において位相差 $\Delta\phi = 90^\circ$ となることが計算から明らかになった。この結果を踏まえて、さらに詳しく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。位相差に関しては $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ から $\lambda = 15 \mu\text{m}$ の範囲において位相差 $\Delta\phi = 3^\circ$ の広がりを出すものであって、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โครマティックな位相差を与えることが計算から求めた。その一方で、ZnSe 軸対称波長板の透過スペクトルも出射されるビームの特性を見極める上で極めて重要である。計算結果から $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ から $\lambda = 15 \mu\text{m}$ の範囲において透過係数は $T = 58\%$ と算出され、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になると期待された。

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を回転補償板法から解析を行った。ここでは、入射偏光状態を 90° 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 2 に示す。図 6(a)~(d) は、出射されるビームのストークスパラメータ $s_0 \sim s_3$ を示している。図 6(a) は光強度分布を示し、図 6(b) は $0^\circ, 90^\circ$ の直線偏光成分、図 6(c) は $45^\circ, -45^\circ$ の直線偏光成分、図 6(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ものが今回の ZnSe 軸対称波長板で生成されたビームである。図 6(a)~(d) では少しわかりにくいので、図 6(e) に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を示した。カラー分布で示され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(ベクトルビーム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。また、ポアンカレ球上に周方向のストークスパラメータ $s_0 \sim s_3$ をマッピングしてみると、ポアンカレ球上に射出されたビームが分布されていることがわかる。偏光度を計算してみると 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。

これまでの結果では偏光解析を行ってきたので偏光分布としてはラジアル偏光が生成されていたことが観察された。しかし、その位相面がどうなっているのかも調べる必要がある。そのため、今回、マッハツェンダー干渉計を組んでその位相面を調査した。その結果 2 本の干渉縞が螺旋を描いていることがわかった。位相シフト法を用いて干渉縞画像を解析し、今回出射されたビームの位相分布を計測すると角度 θ に対して 2θ (rad) の螺旋状の位相差を有することが明らかになった。このことから、出射されたビームは同位相面のラジアル偏光ビームではなくて、螺旋位相を有したラジアル偏光渦であることが明らかになった。

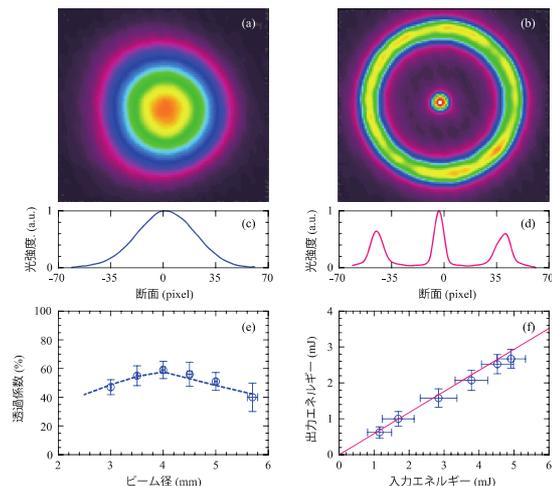


図 7 ZnSe 軸対称波長板の入射前後の高強度パルス(a)直線偏光ビームと(b)ベクトルビーム (c)と(d)光強度分布 (e)入射ビーム径を変化させた時の透過係数の変化, (f)入出力のスループット

次に、ZnSe 軸対称波長板に対する高エネルギーパルスビームの有効ビーム径を実験的に明らかにした。図 7(a)と(b)にはそれぞれ

ZnSe 軸対称波長板に入射する前後のビームプロファイルである。図 7(c)と(d)はそれぞれのビームプロファイルを示しており、入射前のビームプロファイルはガウス分布を示しており、出射後のビームはドーナツ状になっている。ただし、開発した 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。その結果を図 7(e)に示す。ビーム径が 4 mm のときに最大透過係数となり、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。今回、光線追跡から ZnSe 軸対称波長板の有効ビーム径は 4.2 mm と見積もられており、実験結果からも 4 mm とよく一致した。そのため、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 を下回れば、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て行った。今回の実験ではビーム径を制御するために、絞りをういていたが、ビーム径を小さくして行くことで、回折の影響が生じビームが軸対称波長板の光学素子内部でミスアライメントを生じさせたことによって透過係数が低下していった。故に、今回開発され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ことが明らかになった。今回明らかになった入射ビーム径 4 mm において入力ビーム強度を変化させたとき、出力ビーム強度を計測した。その結果を図 7(f)に示す。最大入力ビーム強度 4.9 mJ に対して 2.6 mJ が得られた。2.6 mJ の透過係数が得られれば、レーザー孔あけ加工などに応用することが期待できる。

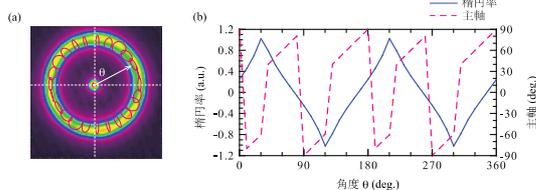


図 8 ベクトルビームのシングルショット偏光決定(a)ベクトルビームの角度毎の偏光決定の結果と(b)角度毎の楕円率と主軸方位分布

図 6 で取得した偏光解析結果は、回転補償子法といって 1/4 波長板を時系列に回転させながら複数毎の画像を取得して偏光分布を解析する方法であった。この方法ではショット毎に変化する偏光分布をとらえることはできない。我々のグループで開発した偏光のシングルショット検出法を用いれば、レーザー加工をしている間のレーザーの偏光分布を観察できる。今回、高強度 CO₂ パルス・ベクトルビームにおいても図 2 に示したシングルショット偏光検出実験を行った。図 8(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を表現している。周方向の角度に対する楕円率と主軸方位を図 8(b)に示している。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。本結果から今までの偏光解析法の代表例であった回転偏光子法や回転補償子法に代替するシングルショット偏光検出法の有効性が高強度パルス中赤外ビームにおいても実証された。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

T. Wakayama, T. Higashiguchi, and Y. Otani, Opt. Review (Online first), DOI 10.1007/s10043-017-0315-1 (Special Section : Invited paper)

T. Wakayama, T. Higashiguchi, and Y. Otani, SPIE Newsroom (2016)
DOI: 10.1117/2.1201512.006281

T. Wakayama, H. Oikawa, A. Sasanuma, G. Arai, Y. Fujii, T.-H. Dinh, T. Higashiguchi, K. Sakaue, M. Washio, T. Miura, A. Takahashi, D. Nakamura, T. Okada, M. Yonemura, and Y. Otani, Appl. Phys. Lett., 107, 2015, 081112-1-081112-5.

T. Wakayama, T. Higashiguchi, H. Oikawa, K. Sakaue, M. Washio, M. Yonemura, T. Yoshizawa, J. S. Tyo, and Y. Otani, Sci. Rep. 5, 9416 (2015).

[学会発表] (計 6 件)

[1] ○若山 俊隆, “ベクトルビームのパッシブ制御によるテラヘルツ偏光検出,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2016, 筑波大学東京キャンパス文京校舎 (東京都文京区大塚 3-29-1) 2016 年 11 月 2 日 (水)

[2] T. Wakayama, T. Higashiguchi, H. Oikawa, K. Sakaue, M. Washio, M. Yonemura, T. Yoshizawa, J. S. Tyo, Y. Otani, “Terahertz polarization determination by passive control of vectorial vortex beam,” 2015 IEEE Photonics Conference, 28th Annual Conference of The IEEE Photonics Society, WB1.3, Hyatt Regency Reston, Reston, Virginia USA, 2015 年 10 月 7 日 (水) .

[3] ○若山 俊隆, 及川 大基, 笹沼 淳史, 荒居 剛己, 藤井 雄介, ゴン タン フン, 東口 武史, 坂上 和之, 鷺尾 方一, 三浦 泰祐, 高橋 昭彦, 中村 大輔, 岡田 龍雄, 米村 元喜, 大谷 幸利, “高強度中赤外ラジアル偏光渦の発生,” 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 13p-2E-3, 名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市熱田区熱田西 1-1) 2015 年 9 月 13 日 (日)

[4] 若山 俊隆, 東口 武史, 及川 大基, 坂上 和之, 鷺尾 方一, 米村 元喜, 吉澤 徹, タイヨ スコット, 大谷 幸利, “ベクトルビーム制御によるスナップショット THz 偏光検出,” 第 40 回光学シンポジウム, 東京大学 生産技術研究所 An 棟 コンベンションホール (〒153-8505 東京都 目黒区 駒場 4-6-1) 2015 年 6 月 26 日 (金)

[5] 若山 俊隆, 東口 武史, 及川 大基, 坂上 和之, 鷺尾 方一, 米村 元喜, 吉澤 徹, タイヨ スコット, 大谷 幸利, “テラヘルツビームの偏光検出: ベクトル渦解析 III,” 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 14a-A12-5, 東海大学湘南キャンパス(〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 4-1-1) 2015 年 3 月 14 日(土)

[6] 若山 俊隆, 東口 武史, 及川 大基, 坂上 和之, 鷺尾 方一, 米村 元喜, 吉澤 徹, タイヨ スコット, 大谷 幸利, “テラヘルツビームの制御 II,” 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 14a-A12-4, 東海大学湘南キャンパス (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 4-1-1) 2015 年 3 月 14 日 (土)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

若山 俊隆 (WAKAYAMA, Toshitaka)
埼玉医科大学・保健医療学部・准教授
研究者番号: 90438862

(2) 研究分担者

東口 武史 (HIGASHIGUCHI, Takeshi)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・教授
研究者番号: 80336289
(平成 27 年度より連携研究者)