

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：16101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26560213

研究課題名(和文) 偏光に関する幾何学的位相を利用した超高感度血糖値センサの開発

研究課題名(英文) Development of a blood sugar level sensor by use of the geometric phase in the polarized light

研究代表者

岩田 哲郎 (Iwata, Tetsuo)

徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：50304548

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)：高感度血糖値センサを開発する目的で、高感度旋光分散測定手法の提案を行った。提案手法では、サバル板を用いた偏光干渉に基づくマルチチャンネルフーリエ分光器に、1/4波長板を挿入し、ある特定の進相軸方位で、偏光子を順次回転しながらインタフェログラムを取得し、各波長毎に位相の変化量をプロットする。その結果、幾何学的位相の波長依存性が求まり、進相軸方位の設定によっては非線形挙動も観測される。実際に装置を構築して原理検証を行った。その結果、蔗糖溶液に対して測定が行えたが、さらに装置的な改良が必要なることも認識された。別途に、テラヘルツ周波数領域で幾何学的位相が直接測定できることを示した。

研究成果の概要(英文)：In order to measure optical rotatory dispersion (ORD) of an optically active sample by utilizing a nonlinear behavior of the geometric phase (GP), we used a multichannel Fourier-transform spectrometer (MC-FTS) based on Savart-plate birefringent-polarization interference, in which a zeroth-order quarter-wave plate (QWP) was newly added. The modified MC-FTS enables us to derive the wavelength dependency of the GP and the optical rotation angle due to the sample. When the GP was measured as a function of the polarization angle of the analyzer in the MC-FTS for a specified orientation angle of the principal axis of the QWP, we can observe the nonlinear behavior of GP. Thereby enhancement of the sensitivity in measurements is achieved at the cost of the visibility of the interference pattern. In proof-of-principle experiments, we found further modification is necessary. We also found that direct measurements of the GP is possible in the THz time-domain spectrometer.

研究分野：applied physics

 キーワード：幾何学的位相 分光
 マルチチャンネルフーリエ分光器 旋光分散 非線形 血糖値測定 テラヘルツ時間領域

1. 研究開始当初の背景

血糖値の光学的な無侵襲計測は、過去 50 年にも亘る医療機器開発の歴史の中で“見果てぬ夢”とまで言われている(例えば、光学 33 巻 7 号の特集号を参照)。その理由は、“臨床医学で求められる 10 mg/dl 以下の精度測定は装置の限界を超えている”からだそうである。それでも様々な工夫によって「測定できた」とする報告が絶えず現れている。例えば、グルコースセンサとして、マッハツエンダー干渉計とロックインアンプの組み合わせを用いる方法、ファラデーローテーター、もしくはゼーマンレーザを用いる方法、液晶変調器、電気光学効果変調器を用いたヘテロダイナ法、サニャック干渉計を用いる方法、フェムト秒レーザを用いる方法など枚挙に暇がない。しかし、食品業界、製薬業界などにおいては、古くからある旋光計を用い、ある特定波長での旋光度、もしくはその波長依存性である旋光分散(ORD; optical rotatory dispersion)を測定する手法が相変わらず一般的である。

2. 研究の目的

(1) そのような背景のもとで、本研究の目的は、超高感度血糖値センサを開発すること、それに適した新規な ORD 測定法を提示することであった。すなわち、古くからある旋光度測定に波長情報を加味し、分析のための情報量を増やすだけでなく、従来にはない新しい分析手法の可能性を検討した。

(2) そこで本研究では、偏光に関する幾何学的位相(GP; geometric phase, または Pancharatnam-Berry phase, 単に Pancharatnam phase と呼ばれている)という量に着目した[1-3]。ここで、多波長の情報を同時に取得するために、サバル板を用いた偏光干渉に基づくマルチチャンネルフーリエ分光器(MC-FTS; multichannel Fourier-transform spectrometer)の光学系を採用し[4-5], GP の非線形挙動[6-7]を分析の高感度化に活かすことを試みた。

(3) 非線形挙動を生じさせるために、MC-FTS に 1/4 波長板(QWP)を新たに挿入し、その進相軸方位を適切に設定することにより、試料の直線複屈折性(LB; linear birefringence)の波長依存性(分散特性)が高感度に求められることを示す。すなわち、試料の高感度 ORD 測定という課題に対して、検出下限を改善する目的で、試料の偏光に起因する GP の非線形挙動を利用した全く新規な計測手法を提案することが主目的で、それに付随して高感度グルコースセンサを構築するのが第 2 の目的である。

(4) 一方、上記(1)~(3)とは別途に、テラヘルツ(THz)周波数領域で GP の直接測定が行えることを初めて示すことも目的の一つであった。時間領域 THz 分光法(THz-TDS)では、可視・紫外波長領域とは異なり、電磁

波の振幅と位相スペクトルが直接取得できる。このことは、可視波長領域では干渉測定によってしか得られない幾何学的位相が直接取得できる可能性を意味する。その実証だけでも興味深い、さらに進んで、不透明散乱媒質中でのキラリティを有する巨大分子の分析という狙いもあった。

3. 研究の方法

(1) 図 1 に QWP を追加した改変型 MC-FTS の構成を示す。フーリエ変換レンズの前側焦点面に配置した白色光源から出射された光は 45° 方位の偏光子 P を通過後、サバル板 SP によって、空間的に互いに変位した水平偏光と垂直偏光に分離される。この 2 つの直線偏光は、試料がない場合には進相軸方位 $\phi=45^\circ$ の QWP にそのまま入射する。したがって QWP からの出射光は、その設計波長 $\lambda=632.8 \text{ nm}$ では、それぞれ右回り、左回り円偏光となる。設計波長以外では QWP の LB 量に応じて左右の楕円偏光となる。これら 2 つの円偏光(または楕円偏光)は、方位角 θ の検光子 A を通過後、フーリエ変換レンズの後側焦点面に配置した面検出器上に干渉縞を形成する。これをフーリエ変換して光源の振幅スペクトルと位相スペクトルを得る。このようにして得られる位相は、干渉に寄与した 2 つの光束の偏光状態の軌跡をポアンカレ球面上にプロットして得られる 2 つの球面三角形の面積の差に相当する量であり、幾何学的位相 GP と解釈できる。

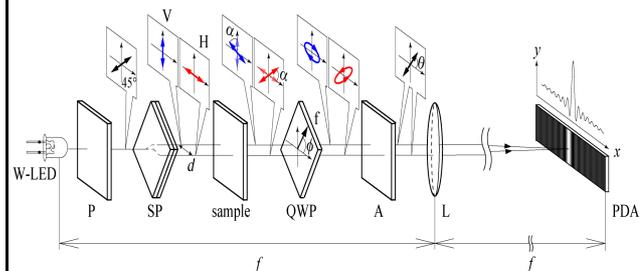


図 1 サバル板(SP)を用いた偏光干渉に基づく改変型 MC-FTS の光学系; QWP; 零次 1/4 板, W-LED; 白色 LED, A; 検光子, L; フーリエ変換レンズ, PDA; フォトダイオードアレイ, ϕ ; QWP の進相軸方位, θ ; 検光子の方位角, α ; 試料による旋光角。全ての角度は水平 x 軸方向に対して反時計方向を正とした。

(2) 以上を確認するため、偏光を表すジョーンズ行列を用いて GP に関する数値計算を行った。パラメータは、検光子 A の方位角 θ , QWP の方位角 ϕ , 零次の水晶製 QWP の複屈折性の波長依存性 $\alpha(\lambda)$, そして試料の旋光度の波長依存性 $\alpha(\lambda)$ である。ここで、検光子 A の方位

角 θ を変化させながらそれぞれの θ で位相スペクトルを取得する．そして波長エレメント λ 毎に GP を θ の関数として再プロットする．その結果，波長毎に GP の θ 依存性が取得できる．まず，試料がない場合の $\alpha(\lambda) = 0$ に対して，波長を $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ に固定し，QWP の方位角を $\phi = 45^\circ$ から変化させた場合の GP を θ の関数として計算し，その非線形挙動がどのように現れるか調べた．次に，白色光源を用いた場合を想定し， $\delta(\lambda)$ がセルマイヤーの式から算出できるとして，GP に与える影響を調べた．そして最後に試料が存在する場合，すなわち $\alpha = 0$ でない場合の検出感度と下限についての検討を行った．その後，実際にそれらの数値計算に対応する検証実験を行った．最後に，厚さ既知の水晶製偏光板と濃度既知の蔗糖溶液 $\alpha(\lambda)$ を試料として，実証実験を行った．

(3) また，テラヘルツ (THz) 周波数領域で GP の直接測定に関して，厚さ 2.0mm のアルミニウム平板上に設けた 1.0ϕ ，ピッチ 0.25mm の 5×5 の周期的ネジ穴構造を用意した．比較のためにストレート穴，左ネジと右ネジ半ずつの試料も用意した．図 2 はそのための測定光学系のブロック図である．通常の時間領域 THz 分光測定 (THz-TDS) の光学系に 45 度方位の QWP を挿入し，検光子の方位角 θ を変化させながら波形取得を行い，位相スペクトルから GP を直接取得するという簡単な構成である．

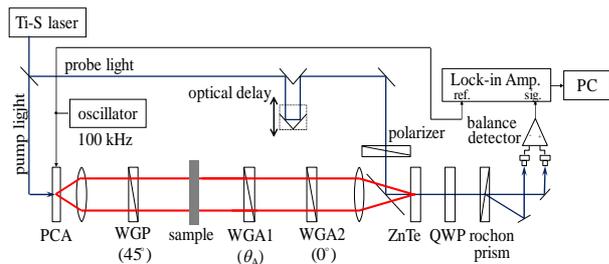


図 2 幾何学的位相 (GP) 測定のための THz-TDS システムのブロック図 .TiS; チタンサファイアレーザー, PCA; 光伝導アンテナ, WGP; ワイヤーグリッド偏光子, QWP; $1/4$ 板 .

4. 研究成果

4.1 数値計算

(1) 図 3 は，偏光を表すポアンカレ球面上での GP の直観的な説明図である．図 1 の光学系で得られる GP は，図中の赤と青で囲まれた球面三角形の面積の和に比例する．QWP の設計波長 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ において，(a) は $\phi = 45$ 度で試料が存在しない場合 ($\alpha = 0$) であり，サバル板 SP で分離した 2 つの水平偏光 H と垂直偏光 V は，それぞれ右回り円偏光

N と左回り円偏光 S となる．それらが検光子 A を経て干渉する．この時得られるインターフェログラムのその設計波長での位相は，検光子 A の方位 θ を変化させると線形に変化することが分かる．この変化量は GP の変化量に比例している．したがって，GP も方位 θ を変化に応じて直線的に変化する．同図の (b) は，試料がある場合，すなわち旋光度 α が 0° でない場合である．このとき，(a) 図での H と V はそれぞれ H' と V' に移動して，N と S は N' と S' となる．この場合，検光子 A の方位 θ を変化させると GP の変化はもはや (a) のように直線的とはならない．同図の (c) はさらに QWP の方位 ϕ を 45 度から変化させた場合である．非線形の程度はさらに大きくなる．同図の (d) ~ (f) は，(a) ~ (c) と同じ設定であるが，波長が QWP の設計波長からずれた場合である．QWP の LB の波長依存性 $\delta(\lambda)$ に応じて，GP の非線形挙動がさらに大きく強調される．

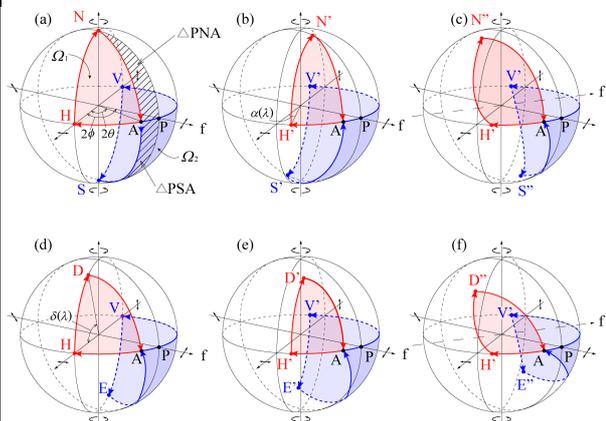


図 3 零次の QWP を挿入した改変型 MC-FTS で測定される GP (Γ) の挙動の Poincaré 球を用いた説明図． α ; 試料に起因する旋光角， α ; 検光子の方位角， ϕ ; QWP の進相軸方位角， $\delta(\lambda)$; QWP による波長 λ でのリターデーション:

- (a) $\phi = \pi/4, \alpha = 0, \delta(\lambda) = \pi/2$,
- (b) $\phi = \pi/4, \alpha \neq 0, \delta(\lambda) = \pi/2$,
- (c) $\phi \neq \pi/4, \alpha \neq 0, \delta(\lambda) = \pi/2$,
- (d) $\phi = \pi/4, \alpha = 0, \delta(\lambda) \neq \pi/2$,
- (e) $\phi = \pi/4, \alpha \neq 0, \delta(\lambda) \neq \pi/2$,
- (f) $\phi \neq \pi/4, \alpha \neq 0, \delta(\lambda) \neq \pi/2$.

以上のそれぞれの場合に対する幾何学的位相 Γ の挙動を θ の関数としてプロットした結果を図 4 に示す．(a) の線形挙動に対して，(c) や (f) の非線形な挙動が特に注目される．この非線形挙動の意味するところは，それぞれ条件で，そのような特定の θ 近傍で測定を行えば，従来の線形な領域での測定に対して測定感度の向上が見込めるといえることである．

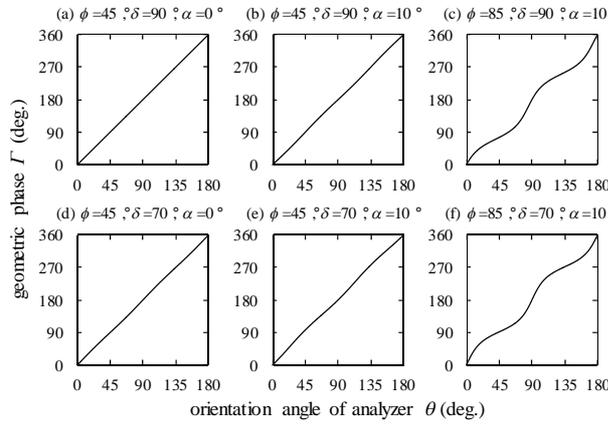


図4 θ の関数として Γ をプロットした結果：

- (a) $\Gamma(\theta, \phi = \pi/4, \delta = \pi/2, \alpha = 0)$,
- (b) $\Gamma(\theta, \phi = \pi/4, \delta = \pi/2, \alpha = \pi/18)$,
- (c) $\Gamma(\theta, \phi = 17\pi/36, \delta = \pi/2, \alpha = \pi/18)$,
- (d) $\Gamma(\theta, \phi = \pi/4, \delta = 7\pi/18, \alpha = 0)$,
- (e) $\Gamma(\theta, \phi = \pi/4, \delta = 7\pi/18, \alpha = \pi/18)$,
- (f) $\Gamma(\theta, \phi = 17\pi/18, \delta = 7\pi/18, \alpha = \pi/18)$.

(2) 図5は、それぞれの図中に示したパラメータ設定において、 ϕ 、 α 、 δ の影響を調べた結果である。特定の検光子方位 θ においてGPが急激に変化しているところがあることが分かる。すなわち、高感度測定の可能性を示唆している。図6は、波長を変化させた場合に、すなわち、 δ を変化させた場合に、 $\phi=85^\circ$ において、 $\alpha=0^\circ$ と 0.1° に場合のGPの検出感度を調べた結果である。下段の図がGPの差を表しており、微小な旋光度の高感度検出の可能性が示された。この事情をさらに捕捉すると、このような条件では干渉縞の可視度が低下する。すなわち、強度測定とのトレードオフとして位相測定の精度の向上を図る光の「弱測定」となっていることが分かる。

(3) 図7は、光源を白色LEDとして、2種類の厚さの右旋性水晶製旋板の測定を実際に行った結果である。測定結果は計算値の黒の実線に良く合っていることがわかる。

(4) 図8は20の蔗糖溶液を測定した結果である。ドルーデモデルにしたがって計算された結果とよく一致している。しかしながら、検出下限は、0.2g/mlに留まっており、さらに改良が必要である。変調手段を何ら採用せずに10mmの光路帳でこのような値が出せたことで評価できると考えているが、さらに、 $\phi=85^\circ$ 、もしくは 0° 付近に設定して θ を高速変調するような手法の導入の検討が必要である。

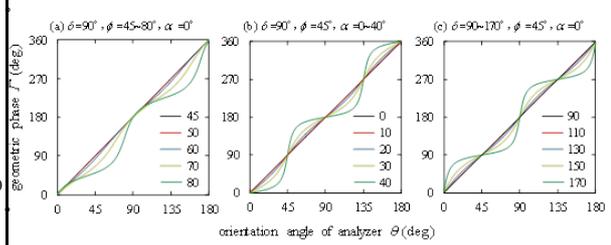


図5 (a) ϕ 、(b) α 、及び (c) δ をパラメータとして、() を計算した結果。

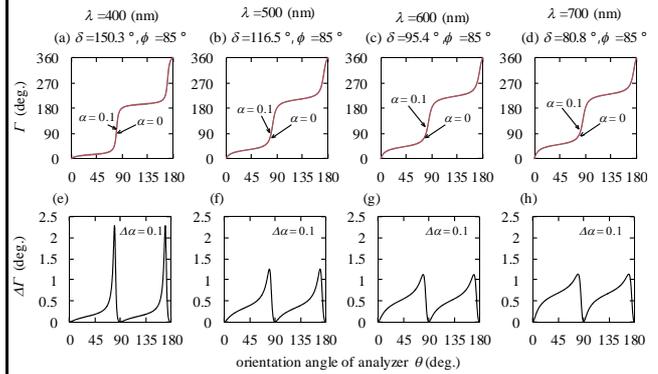


図6 上段： $\phi = 17\pi/36$ に対して $\alpha = 0^\circ$ と 0.1° の場合の () を計算した結果 (両者はオーバーラップして識別できない)。ここで、(a) $\delta = 150.3^\circ$ ($\lambda = 400\text{nm}$) (b) $\delta = 116.5^\circ$ (500nm)、(c) $\delta = 95.4^\circ$ (600nm)、(d) $\delta = 80.8^\circ$ ($\lambda = 700\text{nm}$)。下段： $\alpha = 0^\circ$ と 0.1° の場合の () の差 $\Delta\Gamma(\theta)$ のプロット、(e) ~ (h) はそれぞれ (a) ~ (d) に対応している。

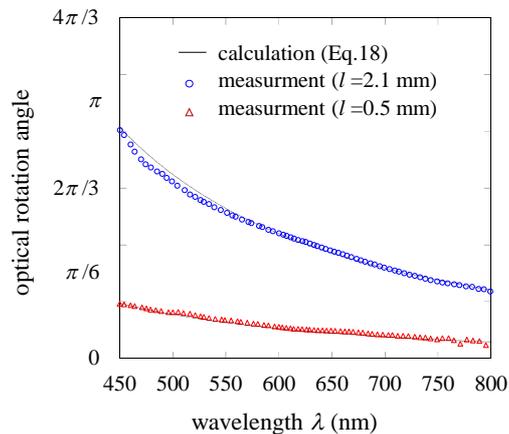


図7 厚さ $l=2.1\text{ mm}$ と 0.5 mm の右旋性水晶偏光板の $\alpha(\lambda)$ の測定結果。黒の実線は数値計算結果を示す。

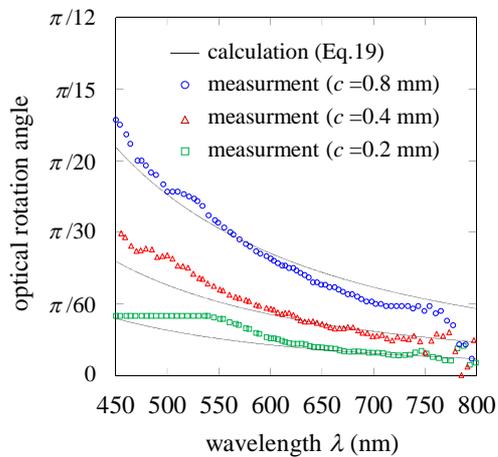


図8 0.8 g/ml, 0.4 g/ml, 0.2 g/ml の濃度の蔗糖水溶液 (20) の $\alpha(\lambda)$ の測定結果．黒の実線は数値計算結果を示す．

(5) 以上の内容とは別途に，図2に示した測定光学系で，テラヘルツ (THz) 周波数領域で GP の直接測定を行った．図9に試料の外観とネジ穴の仕様を示す．図10は，その測定結果の一例であり．上段が右ネジ構造，下段が左ネジ構造で，異なる3つの周波数での GP の測定結果を偏光子の方位角の関数としてプロットした．図中の赤線は，別途試作済の THz エリプソメータを用いてこれらの試料通過後の偏光状態 (楕円率と方位) を求め，それを基にジョーンズ行列解析法で求めた GP の値である．

以上より，両者はほぼ一致していることが分かる．周波数が増えると GP の非線形挙動が異なること，右ネジと左ネジとは逆の挙動を示すことが分かる．また，ストレート穴，右と左ネジの混合アレーの試料では，このような挙動は観測されなかった．このような簡単な構造でキラルなメタマテリアル試料が作成できることも再確認できた．

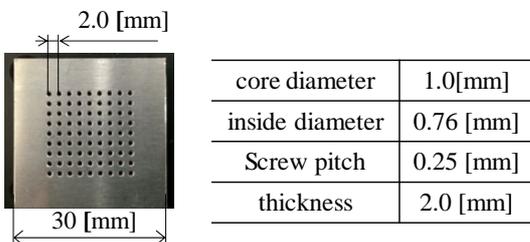


図9 右ネジ金属穴アレーの写真とその仕様．

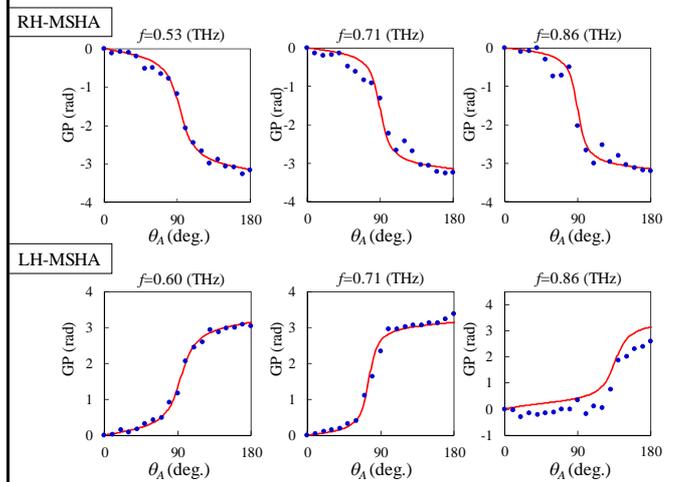


図10 RH-MSHA (上段) と LH-MSHA (下段) で得られる代表的な3つの周波数での GP の θ_A 依存性の測定結果．赤の実線は，別途に行ったエリプソメータでの測定結果から得られた値を基にして，ジョーンズ行列から算出した計算値．

<引用文献>

- [1] S. Pancharatnam, Generalized theory of interference and its applications: Part I: Coherent pencils, " Proc. Ind. Acad. Sci. A, XLIV 巻 1956, 247-251
- [2] S. Pancharatnam, Generalized theory of interference, and its applications: Part II. Partially coherent pencils, Proc. Ind. Acad. Sci. A, XLIV 巻, 1956, 398-417
- [3] M. V. Berry, Quantum phase factors accompanying adiabatic changes, " Proc. R. Soc. London, Ser. A, 392 巻, 1984, 45-47
- [4] T. Okamoto, S. Kawata, and S. Minami, A photodiode array Fourier transform spectrometer based on a birefringent interferometer, Appl. Spectroscopy, 40 巻, 1986, 691-695
- [5] M. Hashimoto and S. Kawata, Multichannel Fourier-transform infrared spectrometer, Appl. Opt., 31 巻, 1992, 6096-6101.
- [6] H. Schmitzer, S. Klein, and W. Dultz, " Nonlinearity of Pancharatnam's topological phase, " 74 巻, Phys. Rev. Lett., 1993, 1530-1533
- [7] S. Tamate, H. Kobayashi, T. Nakanishi, S. Sugiyama, and M. Kitano, Geometrical aspects of weak measurements and quantum erasers, New J. Phys., 2009, 11 巻, 093025

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)

[学会発表](計 3件)

T. Iwata, A. Sato, and T. Yasui, Direct Measurement of the Geometric Phase of Metal Screw Hole Arrays in THz-TDS, EMN Meeting on Terahertz Energy Materials Nanotechnology May 14-18, 2016 San Sebastian, Spain.

佐藤 昭洋, 水谷 康弘, 安井 武史, 岩田 哲郎, テラヘルツ周波数領域における幾何学的位相の直接測 “ , Optics & Photonics Japan 2015年10月28~30日, 筑波大学東京キャンパス(東京都文京区).

木村 誠, 水谷 康弘, 岩田 哲郎, テラヘルツ周波数領域における幾何学的位相の直接測定, Optics & Photonics Japan , 2014年11月5~7日 筑波大学東京キャンパス(東京都文京区).

6. 研究組織

(1)研究代表者

岩田 哲郎 (IWATA, Tetsuo)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス
研究部・教授

研究者番号：5 0 3 0 4 5 4 8

(2)研究分担者

水谷 康弘 (MIZUTANI, Yasuhiro)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：4 0 3 7 4 1 5 2