

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：16101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18727

研究課題名（和文）デュアル光磁場コムを用いたメタマテリアル近接場の複素透磁率分光法の開発

研究課題名（英文）Development of a spectroscopic method for the complex permeability in the near-field of metamaterials using dual optical field combs.

研究代表者

安井 武史（YASUI, Takeshi）

徳島大学・ポストLEDフォトリクス研究所・教授

研究者番号：70314408

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：デュアル光磁場コムを用いたメタマテリアル近接場の複素透磁率分光法の実現に向けて、光磁場コムと直交関係性を有するレプリカである光電場コムを用いたデュアル光電場コム分光装置を構築し、メタマテリアル評価の可能性について検討した。また、メタマテリアルの偏光分光特性を評価するために、デュアル光電場コム分光装置とジョーンズ行列偏光計を融合し、サンプルのジョーンズ行列を算出可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

メタマテリアルは、非常識な光学性能を発現する手段として期待されているが、その評価手段が十分に成熟していない。本研究成果で、メタマテリアル近接場の複素透磁率と複素誘電率の評価が可能になれば、メタマテリアルの社会実装を加速する。また、従来の光電場計測に加えて、新しい基軸『光磁場計測』を実現できれば、光電場と光磁場の相関が求まり、物性研究や新奇物質創生という観点で意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：To achieve the realization of spectroscopic analysis of the complex permeability of metamaterials in the near-field using a dual optical field comb, we constructed a dual optical field comb spectrometer employing an optical electric field comb, which is a replica with orthogonal relationship to the optical magnetic field comb. We explored the potential for metamaterial characterization using this setup. Additionally, to evaluate the polarization spectroscopic properties of metamaterials, we integrated the dual optical field comb spectrometer with a Jones matrix polarimeter, enabling the calculation of the sample's Jones matrix.

研究分野：光計測

キーワード：メタマテリアル 光コム 透磁率 デュアル光コム分光

1. 研究開始当初の背景

屈折率は、比誘電率と比透磁率の平方根の積で決まるが、自然界にある物質は光磁場と相互作用しないので(比透磁率=1)、比誘電率の平方根が屈折率と等しくなる。この自然界の常識を覆したのが『メタマテリアル』であり、物体中に金属ナノ構造を作り込み比透磁率を任意制御することにより、自然界の常識を超えて光を自由自在に操ることが可能になるので、非常識な光学性能を発現する手段として、様々な応用が期待されている。メタマテリアルの社会実装に向けて、設計・作成・評価の3段階が必要不可欠であるが、何れの段階においても「測る」手段が欠如している。この「測る」手段を補完し、メタマテリアルの社会実装を加速するためには、近接場における複素透磁率や複素誘電率を評価する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、光周波数コムの光電場成分(光電場コム)と光磁場成分(光磁場コム)に着目し、デュアル光コム分光法と融合して、複素誘電率や複素透磁率をRF帯で高精度計測することにより、革新的な近接場光電磁場分光法を実現することを最終目的とする。それに向けた基礎検討として、光電場光コムを用いたデュアル光コム分光装置(デュアル光電場コム分光装置)を構築する。更に、詳細な偏光分光解析が可能なジョーンズ行列が取得可能なデュアル光電場コム分光偏光装置を開発する。

3. 研究の方法

図1は、偏光制御パルス列(PCPS)を生成するための実験装置の概略図を示しており、x-偏光とy-偏光をそれぞれ水平(または0°)偏光と垂直(または+90°)偏光と定義している。まず、x-偏光を持つ単一の光周波数コム(OFC)パルスは、ビームスプリッタ(BS)によって透過されたOFCパルスと反射されたOFCパルスに分割される。透過OFCパルスは、第1の偏光制御パルス(第1PCP)の生成に使用される。一方、反射OFCパルスは、第2PCP生成に使用される。透過OFCパルスはx-偏光を維持する。反射OFCパルスの偏光と時間遅延は、第1PCPと異なる偏光と時間遅延($\Delta\tau$)になるように制御される。その後、これらの2つのOFCパルスは偏光ビームスプリッタ(PBS)で再結合され、1/2波長板($\lambda/2$)を通過して偏光が+45°回転させる。このようにして、第1PCP(+45°直線偏光、時間遅延=0)と第2PCP(+135°直線偏光、時間遅れ= $\Delta\tau$)から構成されるPCPSが生成される。

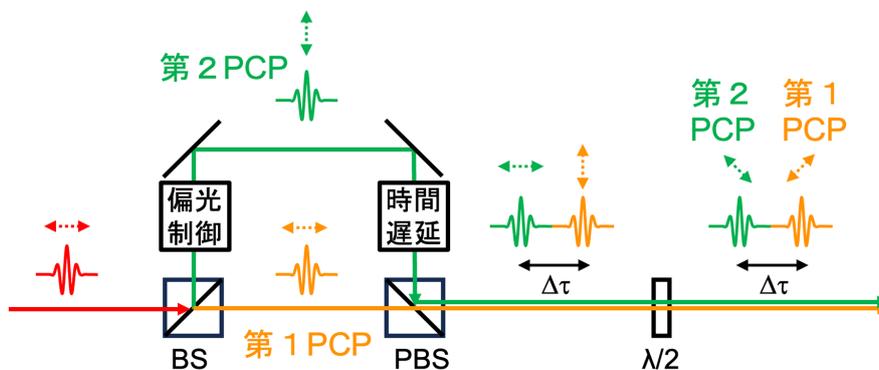


図1 偏光制御パルス列(PCPS)の生成

図2は、PCPSのデュアル光コム偏光分光(DCSP)装置の概略図を示している。上述のPCPSは試料を通過し、各パルスは試料の光学的特性を反映した偏光変化を受ける。その後、PCPSは参照パルスと多重化された後、ビームスプリッタ(BS)でローカルOFCと干渉する。生成された干渉波形(インターフェログラム)は偏光ビームスプリッタ(PBS)を使用してx-偏光成分とy-偏光成分に分割され、一対の光検出器(PD)によって検出される。その後、取得されたインターフェログラム列(第1PCP、第2PCP、参照パルス)を時間的に分離して、フーリエ変換を行うことで、x-偏光成分とy-偏光成分に関する第1PCPおよび第2PCPの光振幅スペクトルと光位相スペクトルを得る。これらのスペクトルは、試料のジョーンズ行列を得るためにジョーンズ解析に使用される。

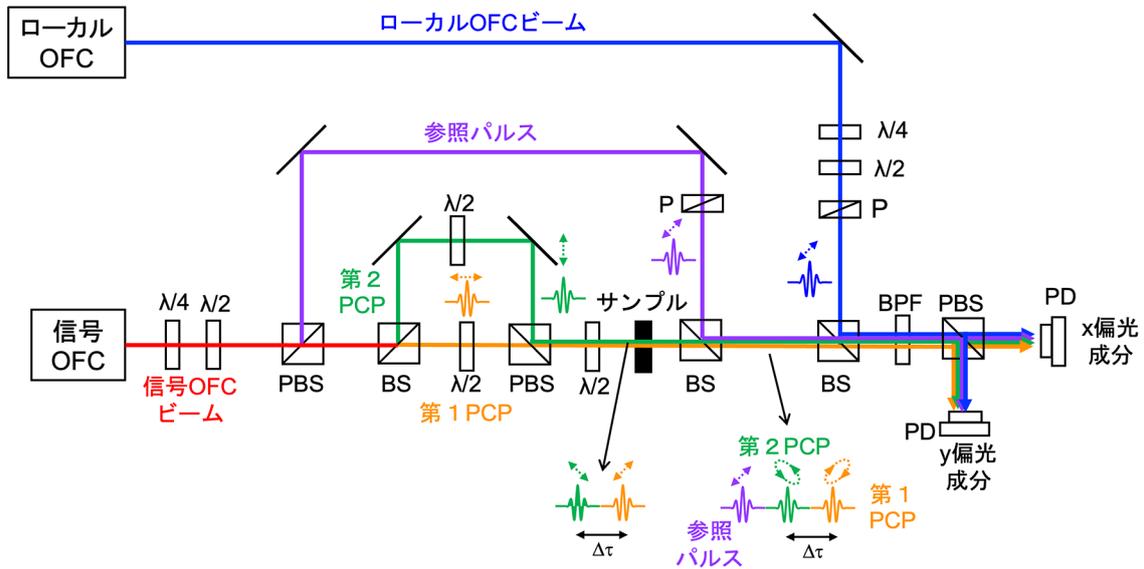


図2 PCPSのデュアル光コム偏光分光

4. 研究成果

まず、PCPSの基本的な性能を評価した。図3(a)の赤と青のプロットは、サンプルが無い状態でのx-偏光成分とy-偏光成分に関するインターフェログラム列の時間波形を示している。第1PCPと第2PCPは0.63 nsの時間遅れで観測され、第2PCPと参照パルスは0.15 nsの時間遅れで観測された。設定された偏光の有効性を検証するために、サンプル位置に偏光子を配置した。図3(b)の赤と青のプロットは、配置された偏光子の透過軸が+45°に設定されている場合のインターフェログラムのx-偏光成分とy-偏光成分を表している。予想通り、第1PCPと参照パルスが現れ、第2PCPが消えた。逆に、配置された偏光子の透過軸が+135°に設定されている場合、第2PCPと参照パルスが現れ、第1PCPが消えた(図3(c)参照)。このようにして、第1PCP、第2PCP、および参照パルスの偏光の有効性を確認した。

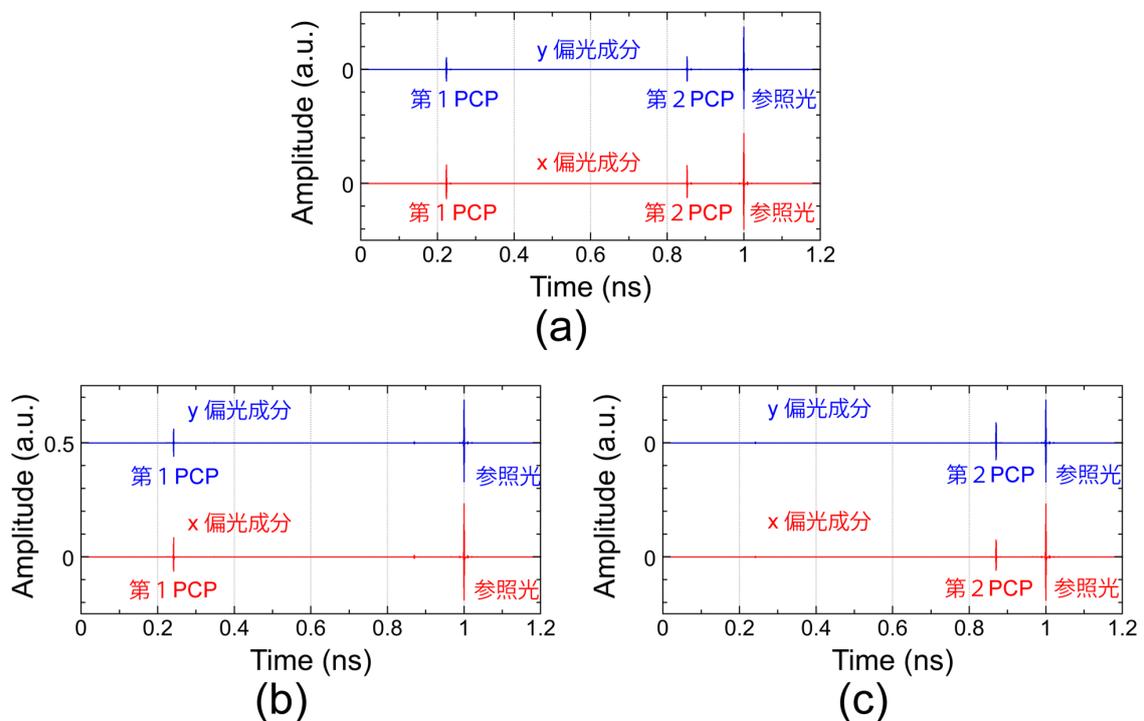


図3 PCPSの基本特性

次に、JM-DCSPの有効性を示すために、既知の偏光特性を持つ偏光光学素子を測定した。既知の複屈折を持つ第一のサンプルとして、ゼロオーダー1/4波長板を使用した。図4の黒いプロットは、1/4波長板の進相軸がy-偏光または+90°と平行に設定されている場合の各ジョーンズ行列成分の光学スペクトルを示している。J_{00r}とJ_{11i}だけが非ゼロ値であり、他の要素はゼロであった。この結果は、複屈折材料のジョーンズ行列をよく反映している。比較のために、図4の赤い

プロットは、各ジョーンズ行列成分の対応する理論スペクトルを示している。これらの比較から、実験結果が各ジョーンズ行列成分の理論値と良好な一致を示していることを確認した。

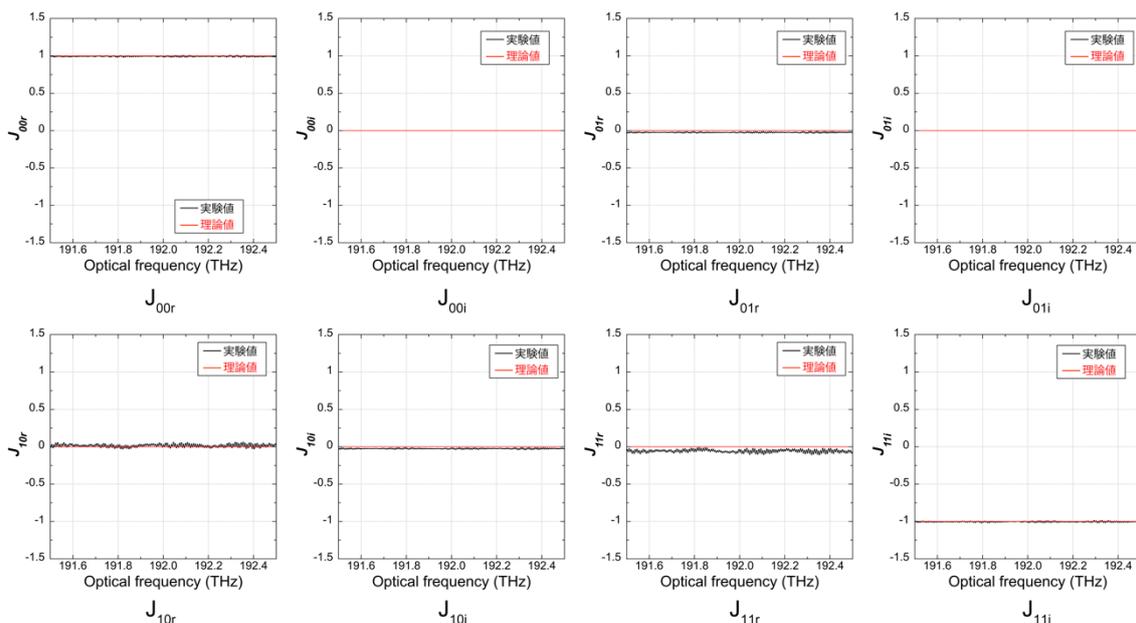


図4 1/4 波長板のジョーンズ行列スペクトル

次に、光学活性材料のサンプルとして、ファラデーローテーター（回転角= $45 \pm 3^\circ$ ）のジョーンズ行列を測定した。JM-DCSP の入射光に $+45^\circ$ の直線偏光を持つ第1PCPと、 $+135^\circ$ の直線偏光を持つ第2PCPを使用すると、ファラデーローテーターを通過した後の第1および第2のPCPはy-偏光とx-偏光を持つ。この状況はDCSPのデッドゾーンに対応している。これを回避するために、第1PCPと第2PCPの偏光角をそれぞれ $+32^\circ$ と $+122^\circ$ に変更した。図5は、各ジョーンズ行列成分の一連の光学スペクトルに関する実験データ（黒いプロット）と理論値（赤いプロット）を比較している。図4の1/4波長板とは異なるジョーンズ行列が確認された。実験データと理論値は、再び良好な一致を示した。さらに、ファラデーローテーターを $+60^\circ$ 回転させた場合、光学回転の角度依存性がないため、各ジョーンズ行列成分の光学スペクトルは変化しなかった。

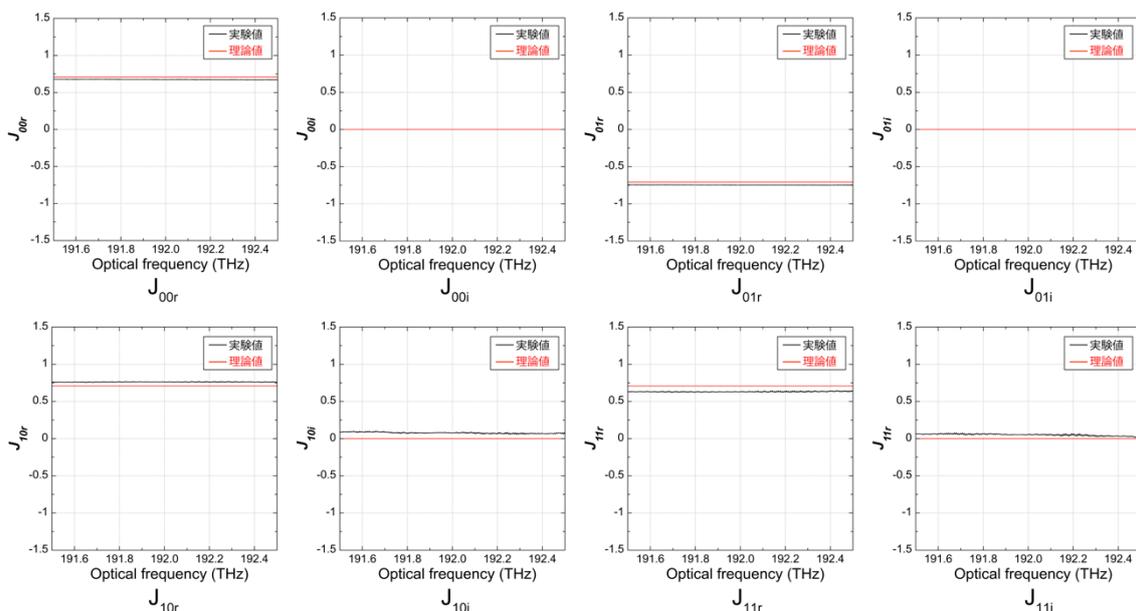


図5 ファラデーローテーターのジョーンズ行列スペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 H. Kitahama, H. Koresawa, E. Hase, Y. Tokizane, T. Minamikawa, and T. Yasui
2. 発表標題 Measurement of Jones-matrix using dual-comb spectroscopic polarimetry
3. 学会等名 OPT02024, Photonics West 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 H. Koresawa, H. Kitahama, E. Hase, Y. Tokizane, A. Asahara, T. Minamikawa, K. Minoshima, and T. Yasui
2. 発表標題 Jones-Matrix Dual-Comb Spectroscopic Polarimetry
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 北濱 弘暉、是澤 秀紀、長谷 栄治、浅原 彰文、南川 丈夫、安井 武史
2. 発表標題 デュアル光コム分光偏光計による偏光素子の計測
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Koresawa, E. Hase, Y. Tokizane, T. Minamikawa, and T. Yasui
2. 発表標題 Combination of dual-comb spectroscopy with Jones-matrix polarimetry
3. 学会等名 15th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Miyamura, R. Oe, T. Kajisa, Y. Tokizane, T. Minamikawa, S. Taue, and T. Yasui
2. 発表標題 Active-dummy compensation of temperature drift in refractive-index-sensing optical comb by use of mechanically-sharing dual-comb configuration
3. 学会等名 15th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Nakajima, T. Yumoto, S. Matsubara, Y. Tokizane, and T. Yasui
2. 発表標題 A compact dual-Ccomb fiber laser based on a mechanical sharing cavity configuration
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北濱 弘暉, 是澤 秀紀, 長谷 栄治, 南川 丈夫, 安井 武史
2. 発表標題 偏光制御パルス列のデュアル光コム分光を用いたジョーンズ行列測定
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 分光偏光特性測定装置及び分光偏光特性測定方法	発明者 安井 武史, 南川 丈夫、是澤 秀紀	権利者 徳島大学
産業財産権の種類、番号 特許、特許出願2021-027937	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

徳島大学ポストLEDフォトンクス研究所 安井/南川研究室WEB
<https://femto.me.tokushima-u.ac.jp>
 徳島大学ポストLEDフォトンクス研究所 安井/南川研究室YouTube
www.youtube.com/@takeshiyasui2792

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	田中 拓男 (TANAKA Takuo) (40283733)	国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・主任研究員 (82401)	
研究分担者	岡本 敏弘 (OKAMOTO Toshihiro) (60274263)	徳島大学・ポストLEDフォトンクス研究所・准教授 (16101)	
研究分担者	南川 丈夫 (MINAMIKAWA Takeo) (10637193)	大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授 (16101)	
研究分担者	浅原 彰文 (ASAHARA Aki fumi) (00770091)	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授 (12612)	

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