

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料 〔令和5（2023）年度 中間評価用〕

令和5年3月31日現在

研究期間：2021～2025
課題番号：21H05014
研究課題名：光応答関数の直接取得に立脚する分光原理が拓く材料評価技術
研究代表者氏名（ローマ字）：美濃島 薫（MINOSHIMA Kaoru）
所属研究機関・部局・職：電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授
研究者番号：20358112

研究の概要：

多様な物質・材料・デバイスの特性を、直接、高速・高精度・広範囲・マルチモーダルに取得できる分光技術を創出する。光波の高精度かつ自在な制御・操作技術を導入し、光伝搬そのものから『光に刻み込まれた情報を取り出す』という発想に基づき、物質情報を直接取り出す革新的分光技術原理を実現し、「物質・材料における血液検査」のようなファーストステップ評価技術となる包括的な学理の確立をめざす。

研究分野：光量子物理

キーワード：光周波数コム、デュアルコム分光、分光特性評価、光位相制御、時間空間特性

1．研究開始当初の背景

近年、様々な新しい特性を持つ物質・材料が生まれてきている。これらの中には、省エネルギーデバイスや高機能メモリなどの革新的機能を生むものもあり、その特性を詳細に知ることは、基礎科学としての興味のみならず、利用の上でも重要である。しかし、中には特性が空間的な秩序構造依存を持つものや、動的に変化するものなど、非一様で非定期的な場合もあり、単機能な手法や単純なモデルでは詳細な評価は難しい。一方、既存評価技術においては、特性ごとに手法が特化していることが一般的であり、装置および試料をその都度構成し直すことが必要で、複数の評価特性間の同時性・整合性を担保することが難しい。加えて、時間・空間特性や外場応答などを高分解能かつ広範囲に評価するのは困難である。そのため、物質の特性を直接的かつ包括的に理解するための、新たな計測・分析手法の構築が望まれている。

2．研究の目的

本研究では、このような従来技術の課題を解決するために、分光の基本原理に立ち返り、光電場の応答を完全解析することで、光伝搬そのものから『光に刻み込まれた情報を取り出す』という発想に基づき、多様な物質・材料・デバイス特性を直接解明する手法を開発する。特に、高速・高精度・広範囲・マルチモーダルに包括的な特性を取得できる分光技術を創出することで、多彩な対象に応用できる適用性の広い評価手法の学理確立をめざす(図1)。

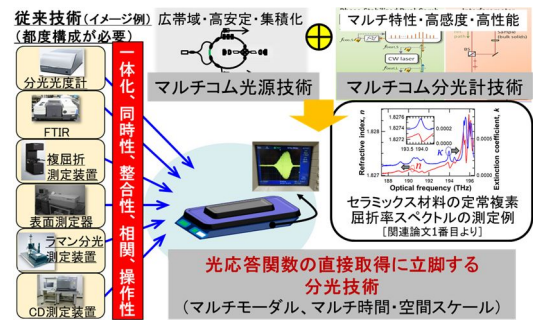


図1．本研究の目指す分光技術のイメージ

3．研究の方法

本研究では、以上の目的を達成するため、近年進展の著しい光波の高精度かつ自在な制御・操作技術を導入し、光パルスの電場波形を完全解析することによって、その入出力応答として物性情報を得る手法を開発する。そのために、精密な櫛状スペクトルを有し、同時に、時間的には制御された超短パルス列である先端光源、光コム(コムは「櫛」の意味)を用いる。特に、わずかに繰り返し周波数(櫛の歯間隔)の異なる複数の光コムを用いたマルチコム分光によって、数100 THzの高周波領域の光パルス電場波形をマルチヘテロダイン検出によって直接取得する独自技術『分光ネットワークアナライザ』技術を開発する。具体的には、実用的な光コム光源を広範な波長領域で実現するとともに、光コムの制御によって複数の超短パルス列間の相互コヒーレンスを精密かつ動的に制御・操作する技術を開発し、広帯域・高速・高感度な高機能分光手法を実現する。さらに、この分光技術の新原理を物質特性評価技術に適用することによって、マルチ特性・機能の同時評価とともに、超高速応答から長時間変動、マイクロからマクロ特性のマルチ時間・空間スケール特性という『3つのマルチ』を兼ね備えた評価技術を開発する。実用光源と分光計の融合システム基礎技術を開発し、包括的な分光計測手法の基盤学理を確立する。

4. これまでの成果

本研究では、以下の3つの項目の研究を行った。

(a) 広帯域マルチコム光源の開発：実用的な一体型共振器によるデュアルコムレーザーを近赤外域で構築し、光のフロンティア領域と呼ばれる中赤外領域と、多彩な試料の分光に必要な可視光領域へのコヒーレントな非線形波長拡大を実現した。さらに、一体型共振器によるトライコム光源の開発にも成功した。

(b) 分光特性制御による高感度分光技術の開発：光コムの位相制御性を活用した光パルスの電場波形の操作・検出手法を開発した。これにより動的な信号波形変調による変調分光法に基づく、デュアルコム分光に適した高感度測定手法を実現し、通常の単純積算では困難な長期不安定性の除去への有効性を示した。

(c) マルチ分光技術の開発：光コムの特徴を生かしたマルチ分光技術の基礎を示した。まず、マルチ機能化においては、固体材料に外場を印加して電気光学効果と逆圧電効果の同時分離測定を行い、物性値同士の高い相関評価が可能なことを示した。また、開発した広帯域光源による中赤外域・可視域の固体分光測定や、高速円偏光変調分光の有効性を示した。次に、開発した一体型共振器によるトライコムレーザーを用い、実際に分光ガスセルのトライコム分光を行った。その結果、複数の分光情報を高速かつ同時に読み出すことに成功し、マルチ時間軸化に向けた自在な分光情報取得が可能なことを示した。さらに、空間特性に敏感な物性情報の取得に向けた基礎技術として、時空間情報取得法や2次元分光手法の開発を行った。また、空間構造に敏感な物性測定への適用の第一歩としてメタ材料を採用してデュアルコム分光による評価法を開発した。試料を共同研究によって作成し、近赤外域の共鳴構造を反映した複素屈折率スペクトルの直接分離測定に成功して本手法が空間依存特性情報の詳細研究に有効なことを示した(図2)。

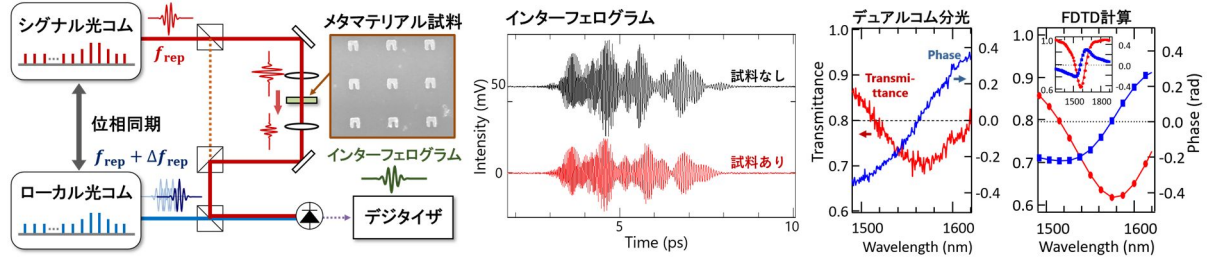


図2. 近赤外域メタ材料の構造敏感デュアルコム分光。複素屈折率スペクトルの実験と計算結果

5. 今後の計画

引き続き、各研究項目を実施すると同時に、それらの融合と統合を図り、本研究の分光技術の特徴を生かした応用に適した試料を探索しながら、技術の有効性を示していく。

(a) 広帯域マルチコム光源の開発：開発した中赤外域、および可視域光源において、さらなる高度化を行うと同時に、一体型トライコム共振器においても、高コヒーレントな広帯域化を進め、技術を確立する。

(b) 分光特性制御による高感度分光技術の開発：光コム光源のコヒーレント制御法の分光応用を進め、変調分光の適用性を拡大するとともに、動的な分光制御技術に発展させて高感度センシング原理を示す。

(c) マルチ分光技術の開発：引き続き、技術要素の開発を続けるとともに、適した試料の探索を行い、開発した光源と分光特性制御技術の成果を融合させて手法の有効性を示す。まず、広帯域な分光情報を活かした相関測定の有効性を示すとともに、光コムの位相制御による変調分光を円2色性スペクトル測定に展開する。次に、一体型トライコム過渡分光計を開発し、超高速と長時間変動の相関測定などの実証を行う。さらに、空間特性に敏感な試料特性の測定手法を高度化するとともに、試料の特性測定を系統的に行う。以上により、本研究の分光技術の有効性を検証して包括的な知見を得る。

最後に、本研究の進捗と、マイクロコムをはじめとする光源技術の研究動向を見据え、マルチコム光源と分光技術の融合に向けた主要要素を検証し、実用分光計基礎技術に関する知見を明らかにする。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

- [1] A. Asahara, S. Akiyama, K. Minoshima, Dual-comb spectroscopy for in-plane angle measurement using OAM vortex light, Opt. Express 31 (2023) 11695-11704.
- [2] H. Tian, R. Li, T. Endo, T. Kato, A. Asahara, L.A. Sterczewski, K. Minoshima, Dual-comb spectroscopy using free-running mechanical sharing dual-comb fiber lasers, Applied Physics Letters 121 (2022) 211104.
- [3] H. Tian, R. Li, L.A. Sterczewski, T. Kato, A. Asahara, K. Minoshima, Quasi-real-time dual-comb spectroscopy with 750-MHz Yb: fiber combs, Opt. Express 30 (2022) 28427-28437.
- [4] T. Kato, M. Uchida, Y. Tanaka, K. Minoshima, One-shot three-dimensional imaging using a two-dimensional spectrometer with a fiber bundle, Opt. Express 29 (2021) 43778-43792.
- [5] Y. Nakajima, Y. Kusumi, K. Minoshima, Mechanical sharing dual-comb fiber laser based on an all-polarization-maintaining cavity configuration, Optics Letters 46 (2021) 5401-5404.

7. ホームページ等

<http://www.femto-comb.es.uec.ac.jp/>