

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：82502

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K19015

研究課題名（和文）フーリエ変換分光による超高速時間・周波数分解イメージング法の開発

研究課題名（英文）Ultrafast time- and frequency-resolved imaging based on FT spectroscopy

研究代表者

板倉 隆二（Itakura, Ryuji）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光量子科学研究所 量子応用光学研究部・上席研究員

研究者番号：80334241

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）：本研究は、実時間と実空間を分離せずにダイナミクスを可視化する新しい計測法の構築を目指した。そのため、フーリエ変換（FT）分光を利用した、時間・周波数分解イメージング装置を構築した。観測点からの信号光を干渉計に入射し、2つのレンズを用いた光学系により観測点の像を検出用カメラの入射面に転送した。干渉計の遅延時間を掃引し、カメラの各ピクセルの信号強度の時間変化を測定し、フーリエ変換により位置毎のスペクトルを取得することが可能となった。最初の実証対象として、水中におけるレーザーフィラメントの時間変化の観測を目指し、フィラメントの横から投影したシャドウグラフを測定する装置を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

様々な動的な現象の実空間の動画撮影が多くのケースで利用されているが、主にマクロな視点で超高速現象を理解することに繋がっている。一方、分光計測はミクロスコピックな視点、すなわち量子レベルの物理を解き明かすことのできる実験手法である。画像計測と分光計測を同時に行うことができれば、マクロとミクロを繋ぐマルチスケールの観測が可能となり、学術的意義は高い。また、極短パルスレーザーによる時間領域の干渉計測は、観測法に時間分解の機能も追加することも可能であり、時間分解マルチスケールダイナミクス計測が実現し、ビッグデータ解析と組み合わせた新しい研究手法の展開が期待される。

研究成果の概要（英文）：To develop a method to visualize time-space coupled profiles, we constructed a time- and space-resolved imaging apparatus based on Fourier-transform spectroscopy. Signal light from an object was guided into an interferometer. An image at the object was transferred on a detection plane of a camera with two lenses. By scanning the temporal delay of the interferometer, the interferogram measurement in the time domain at each pixel has been available. Through Fourier transform, the spectrum in the frequency domain can be obtained at each pixel. We constructed a measurement system for imaging a shadowgraph from a side view to monitor the temporal variation of a laser filament in water.

研究分野：物理化学、超高速計測

キーワード：時間・周波数分解イメージング フーリエ変換分光 マルチスケールダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

極短パルスレーザー照射により生成する固体表面上のレーザープラズマや水中のレーザーフィラメントにより生成する水和電子・自由電子および OH ラジカルなどの励起ダイナミクスはマイクロな時間発展だけでなく、膨張や拡散などマクロな空間発展も重要である。そのように不均一に進行する反応を解明するには、マイクロとマクロを繋ぐ新しい観測法が必要とされている。

極短パルスレーザーのパルス幅は光周期の数サイクルにまで短くなり、様々な超高速現象の実時間計測が精力的に行われている。数サイクルパルスの周波数帯域は赤外から紫外まで 1 オクターブにわたり広がっており、物質の様々な状態(電子励起、振動励起、プラズマ)を同時にプローブするための分光光源としても有用である。実空間のイメージングについても、時間分解と空間分解を組み合わせた実験手法の開発は盛んに行われているが、分光計測を同時に行うことが困難なため、スペクトル応答は一定であると仮定することが多い。特に、回折格子を用いた分光計測において 2 次元検出器を用いたとしても、1 次元は波長(周波数)軸に利用するため、空間情報は 1 次元の情報に限定されてしまうという問題を抱えていた。実際に、我々がやってきたレーザー誘起プラズマからの時間分解反射分光測定において、分光器出射口に現れる反射光の 2 次元画像を解析し、励起表面の時間分解空間特性を見出し、アブレーションの時空間モニターとして有望な実験手法であることを示したが、観測できた空間情報は 2 次元分布を 1 次元に落とし込んだものになってしまっていた。

2. 研究の目的

本研究は、本来 2 次元の空間情報を 1 次元に落とし込まれることなく、周波数分解、さらには時間分解を行うための新しいイメージング法を確立することを目的とする。これまで分離して考察していた量子ダイナミクス(マイクロ)と空間ダイナミクス(マクロ)の事象を分離せずにマルチスケールのダイナミクスとして一括して調べるといったパラダイムシフトを引き起こすことを目指した挑戦である。

3. 研究の方法

本研究の肝は、回折格子を用いて波長を空間的に分散させて分光観測する代わりに、2 次元空間情報は維持したまま、フーリエ変換(FT)分光によって各空間地点における周波数領域のスペクトルを得ることにある。装置およびデータ解析の概略を図 1 に示す。

広帯域のスペクトル計測のため、プローブパルスはチタン・サファイアレーザーの出力(パルス幅: 50 fs)の一部をサファイア基板に集光することによって白色化したパルスを用いた。

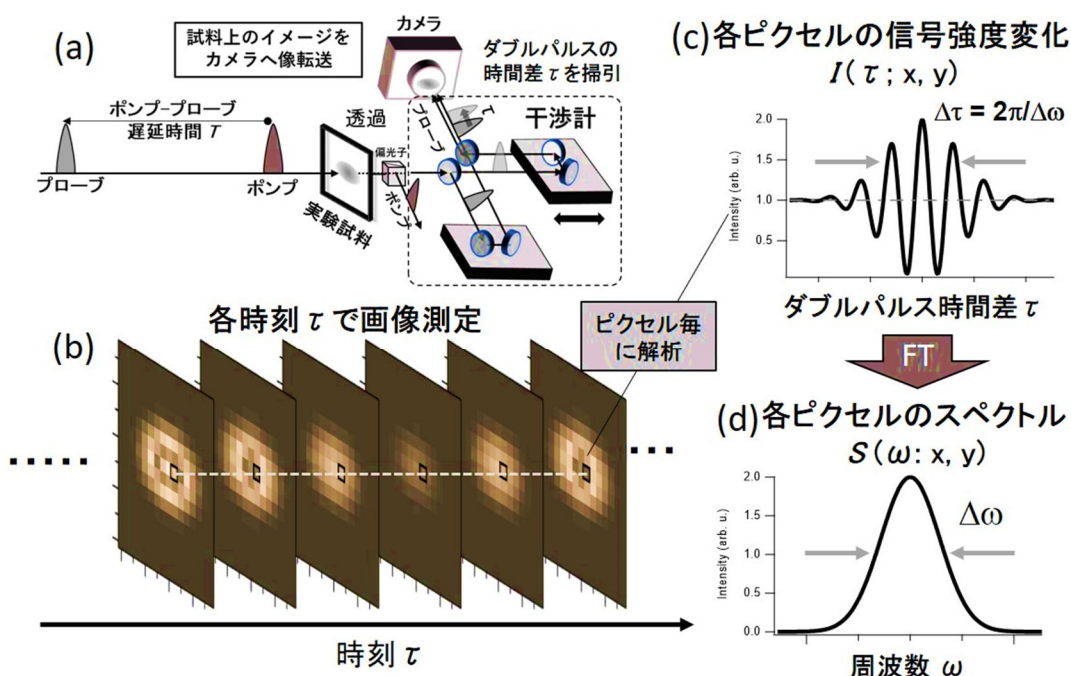


図 1.(a) 時間・周波数分解画像計測装置の概要。(b) ポンプ-プローブ遅延時間 T においてプローブパルスの干渉計の時間差 τ を掃引し、測定される連続画像。(c) 画像上の各ピクセルにおける信号強度の時間変化 $I(\tau, x, y)$ 。(d) フーリエ変換による周波数領域のスペクトル $S(\omega, x, y)$ 。

4. 研究成果

研究の方法に記載した装置の設計にしたがって光学系を配置し、干渉計のアライメントを行い、検出用カメラにて、プローブビームの空間干渉が一様に現れることが確認できた。ただし、ビームポインティングのふらつきが無視できず、干渉計の 2 つのアームから出てくるビームの重なりによりズレが生じてしまうことが分かった。そこで、それを克服するため、観測点の像を検出器カメラに像転送する拡大光学系を構築した。観測点から出射されたビームをマイケルソン干渉計に通した後、2 枚のレンズを用いてカメラに像転送を行うことによって、2 本のビームのズレを抑えることができ、カメラの各ピクセルにて FT 分光が可能となった。

初代のシステムとしてはマイケルソン干渉計を採用し、像転送系によりふらつきを大分抑制したが、ビームスプリッターで分割し、異なる経路を通るという構造上、空間的にも時間的にもある程度のふらつきが生じてしまうのは避けられない面もある。そこで、複屈折率を持つ材料を用いて、直交する 2 つの直線偏光の間に遅延を付ける TWINS 干渉計の導入を進めた。この方法は、2 つのパルスが同一光路を通過し、像転送のための距離も短くできるため、初代のマイケルソン干渉計のシステムに比べて、安定な干渉計測 (FT 分光) が可能であることを確認している。

実際の観測対象として、水中にチタン・サファイアレーザーを集光することによってできるレーザーフィラメントを生成した。レーザーフィラメントの進行方向と直交した方向からプローブパルス照射しフィラメントのシャドウグラフを測定した。FT 分光イメージングを行う予備実験として、チタン・サファイアレーザーの基本波、2 倍波、3 倍波の 3 色でフィラメントのシャドウグラフを測定した。近赤外の基本波はフィラメントがチャネリングした光跡を映すことができるが、紫外波長域の 2 倍波、3 倍波の場合は、集光点の高密度プラズマのみが映り、フィラメント中のキャリア密度を反映したいイメージが撮影できることがわかった。この測定は、離散的な 3 つの波長に限定した結果であり、広帯域パルスによる FT イメージングを実施することにより、さらに詳細な時空間分布が明らかになると期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Akamatsu Ken, Endo Tomoyuki, Akagi Hiroshi, Kono Hirohiko, Itakura Ryuji
2. 発表標題 Size distribution of DNA fragmented by a femtosecond near-infrared laser filament in water
3. 学会等名 The 12th Asia-Pacific Laser Symposium (APLS 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------