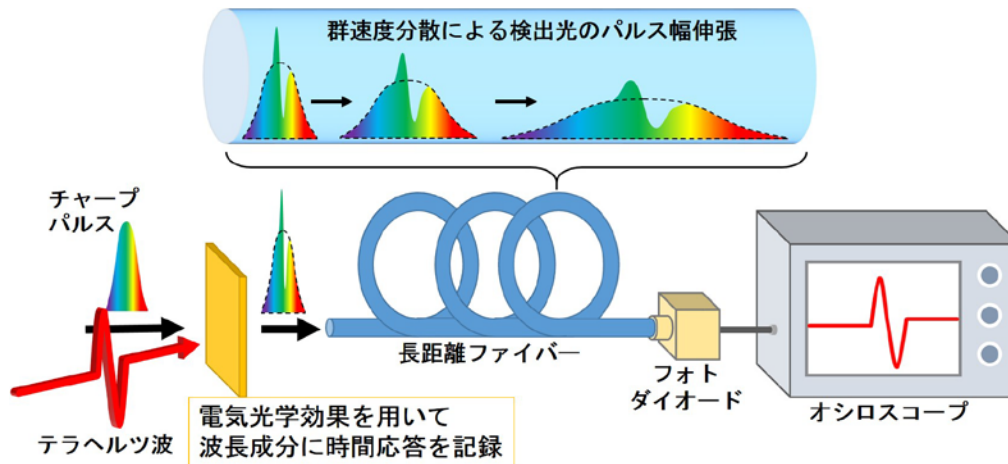


物質の超高速応答やテラヘルツ波の波形を 高速に測定する手法を開発

～テラヘルツオシロスコープの実現に向けて～

横浜国立大学大学院工学研究院の片山郁文准教授、小林真隆（博士前期課程）、ブリガムヤング大学の Jeremy A. Johnson 教授らの研究グループは、ファイバーを用いた時間領域伸長法^[注 1]を、100 フェムト秒を切る超短時間分解能の超高速分光法^[注 2]と組み合わせることにより、物質の超高速応答やテラヘルツ電場波形を高速に検出することに成功しました。この手法では検出光を波長ごとに異なるタイミングで照射することで、時間の情報を波長にマッピングします。更に長距離ファイバーを用いて検出光を大きく伸長することで、ギガヘルツ帯のオシロスコープを用いて 100 フェムト秒^[注 3]、テラヘルツ帯^[注 4]の情報をリアルタイムで読み出せることを示したものです。この成果は、従来の超高速分光法・テラヘルツ分光法を大幅に向上させるものであり、次世代の光エレクトロニクスの進展に大きく貢献するものです。

本研究成果は、2016 年 11 月 23 日（現地時間）にネイチャー系科学雑誌「Scientific Reports」の on-line 版に掲載されました。なお、本研究は、文部科学省科学研究費補助金（課題番号 15K13378, 16H04001）、日本学術振興会二国間交流事業および総務省の SCOPE（#145003103）の補助を一部受けて行われました。



<発表雑誌>

【掲載誌】 Scientific Reports

【題名】 High-Acquisition-Rate Single-Shot Pump-Probe Measurements Using Time-Stretching Method

（時間領域伸長法を用いた高繰り返しシングルショットポンププローブ測定）

【著者名】 小林真隆, 南 康夫, C. L. Johnson, P. D. Salmans, N. R. Ellsworth, 武田 淳, J. A. Johnson, 片山郁文

本件に関するお問い合わせ先

横浜国立大学 大学院工学研究院 准教授 片山郁文

TEL: 045-339-3695 E-mail : katayama-ikufumi-bm@ynu.ac.jp

物質の超高速応答やテラヘルツ波の波形を 高速に測定する手法を開発

～テラヘルツオシロスコープの実現に向けて～

【研究の背景】

近年、サブピコ秒（100 フェムト秒）、テラヘルツ領域で起こる現象を可視化する超高速・テラヘルツ分光法が、基礎科学及び応用の両面から注目を集めています。これらの分光法では、フェムト秒の超短パルスレーザーをポンプ光とプローブ光に分け、ポンプ光によって誘起された光励起状態や発生したテラヘルツ波のダイナミクスを、プローブ光によって検出しています。このため、ダイナミクスに関する情報を得ようとする、プローブ光を照射するタイミングを変化させながら多数回測定する必要があります。したがって、これらの分光法を一回限りの不可逆な現象や時々刻々変化する現象、高速で波形をモニターする必要のある応用等に適用することは困難でした。

このような背景から、単一のレーザーパルスを用いて時間領域のダイナミクスを測定する手法が数多く提案されてきました。これらの手法では超高速ダイナミクスの時間情報を波長、空間、角度など別の自由度にマッピングすることで、単一パルスによるダイナミクス検出を実現しています。しかしながら、これまでに提案されたいずれの手法も、最終的には CCD カメラや CMOS カメラ等、二次元の検出器を用いて情報を読み出すために、測定速度がカメラの性能で律速されるという問題がありました。

【研究内容と成果】

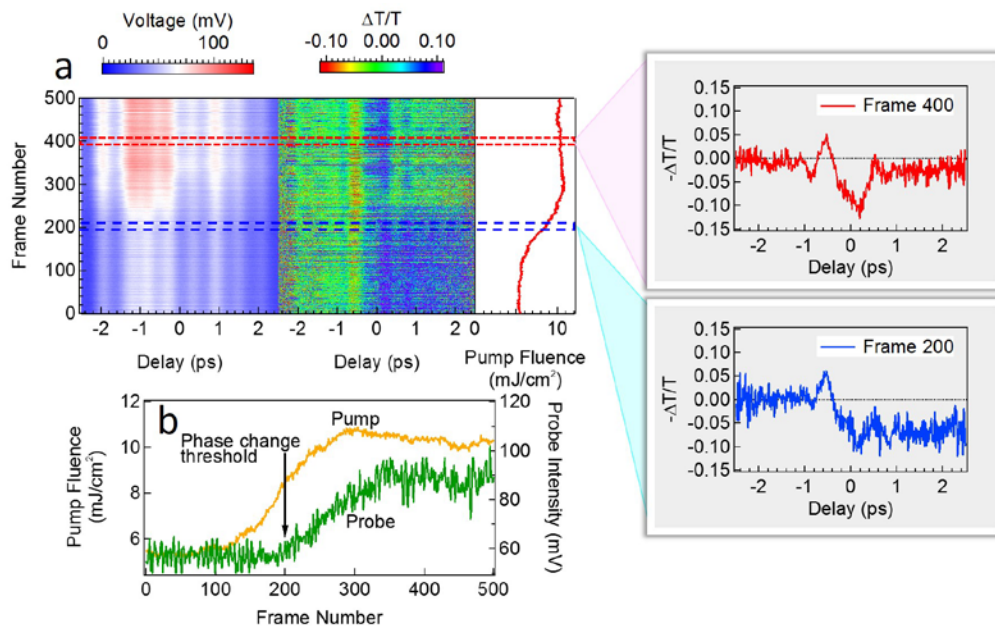
このような問題を解決するために、本研究では、長距離ファイバーを用いた時間領域伸長法と、チャープパルスを用いたシングルショット分光法とを組み合わせることによって、単一のフォトダイオードとオシロスコープでシングルショットの超高速波形を検出することに成功しました。この方法ではまず、ガラスロッドを透過する速度が波長ごとに異なる群速度分散^[注5]を用いて、レーザーパルスのパルス幅を 4 ps 程度に伸長し、試料に照射します。すると、ポンプ光、もしくはテラヘルツ光による超高速変調がプローブ光のスペクトルに書き込まれます。これを読み出すためにさらに長距離ファイバーにプローブ光を通すことで、同様の群速度分散を利用してパルス幅をナノ秒オーダーにまで伸長し、そのスペクトルを時間領域の信号として読み出します。測定はフォトダイオードとオシロスコープで行うので高速化が可能であり、kHz の読み出し速度を容易に実現できます。

本研究では、この手法を、非線型光学媒質の非線型係数評価、DVD 等に用いられる相変化材料の超高速相変化ダイナミクス測定、テラヘルツ電場検出の三つの実験によって実証しました。非線型係数評価では、ポンプ光の強度を高速で変化させることで、1 秒程度で信号のポンプ光強度依存性を測定できることを示し、相変化ダイナミクス測定では、実際に不可逆的で一回限りの現象を高繰り返しでモニターできることを明らかにしました。また、テラヘルツ電場波形の測定では、適切な波長、及びパルス幅のレーザーを利用することで、電場波形を高精度で測定できることを示しました。

【今後の展開】

本研究成果、シングルショットかつ高繰り返しの高速度応答の計測は、テラヘルツ、ピコ秒領域の時間情報を、ギガヘルツ、ナノ秒領域の信号に変換する新たな方向性を示したものです。したがって、現在では非常に高価で帯域も限られるテラヘルツ領域のオシロスコープを、安価かつ広帯域で実現できる可能性があります。また、高繰り返しで時間情報を読み出すことで、不可逆的な現象のダイナミクス測定に用いることができるだけでなく、イメージングをはじめとする多数回測定を必要とする応用に対して測定時間短縮のブレークスルーをもたらすものと期待されます。

【参考図】



(a) 相変化材料 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ における光誘起相変化の瞬間をとらえたイメージ。左のカラープロットは試料を透過したパルスのスペクトルに対応しており、右は各々のタイミングで透過率変化を測定したイメージを示している。縦軸はフレーム数を表しており、右端のグラフのようにポンプ強度を変化させたときに、対応するタイミングでプローブ・ダイナミクスの測定を行ったことを示している。相変化前後の典型的な過渡透過率波形を右に示した。(b) ポンプ光強度とプローブ光強度の時間依存性。200 フレーム近傍で、透過率が変化を始めることから、この励起強度で、相変化が始まっていることを示す。

【用語説明】

- 注 1 : **時間領域伸長法** : ファイバー中の光は波長ごとに異なる速度を持つため、長距離ファイバーに超短パルスを透過させると各波長成分が出射端に異なる時間に到達する。これを利用してパルス光源のスペクトルを得る方法を時間領域伸長法と呼ぶ。
- 注 2 : **超高速分光法** : フェムト秒、ピコ秒オーダーのパルスレーザーを用いて物質を励起し、物質の超高速応答を測定する分光手法。
- 注 3 : **フェムト秒** : 1 フェムト秒 = 1×10^{-15} 秒。
- 注 4 : **テラヘルツ** : 1 THz = 10^{12} Hz。エレクトロニクスと光の周波数の狭間にあり、近年イメージングや物性・信号制御などの応用が盛んに研究されている。
- 注 5 : **群速度分散** : 波長ごとに異なる群速度を持つことをいう。群速度は屈折率によって決まるので、屈折率が波長に依存する場合に群速度分散を有することになる。