

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：63903

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26600120

研究課題名(和文)自己参照による光電場の直接測定

研究課題名(英文)Self-referenced waveform measurement of light field

研究代表者

藤 貴夫 (Fuji, Takao)

分子科学研究所・分子制御レーザー開発研究センター・准教授

研究者番号：20313207

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：光電場の振動は、1周期で1-2フェムト秒(fs)程度であり、それよりもはるかに短い光パルスを参照光として使わなければ、その振動を実時間で直接的に測定することは不可能に思える。本研究では、周波数分解光ゲート法と電気光学サンプリング法を組み合わせることで、光電場を自己参照によって実験的に測定することに成功した。自己参照によって、光電場の計測を行ったはじめての実験である。

研究成果の概要(英文)：Nowadays Light is used as indispensable tools for the studies in various scientific fields. On the other hand, the detection of the light wave is still very difficult since the oscillation period of the wave is extremely short, femtosecond time scale. It has been believed that the femtosecond field oscillation of light can only be detected by using attosecond pulses. In this project, we have succeeded in self-referenced measurement of light waves. It is significant breakthrough that the light wave measurement can be done by the light to be analyzed.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：超短光パルス キャリア・エンベロープ位相 高性能レーザー

1. 研究開始当初の背景

光電場の振動は、1周期で1-2fs程度であり、十年ほど前までは、直接計測することは夢のような話であった。しかし、2002年にアト秒パルス発生が現実のものとなり、2004年には、そのアト秒パルスを参照光として使うことによって、光電場を直接計測することが可能となった [Science **305** 1267 (2004)]。この手法は、アト秒ストリーク法と呼ばれており、発表されてから、十年ほどになる。しかし、その後、光電場計測がさかんに行われるようにはならなかった。この手法がなかなか普及しない原因は、アト秒パルス発生が非常に難しいということだと考えられる。アト秒パルスを発生させるためには、位相の安定したパルス幅4-5fsの高強度パルスを用いて、高次高調波発生を行い、発生した極端紫外光のスペクトルの一部分を切り出すことが必要である。この技術はかなり難易度が高く、光電場測定は、まだごく少数の研究グループで行われているにすぎない。

ところが、最近、本研究の申請者は、従来まったく無関係と考えられていた2つのパルス計測手法である周波数分解光ゲート法(FROG)[Opt. Lett. **18** 823 (1993)]と電気光学サンプリング法(EOS)[Appl. Phys. Lett. **67** 3523 (1995)]を組み合わせることで、計測対象の光電場の周期よりも長い参照光パルスを使っても、その光電場を計測できることに気がついた。この手法を使って、振動周期が11fs程度の中赤外光パルス(中心波長3μm)の電場が振動する様子を、30fsの参照光パルスを用いて測定する実験に成功した。実際に、この手法を使って、中心波長3.3μmで振動する光電場を、30fsの光パルスを使って計測することに成功した[Nat. Commun. **4** 2820 (2013)]。この手法を応用すれば、自己参照によってどんなに短い波長の光電場の振動も観測することが可能である。

この手法をまとめた論文は、2013年に出版され、また、特許の国際出願 [PCT/JP2013/002735]をしており、アメリカの特許は取得済み[US9285275]である。

2. 研究の目的

申請者が発明した上記の手法を応用すれば、自己参照によってどんなに短い波長の光電場の振動も観測することが可能である。申請者は、自己参照による光電場計測について、理論的な考察を行い、数値計算によるシミュレーションも行っていった[Nat. Commun. **4** 2820 (2013)]。しかし、実験的に、自己参照による光電場波形の計測はまだ行われていなかった。

本研究の目的は、上記の手法を使って、光電場を、自己参照によって実験的に測定することである。

3. 研究の方法

実験装置を図1に示す。中心波長3μmの超

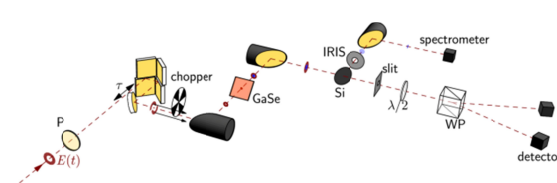


図1: 自己参照による光電場計測のための実験装置図。P: 偏光子、GaSe: セレン化ガリウム結晶、Si: シリコンウェハ、WP: ウォラストンプリズム

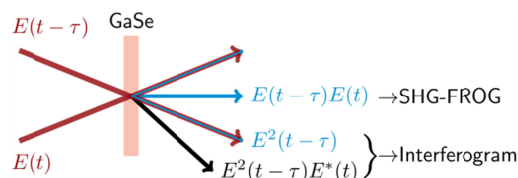


図2: 本実験におけるビーム配置。

短光パルスを計測対象の光電場として、実験を行った。スペクトルは、2から5μmまで広がっており、1オクターブ以上のスペクトルである。その赤外パルスのビームを2つのリトロリフレクタによって、空間的に2つに分離し、遅延時間を制御できるようにしてから、厚さ30μmのセレン化ガリウムにおいて、2つのビームが重なるように集光した。2つのパルスが時間的に重なったとき、二倍波の信号が中央に発生する。その二倍波の信号をスペクトル分解することで、FROGの信号が得られ、パルスの包絡線を決定する。また、入射ビームに沿って発生する二倍波と、2つのビームの四光波混合によって発生する光との干渉を測定することで、電気光学サンプリングの信号を得た(図2を参照)。これらの情報より、20fs程度の光パルスについて、自己参照によって、光電場の再現をすることができる。

ここで、電気光学サンプリングの信号について説明する。入射光と平行に発生する二倍波の信号と、四光波混合の信号を重ね合わせたときに得られる信号は、つぎのようになる。

$$\begin{aligned} & \langle |E^2(t-\tau) + E^2(t-\tau)E(t)|^2 \rangle \\ &= \langle |E(t-\tau)|^2 + |E^2(t-\tau)E^*(t)|^2 \\ & \quad + 2\Re\{|E^2(t-\tau)|^2 E^*(t)\} \rangle \end{aligned}$$

$E(t)$ は計測対象の光電場を示し、 $\langle \rangle$ は時間平均を示す。この第三項が位相の情報を含んだ項であり、 $E^*(t)$ と $E^2(t)$ の畳み込み積分となっている。これから $E(t)$ を求めるには、 $E(t)$ の包絡線の情報を、FROG法によって算出してから、デコンボリューションの方法で、 $E(t)$ の位相を計算することを行う。

4. 研究成果

上記の方法で、実験を行った結果を図3に示す。光電場の再現方法としては、次のとおりである。

(1) 信号光のパワースペクトルと(相対)位

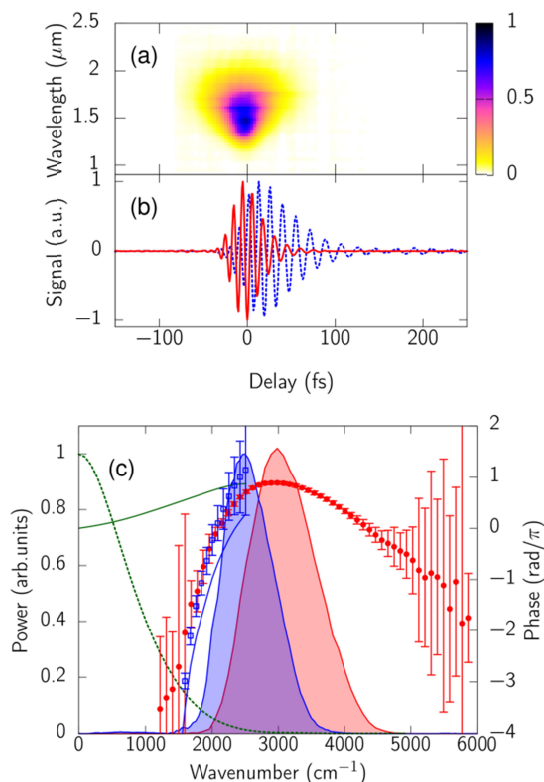


図 3: 自己参照による光電場計測の結果。
 (a)第二高調波発生周波数分解光ゲート法のトレース。(b)電気光学サンプリング法で測定した信号(青線)と再現された光電場(赤線)。(c)周波数分解光ゲート法から算出した光電場のスペクトル強度(赤実線)と位相(赤丸)と、電気光学サンプリング法で求めた光電場のスペクトル強度(青実線)と位相(青丸)。緑の点線は、 $|E(t)|^2$ のフーリエ変換であり、その位相は緑の実線である。

相スペクトルを FROG トレース(図 3a)から FROG アルゴリズムを使って再現する。この段階では、位相スペクトルのオフセットを決めることはできない。

(2) EOS の信号(図 3b 中青線)をフーリエ変換することによって、パワースペクトルと位相スペクトル(図 3c 中青実線)を計算する。

(3)EOS 信号の位相スペクトルに、求めた FROG で求めた光電場強度のフーリエ変換(図 3c 中緑実線)の位相で割る(図 3c 中青丸)。

(4) FROG によって得られた位相スペクトルのオフセットを、EOS の信号から得られた位相スペクトルに合わせる。

(5) オフセットが修正された位相スペクトルと、FROG から得られたパワースペクトルを使った逆フーリエ変換によって、電場波形の完全な形(図 3c 中赤線)を再現する。

結果として、パルス幅は 20fs と求められた。さらに、光電場の位相を 180 度ずらすことによって、光電場が反転する様子も観測できた。このように、自己参照によって、光電場の計測を世界ではじめて行うことができた。現在、この研究に関する論文を執筆中である。

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)

[雑誌論文](計 3 件)

T. Fuji, Y Nomura, and H Shirai:
 “Generation and characterization of phase-stable sub-single-cycle pulses at 3000 cm^{-1} ,” IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **21** 8700612 (2015).
 DOI: 10.1109/JSTQE.2015.2426415 査読有り

藤貴夫、野村雄高: “四光波差周波混合により発生する単一サイクルパルスのキャリア・エンベロープ位相,” レーザー研究 **43** 512-516 (2015). 査読有り

Y. Nomura, Y.-T. Wang, A. Yabushita, C.-W. Luo, and T. Fuji: “Controlling the carrier-envelope phase of single-cycle mid-infrared pulses with two-color filamentation,” Opt. Lett. **40** 423-426 (2015).
 DOI: 10.1364/OL.40.000423 査読有り

[学会発表](計 12 件)

T. Fuji: “Sub-cycle mid-infrared pulse generation through filamentation,” COFIL2016, Quebec City (Canada) September 5-9 (2016). (招待講演)

H. Shirai, Y. Nomura, and T. Fuji: “Self-Referenced Waveform Measurement of Few-Cycle MidInfrared Pulses,” UP2016, SantaFe, (USA), July 17-22 (2016).

T. Fuji: “Self-referenced waveform characterization of ultrashort pulses,” LPHYS '16, Yerevan (Armenia) July 11-15 (2016). (招待講演)

T. Fuji, H. Shirai, and Y. Nomura: “Self-referenced frequency-resolved optical gating capable of carrier-envelope phase determination,” CLEO2016, SanJose (USA) June 5-10 (2016).

藤貴夫: “キャリア・エンベロープ位相も測定できる超短光パルス評価法,” レーザー学会, 名城大学(愛知県名古屋市) 1月 9-11 日 (2016) (招待講演).

T. Fuji: “Generation and characterization of sub-cycle mid-infrared pulses using THz technologies,” EMN Meeting on Terahertz, San Sebastian (Spain) May 14-18 (2015). (招待講演).

T. Fuji: “Waveform characterization of ultrashort pulses,” OPTIC2015, Hsinchu (Taiwan) December 4-6 (2015). (招待講演).

T. Fuji and Y. Nomura:
“Carrier-envelope phase of single-cycle pulses generated through filamentation,” Ultrafast Optics X, Beijing (China) August 16-21 (2015). (招待講演)

T. Fuji, H. Shirai, and Y. Nomura:
“Generation and application of phase-stable sub-cycle mid- infrared pulses,” Photonics North2015 Ottawa (Canada) June 9-11 (2015) (招待講演).

藤貴夫: “超広帯域赤外光パルス発生と位相制御,” 第6回超高速光エレクトロニクス研究会 東京大学 (千葉県柏市) 1月16日 (2015) (招待講演).

T. Fuji, Y. Nomura, Y.-T. Wang, A. Yabushita, and C.-W. Luo:
“Carrier-envelope phase of ultrashort pulses generated through multi-color filamentation,” COFIL2014, Shanghai (China) September 18-24 (2014) (招待講演).

T. Fuji, Y. Nomura, Y.-T. Wang, A. Yabushita, and C.-W. Luo:
“Carrier-envelope phase of single-cycle pulses generated through two-color laser filamentation,” UP2014, Okinawa Convention Center, Ginowan city, Okinawa (Japan) July 7-11 (2014).

[その他]

ホームページ

研究紹介

<https://www.ims.ac.jp/research/group/fuji/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤 貴夫 (Fuji, Takao)

分子科学研究所・分子制御レーザー開発研究センター・准教授

研究者番号：20313207