

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 6日現在

機関番号：12601
 研究種目：挑戦的萌芽研究
 研究期間：2012～2012
 課題番号：24651097
 研究課題名（和文） テラヘルツ周波数変調法を用いた加速器とレーザーの同期時間差計測法の開発
 研究課題名（英文） Development of time jitter monitor between electron accelerator and synchronized laser by using frequency decoded EO sampling method.
 研究代表者
 岩崎 純史 (IWASAKI ATSUSHI)
 東京大学・大学院理学系研究科・特任助教
 研究者番号：30447073

研究成果の概要（和文）：自由電子レーザーと同期した超短パルスレーザーとの同期時間分解能の向上を目的に、電気光学計測を用いたタイミングモニタ装置の試作・ならびに性能評価を行った。その結果、200 fs の時間分解能で時間差計測が可能であり、この時間差情報をフィードバック制御することによって長時間の同期安定性が実現できることが分かった。

研究成果の概要（英文）：In order to improve the synchronization between the electron linac and ultra-short pulse laser, jitter timing monitor based on the electro-optic sampling technique was developed and examined. The resulting timing jitter was estimated to be 200 fs, and the synchronization was stabilized by introducing feed back of the timing drift to the laser trigger circuit in long time scale.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	1,600,000	480,000	2,080,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：量子ビーム科学

キーワード：量子ビーム計測手法

1. 研究開始当初の背景

理化学研究所播磨研究所において建設された X 線自由電子レーザー-SACLA など、線形加速器と挿入光源技術の組み合わせによって、従来ではレーザー発振を達成できなかった極端紫外や硬 X 線波長領域において、高強度のパルス光源が実現されている。近年、この自由電子レーザーと超短パルスレーザーを同期した様々なポンプ・プローブ計測が行われている。しかし、自由電子レーザーパルスと同期した超短パルスレーザーパルスの間には、サブピコ秒程度の時間揺らぎ（ジッター）を持つため、同期実験において時間分解能を評価するための手段確立と非破壊タイミング計測法の開発が待ち望まれていた。本研究開始当初に計測した、ヘリウムの極端紫外パルスと近赤外レーザーの 2 色非共鳴 2 光子イオン化計測実験では、ポンプ・プロー

ブ遅延時間に対するイオン化収率をプロットしたところ、700 fs の時間ジッターを持つことが分かった。一般に、孤立気相系の化学反応ダイナミクスは 100 fs 程度であるため、700 fs の時間ジッターではこのような高速現象を観測することはできない。

2. 研究の目的

本研究では、自由電子レーザーパルスとフェムト秒長短レーザーパルスとの同期実験を行う上で重要な情報である、ショット毎の 2 つのパルスの到着時間差計測法を開発することを目的とした。具体的には、理化学研究所播磨研究所の SCSS (SPring-8 Compact SASE Source) 試験加速器において、加速管と挿入光源との間に非破壊計測装置を導入し、同期した超短パルスレーザーの一部をプローブ光として計測する時間差計測システムの構

築を行い、その性能評価を行った。長時間にわたって時間差計測を行い、この同期精度が2つのビームのパルス幅以内の場合にだけ起こるイベントである、高次高調波パルスの電子ビームによる増幅をモニターすることによって、その性能評価を行った。

3. 研究の方法

SCSS 試験加速器は、波長領域が 50–60 nm の極端紫外領域に発振可能な自由電子レーザーであり、電子ビームのエネルギーは 250 MeV、電子ビームのチャージ量は 0.4 nC の線型加速器である。線型加速器と挿入光源の間に電気光学結晶である ZnTe を導入し、近傍を通過する電子ビームの電場によって誘起される結晶軸を伝搬するレーザーパルスの位相変化を、偏光の旋回として検出した。ZnTe における偏光の旋回は、電気光学結晶前後に高い消光比を持つ偏光子を設置することによって、感度よく検出し、これを信号光として各ショットのスペクトル強度を保存した。また、結晶に導入しているスペクトルを事前に計測して割り算しておくことで、偏光の旋回成分のみを好感度に検出した。今回の計測では、プローブパルスを、ガラスブロック、ならびに位相変調器を用いて時間チャープすることによって、パルス内に時間に依存した周波数分布を導入した。この周波数変調 EO 計測法によって、2 つのビームの到着時間の差を、スペクトルピークの変化として計測することができる。チャープパラメータ $\beta = 1$ ps/nm の変化をガラスブロックと位相変調器に導入した。すなわち、パルスの 1 ps ずれたところでは、中心波長が 1 nm 異なるパルスを生じることによって、プローブレーザーパルスと電子ビームの到着時間をスペクトルピーク位置の変化として精度良く記録することが出来る。実験では、信号、ならびに参照スペクトルを各ショット保存した。また、各ショットにおけるピーク位置をプロットすることによって、ショット毎と長時間周期の到着時間変化について記録を行った。長時間周期の変化について、主に温度変化を原因とするレーザーのタイミング回路、共振器長の変化、また、電子機器間のケーブル長の変化があげられる。このような温度変化は、外気温に依存しているため、日中の太陽の照射時間などによって変化が大きくなる。そこで、今回の実験では、この電気光学タイミング計測ピーク位置のショット毎の変化を記録し、適当な時定数を用いてレーザートリガにフィードバックすることによって、長時間にわたって2つのパルスの到着時間を合わせることを試みた。

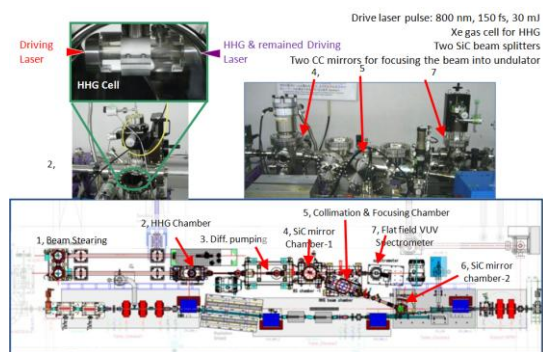


図1. 加速器トンネル内の加速管と挿入光源の間の光学系の様子。図左下側から加速された電子が導入され、シケインと呼ばれるパンチ圧縮器付近において、左上側から導入されるレーザーパルスと同軸上に伝搬する。到着時間測定光学系はこの下流側に設置された。

4. 研究成果

理研播磨研究所 SCSS 試験加速器において、周波数変調法を用いた電気光学 (Electro-optic) 計測装置の評価を行った。EO 計測装置は、SCSS 試験加速器に導入された波形整形器 (Fastlite Dazzler) とガラスブロックを用いて $\beta \sim 1$ ps/nm の正分散を与え、プローブレーザー波長と時間の関係が 1 ps / 1 nm となるようにした。この結果は、ストリークカメラ、ならびに電子パルスに対する光学遅延時間の変化によって確認した。また、EO 計測した到着時間差の結果は、プローブレーザーパルスの光路中に導入した光学ディレイステージと、信号遅延装置 (Candox Systems) を用いて、それぞれ 50 fs, 1 ps の帯域におけるフィードバックを行った。

その結果、フィードバック制御無しの場合、30 Hz 繰返しの分解能で、各ショットにおいて、EO 信号のスペクトル計測に成功し、非破壊タイミング計測できることがわかった。ピーク位置の解析から、スペクトルピークの標準偏差に対応する時間分解能が 600 フェムト秒未満であることがわかった。また、周波数変調法を用いた本 EO 計測装置では、時間分解能 200 fs が限界であることがわかった。

この結果をふまえて、到着時間差のドリフトを制御するために、フィードバック制御を行った。フィードバック制御では、スペクトルピーク位置の時間に対する変化を平均化してプロットし、ある基準値以上を超えた場合には、信号遅延回路に時間遅延を導入して、元の値に戻るようソフトウェア上で設定した。この場合には、遅延時間のショット毎の変動が大きいため、時定数を大きくしても数分間という短時間であれば機能したが、長時間の変動を抑えることが出来なかった。この原因として、フィードバック制御プログラムのアルゴリズムの改良が必要である。

また、短時定数のフィードバック制御を行った場合には、ショット毎のピーク位置の変

動が大きかったため、ソフトウェア上でフィードバックをすることが出来なかった。この原因として、ソフトウェアがフィードバックを検出してから、実際に光学遅延や位相制御器を経て遅延を与えるまでに、数秒かかるため、既に情報が遅すぎたことに起因すると考えられる。これを改良するためには、まず、同期精度を向上させて、ショット毎の到着時間変動を少なくしたうえで、フィードバック制御を行くこと、また、1秒以内に高速に反応するような、高速レスポンスの光学遅延導入器が必要となる。これは、実験環境によって加速器トンネル内と外部との制御がネットワーク機器を経由する必要があるため、今後改善していく必要があると考えられる。

実際の実験では、数時間にわたってフィードバック制御を行うことが必要である。また、同期実験を行うには、ショット毎の時間ジッターより、レーザートリガへの時間フィードバックにより時間ドリフトを抑えることが有効であることが分かった。図2上に計測時間に対するEO信号による時間変化計測結果を示す。この計測では、EO計測の変化をマニュアルフィードバックを行い、その変化量を時間に対してプロットしている。右上の図は、結果として、ピーク位置の変動から得られる到着時間変化を示している。左上図から、到着時間は図に示した2時間の間に15ps程度変化していることが分かり、この後も計測を続けた結果、この後順序に逆の変化を示すことが分かった。これは、外気温度変化によって、加速器、ならびにレーザーシステム内部のトリガ回路の抵抗などが変化しているためと考えられる。しかし、マニュアルでフィードバックした結果、1日中フィードバック制御が可能であることが分かった。この場合、数分間に計測コンピュータ上でスペクトル変化を見ながら、ボタンを押すことによってフィードバックを簡便に実現している。

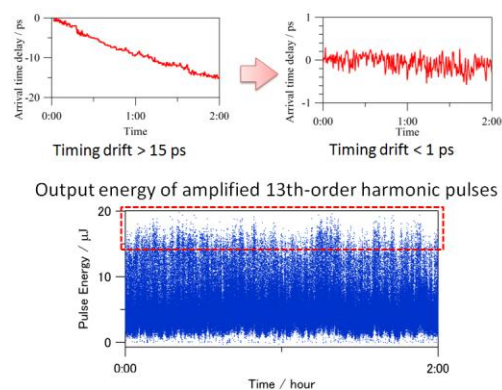


図2. 増幅した13次高調波のパルスエネルギーの時間変化とフィードバック制御(左)有、(右)無の場合のジッターの変化

紫外領域の高次高調波(次数13次、61.5 nm)を発生し、SCSS試験加速器のアンジュレータにて増幅をおこなった。増幅後の極端紫外レーザーパルスのエネルギーの2時間における時間変化を図1に示す。フィードバック制御導入後の同期精度の向上によって、増幅確率が0.3%から20%以上に飛躍的に向上した。これはタイミング計測装置が有効であることを示しており、本装置を用いたコヒーレントコヒーレントEUV-FELパルスによる希ガス原子のイオン化収率の計測実験を行い、非コヒーレント光であるSASEパルスとのイオン化機構の違いについて明らかにした。

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)

1. T. Sato, A. Iwasaki, 他,
“Full-coherentfree electron laser seeded by 13th and 15th-order harmonics of near-infrared femtosecond laser pulses,” *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, in press 査読有.
2. A. Iwasaki 他, “Synchronization of FEL and high-order harmonics of ultrashort-pulsed laser for generating intense full-coherent EUV light pulses,” *EPJ Web of Conferences* 41, 1018 (2013) 査読有.
3. A. Iwasaki, 他 “Photoionization of Atoms and Molecules by Intense EUV-FEL Pulses and FEL Seeded by High-Order Harmonic of Ultrashort Laser Pulses,” *Rev. Laser Eng.*, 40(9), 685-688 (2012) 査読有.

[学会発表] (計 7 件)

1. 岩崎純史 他、レーザー高次高調波をシードしたEUV領域の高強度FELパルスによるヘリウム原子の多光子イオン化の観測、日本化学会第93春季年会(2013)2013年3月22日-25日、立命館大学びわ湖草津キャンパス(滋賀県)
2. 岩崎純史、 “レーザー高次高調波シード型軟X線FEL光による原子の多光子イオン化過程,” 極限コヒーレント光科学研究センター発足記念ワークショップ, 2012年11月29日~30日、東京大学物性研(千葉県).
3. A. Iwasaki, “Multiphoton ionization of He and Xe by high-order harmonic seeded intense FEL pulses,” The 7th asian symposium on intense laser

- science, Nov. 8 - 9, 2012, Tokyo, Japan.
4. A. Iwasaki, 他 “Two-photon ionization of He by full-coherent FEL pulses and by SASE FEL pulses,” International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science, October 21 - 25, 2012, Jeju, Korea.
 5. 岩崎純史, “高強度EUV-FEL 光による原子・分子の非線形イオン化過程,” 2012 光化学討論会, 2012 年 9 月 12 日、東京工業大学大岡山キャンパス (東京都).
 6. A. Iwasaki, 他, “Synchronization of FEL and high-order harmonics of ultrashort-pulsed laser for generating intense full-coherent EUV light pulses,” 18th International Conference on Ultrafast phenomena July 8-13, 2012, Lausanne, Switzerland.
 7. A. Iwasaki, “Multiphoton ionization of He and N₂ by extreme ultraviolet free-electron laser pulses,” 5th Asian Workshop on Generation and Application of Coherent XUV and X-ray radiation, June 27-29, 2012, Kashiwa, Japan.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩崎 純史 (IWASAKI ATSUSHI)
東京大学・大学院理学系研究科・特任助教
研究者番号 : 30447073