

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05331

研究課題名(和文) レーザー変調を用いたアト秒電子ビームパルス発生の研究

研究課題名(英文) Generation of attosecond electron beam pulse using laser modulator

研究代表者

菅 晃一 (Kan, Koichi)

大阪大学・産業科学研究所・助教

研究者番号：60553302

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：(1) 磁場周期長 6.6mm, 周期数 20, 磁場振幅 0.25 T, レーザー変調後の自由空間距離 150 mm の条件でのレーザー変調後の軸方向位相空間分布とその時間プロファイルのシミュレーションを行った。(2) ギャップ長を調整して変化する磁場分布を測定し、磁場の周期長は 6.6 mm において、0.2～0.4 T まで調整可能であることが分かった。(3) 電気光学結晶を用いた、電子ビーム・レーザー同期計測に利用できるシステムを開発した。(4) 偏向磁石を用いて、レーザー変調のエネルギー分散測定に利用できるシステムを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

加速器・電子ビーム技術に関する研究を行った。本研究の進展により、原子炉水化学や放射線生物学、次世代半導体製造のためのリソグラフィに貢献することができる。研究成果を4項目挙げる。(1) レーザー変調後の軸方向位相空間分布(エネルギーと時刻の電子の分布)とその時間プロファイルの計算を行った。(2) レーザー変調用のアンジュレータ開発を行った。(3) 電気光学結晶を用いた、電子ビーム・レーザー同期計測に利用できるシステムを開発した。(4) 偏向磁石(電子ビームの軌道を曲げる磁石)を用いて、レーザー変調のエネルギー分散測定に利用できるシステムを開発した。

研究成果の概要(英文)：(1) Simulation of laser modulation: Longitudinal phase-space distribution was simulated with conditions of period length (6.6), period number (20), and magnetic amplitude (0.25 T). (2) Fabrication of undulator with variable magnetic field: Undulator gap was adjusted for magnetic field from 0.2 to 0.4 T. (3) Measurement of synchronization between electron beam and laser: Electro-optic sampling enabled us to measure the synchronization. (4) Energy spread measurement system: Energy spread measurement system was developed for the confirmation of laser modulation.

研究分野：電子加速器

キーワード：レーザー変調 電子ビーム 電子加速器 アンジュレータ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

量子ビーム誘起超高速反応を解析する手法の一つであるパルスラジオリシスでは、パルス電子ビームを励起源として試料に照射し、その後の反応を時間分解分光法により追跡する。既に、ピコ (10^{-12}) 秒・フェムト (10^{-15}) 秒領域のパルスラジオリシスが行われており、最近では、従来は反応の出発点とされてきた溶媒和電子の前駆体が測定され、その反応性が高いことが明らかになった。原子炉水化学や DNA 等では、その前駆体の詳細な反応性を議論する必要が生じている。また、次世代半導体製造のためのリソグラフィーでも、イオン化直後の反応性の高い活性種の重要性が指摘されている。そこで、ピコ秒やフェムト秒よりさらに短時間領域のアト秒時間領域の超高速反応を解析するために、アト秒の電子ビームパルス発生が不可欠となっている。

従来のフェムト秒電子ビームは、フォトカソード高周波電子銃加速器からの高品質電子ビームを、マイクロ波によりエネルギー変調を行い、さらに磁気パルス圧縮器を通すことで得られてきた。申請者らは、そのシステムを高精度化することにより、10 フェムト秒以下の電子ビームパルスを得ることに成功した。マイケルソン干渉計を用いたテラヘルツ自己相関法により測定されたフェムト秒電子ビームパルスは、8.9 フェムト秒の電子パルスが得られている。しかし、現状の磁気パルス圧縮方式では、発生直後の電子ビーム品質や圧縮時の空間電荷の斥力の問題等により、これ以上のパルス圧縮を行う事は限界に近付いている。

2. 研究の目的

本研究では、レーザーによる電子ビームエネルギー変調を活用したレーザー変調電子ビーム圧縮方式を導入し、フェムト秒電子パルスをアト秒まで短パルス化することを目的とする。アト秒化のためには、これまでのマイクロ波に較べて、高強度かつ高周波数の電場によるエネルギー変調が必要となる。そこで、レーザーと電子パルスをアンジュレータ内で直接的に相互作用させることで、この条件を達成させる。

3. 研究の方法

(1) レーザー変調のシミュレーション

レーザー変調の効果の最適化を行う場合は、光源として使用した場合のアンジュレータの発振波長を変化させるために、電子ビームエネルギーもしくはアンジュレータパラメータを変化させる等の方法がある。しかし、変化可能なパラメータには限界があるために、エネルギー 32.5 MeV の電子ビームに対する、アンジュレータの基本波の発振波長が 800 nm となるようなアンジュレータの条件を算出した。そのような条件の一例として、磁場周期長 6.6mm において、K 値/磁場振幅は 0.15/0.25 T として、シミュレーションコード elegant を用いて数値計算を行った。

(2) レーザー変調用磁場可変アンジュレータの製作

磁石は、ネオジウム磁石 ($30 \times 3.3 \times 10$ mm, N54, NeoMag) を使用した。ホール素子 (THS106A, TOSHIBA) を光学ステージ (OSMS26-(X), SIGMAKOKI) に設置し、ビーム進行方向に掃引し、その垂直方向磁場の測定を行った。ステージを掃引した際に出力されるホール電圧を、データ収集・制御装置 (USB-6216, National Instruments) により記録した。予め、ホール電圧の校正では、本研究のホール素子と校正済みのホール素子 (GM-5015, Denshijiki Industry) を偏向電磁石内に設置し、電磁石の励磁電流により誘起される磁場を変化させ、本研究の素子のホール電圧と校正済み素子の示す磁場の関係を測定する事により、校正を行った。ホール素子は、3 端子レギュレータ (LM317) を用いた定電流回路 (5 mA) により駆動し、本研究のホール素子のホール電圧の係数は、1.1 V/T と得られた。

(3) 電子ビーム・レーザー同期計測システムの開発

ビームポートから出射した 35 MeV のフェムト秒電子ビームについて、電気光学サンプリングを用いて、電子ビーム・レーザー同期計測の試験を行った。CT (current transformer) により、電子ビームの電荷量を測定した。測定系で用いるレーザー光は絞りで 1 mm 以下の径で使用し、適宜 ND フィルターにより光強度を増減させた。元のレーザー光は、水平方向 (x) に偏光しているが、 $\lambda/2$ 板により偏光を調整できるようにしている。 $\lambda/2$ 板を通過した光は自動ステージによる光学遅延を通過した後、水平偏光の純度を高めるために、偏光板を設置した。その後、電子ビームの光学素子通過時の散乱を低減するために、アルミ蒸着 (蒸着膜厚 100 nm 台) ペリクルを用いて、電子ビームと合流させた。ほぼ同軸で電子ビームとレーザーは電気光学結晶を通過した。下流では、電子ビームのポッケルス効果により変化したレーザーの偏光成分を、適宜、偏光光学素子を用いてバランス検出を行った。

(4) エネルギー分散測定システムの開発

レーザー変調が効率よく行われた場合は、電子ビームのスライスエネルギー分散が増加する。そのため、レーザー変調同期確認システムおよび電子ビームエネルギー分散測定システムの開発を行った。(3)節と同様に、アルミ蒸着ペリクルを用いて、アンジュレータ中において、フェムト秒レーザーと電子ビームを合流させた。その後、電子ビームは1.5 mmのアルミ製パーチャを通過し、偏向磁石によりエネルギー分析を行った。偏向磁石は2個のネオジム磁石の間に3 mmのアルミスペーサを設置した磁石であり、0.7 Tの磁場を発生していることが分かった。その後、自由空間を通過し、スクリーン上の電子ビーム径(エネルギー分散に依存)をCCDカメラにより測定した。

4. 研究成果

(1) レーザー変調のシミュレーション

図1は、磁場周期長6.6mm、周期数20、磁場振幅0.25 T、レーザー変調後の自由空間距離150 mmの条件でのレーザー変調後の軸方向位相空間分布(プロット、上)とその時間プロファイル(実線、下)である。位相空間分布の傾きの調整により、時間プロファイルにおけるレーザー変調による変調深さは変化する。この結果のフーリエ変換解析により、バンチング因子を算出し、低周波側に基本波として0.37 PHzのピークが確認でき、808 nmに相当するため、レーザー変調の効果であることが分かった。2倍波に相当する0.74 PHzのピークも確認できた。

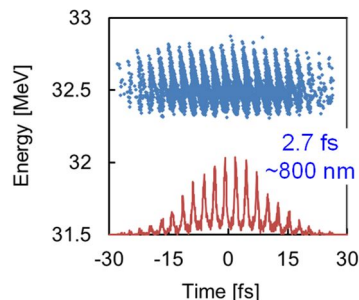


図1 レーザー変調のシミュレーション

(2) レーザー変調用磁場可変アンジュレータの製作

アンジュレータの端の数周期の磁場分布測定結果を示す。ギャップ長 g を調整して変化する磁場分布を示し、0.2~0.4 Tまで調整可能であることが分かった。また、電子ビームの進行方向の長さが3.3 mmの磁石を組み合わせているため、磁場の周期長は6.6 mm(2倍の長さ)を達成できていることも分かった。

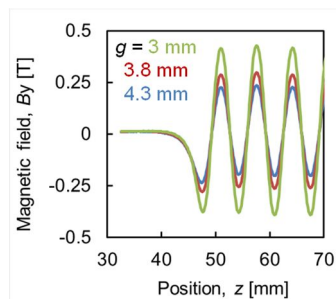


図2 アンジュレータの磁場測定結果

(3) 電子ビーム・レーザー同期計測システムの開発

図3に、偏光変化のフェムト秒レーザー光学遅延依存性として演算した、バランス検出の差動増幅出力を測定した結果を示す。光学遅延の掃引回数5回の平均値を示す。フォトダイオードのみ(PD only)を用いても、差動増幅した信号(w/ Amp.)を用いても電子ビームによる電場の時間プロファイルが得られた。フォトダイオードのみの解析では偏光変化の最大値は~9%であった。しかし、差動増幅信号を用いた偏光変化は、フォトダイオードのみからの演算より低く算出された。200 nsの時間窓では、CTの波形はほぼ0Vまで減衰していたのに対して、フォトダイオードと差動増幅の波形は0V近くまで減衰していなかった。つまり、帯域のためフォトダイオードよりも遅れた信号を出力する差動増幅の波形全体を取得できていなかったことが、偏光変化の違いにつながった可能性が有る。しかし、電子ビーム・レーザー同期計測に利用できることが分かった。

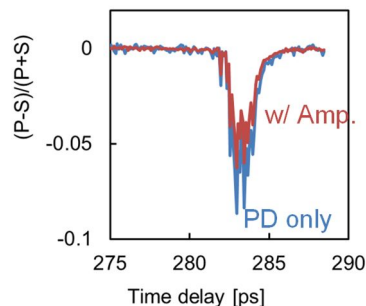


図3 電子ビーム・レーザー同期計測

(4) エネルギー分散測定システムの開発

図4に、フェムト秒レーザーの光学遅延を変化させ、アンジュレータの傾きを変化させた際の、エネルギー分散測定用スクリーンのrms電子ビーム径の測定結果を示す。ネオジム磁石の対により、電子ビーム進行方向に27 mmで約0.7 Tの磁場を発生し、下流の自由空間(130 mm)も組み合わせて、エネルギー分散に寄与する転送行列の R_{16} は0.026 mmであることが分かった。同軸でフェムト秒レーザーと電子ビームをアンジュレータに通過させて、エネルギー分散の顕著な増加は確認されていないが、エネルギー分散測定に利用できることが分かった。電子ビーム圧縮条件の最適化(精密な時間同期)、レーザー強度の増加が重要であると考えられる。

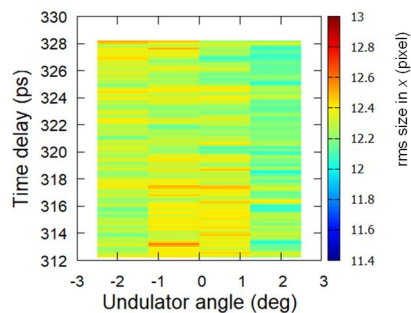


図4 電子ビーム径の光学遅延およびアンジュレータ傾き依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yasunobu Arikawa, Masato Ota, Makoto Nakajima, Tomoki Shimizu, Sadashi Segawa, Thanh Nhat Khoa Phan, Youichi Sakawa, Yuki Abe, Alessio Morace et al.,	4. 巻 91
2. 論文標題 The conceptual design of 1-ps time resolution neutron detector for fusion reaction history measurement at OMEGA and the National Ignition Facility	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 63304
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5143657	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Masato Ota, Koichi Kan, Soichiro Komada, Yasunobu Arikawa, Tomoki Shimizu, Valynn Katrine Magusara, Youichi Sakawa, Tatsunosuke Matsui, and Makoto Nakajima	4. 巻 14
2. 論文標題 Longitudinal and transverse spatial beam profile measurement of relativistic electron bunch by electro-optic sampling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 26503
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/abd867	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 野澤 一太, 菅 晃一, 神戸 正雄, 楊 金峰, 近藤 孝文, 吉田 陽一	4. 巻 16
2. 論文標題 二帯域同時マイケルソン干渉計型バンチ長測定装置の開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 加速器	6. 最初と最後の頁 2-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 菅 晃一, 太田 雅人, 中嶋 誠, 有川 安信, 清水 智貴, 瀬川 定志, 坂和 洋一, 駒田 蒼一郎, 松井 龍之介
2. 発表標題 電気光学サンプリングによる電子ビーム周りのテラヘルツ電場計測
3. 学会等名 第17回日本加速器学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅 晃一, 上野 浩一, 楊 金峰, 神戸 正雄, 吉田 陽一
2. 発表標題 レーザー変調を用いた超短パルス電子ビーム発生のシミュレーション
3. 学会等名 第17回日本加速器学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅 晃一, 神戸 正雄, 楊 金峰, 吉田 陽一
2. 発表標題 レーザー変調を用いた超短パルス電子ビーム発生の研究
3. 学会等名 日本原子力学会2020年秋の大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅 晃一, 神戸 正雄, 楊 金峰, 吉田 陽一
2. 発表標題 アンジュレータ中のレーザー変調による電子ビーム圧縮の研究
3. 学会等名 第63回放射線化学討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅 晃一, 神戸 正雄, 楊金峰, 吉田 陽一
2. 発表標題 レーザー変調のためのアンジュレータ設計と測定
3. 学会等名 日本原子力学会2021年春の年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菅見一, 神戸正雄, 楊金峰, 吉田陽一
2. 発表標題 コヒーレント遷移放射により発生したテラヘルツ電場の解析
3. 学会等名 第56回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅見一, 楊金峰, 神戸正雄, 吉田陽一
2. 発表標題 コヒーレント遷移放射によるテラヘルツ電場の時間・空間分布の測定
3. 学会等名 第16回日本加速器学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅見一, 楊金峰, 神戸正雄, 吉田陽一
2. 発表標題 レーザー変調を用いた超短パルス電子ビーム発生の研究
3. 学会等名 第16回日本加速器学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅見一
2. 発表標題 電子ビームを用いたテラヘルツ波の研究
3. 学会等名 光科学の最新トレンド2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koichi Kan, Masao Gohdo, Jinfeng Yang, Yoichi Yoshida
2. 発表標題 Spatio-temporal Analysis Of Terahertz Electric Field Of Coherent Transition Radiation
3. 学会等名 IRMMW-THz 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅晃一, 楊金峰, 神戸正雄, 吉田陽一
2. 発表標題 光伝導アンテナにより測定したテラヘルツ電場分布の解析
3. 学会等名 日本原子力学会2019年秋の大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅晃一, 楊金峰, 神戸正雄, 吉田陽一
2. 発表標題 電子ビームのテラヘルツ電場分布測定
3. 学会等名 第 62 回 放射線化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅晃一
2. 発表標題 電子ビームの光伝導アンテナと電気光学結晶による測定
3. 学会等名 第16回 高輝度・高周波電子銃研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅見一
2. 発表標題 電子ビームが纏うテラヘルツ電場の測定
3. 学会等名 2019年度ビーム物理研究会、若手の会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 玄一貴
2. 発表標題 相対論的フェムト秒電子線パルスを用いた超高速電子回折に関する研究
3. 学会等名 2019年度ビーム物理研究会、若手の会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koichi Kan, Jinfeng Yang, Masao Gohdo, Yoichi Yoshida
2. 発表標題 THz Measurement of Femtosecond Electron Beam
3. 学会等名 The 23rd SANKEN International Symposium, The 18th SANKEN Nanotechnology International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅見一, 楊金峰, 神戸正雄, 吉田陽一
2. 発表標題 自由空間中の電子ビームのテラヘルツ電場計測
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会(2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅見一, 神戸正雄, 楊金峰, 吉田陽一
2. 発表標題 電気光学結晶を用いた電子ビーム測定
3. 学会等名 日本原子力学会2020年春の年会
4. 発表年 2020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
---------	---------