

令和 5 年 5 月 17 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K03897

研究課題名(和文) 周波数干渉計を用いた超短パルス電子ビームのパルス幅計測

研究課題名(英文) Pulsewidth measurement of ultra-short-bunch electron beam by using frequency domain interferometry

研究代表者

小瀧 秀行 (Kotaki, Hideyuki)

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

研究者番号：60354974

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：電子ビームへの影響を及ぼさない、超短パルス電子ビームのパルス幅測定法を確立するため、周波数干渉計を用いたシングルショットでの電子ビーム計測を行なった。本研究により、電子ビームによる周波数干渉計でのシグナルの計測に成功した。電子ビームには、時間的に広がった低エネルギー成分と超短パルスの高エネルギー成分が観測できた。高エネルギー成分の電子ビームの電荷量は12.6 pC、パルス幅は1.7 fsであり、別の方法での測定とほぼ同じパラメーターであることを確認できた。これにより、本計測の有用性を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子振動計測やコヒーレント遷移放射などの超短パルス電子ビームのパルス幅計測は、電子ビームそのものを計測に使用するため、電子ビーム利用との同時計測はできない。一方、周波数干渉計でのプラズマ波計測は、2つのレーザーパルスを周波数領域で干渉させ、その干渉縞の位相変化から屈折率を求める計測である。この計測方法では、被測定物質に変化を与えないため、その物質を応用研究に使用しながら計測することが可能である。これを電子ビーム計測に応用することで、電子ビームの非破壊測定が可能となった。この研究により、超短パルス電子ビーム利用が、応用研究に向けて一歩前進した。

研究成果の概要(英文)：In order to measure the pulse width of electron beams without the effect to the electron beam, I conduct the electron beam measurement by using the Frequency Domain Holographic (FDH). By the research, I successfully obtained to obtain the signal of the electron beam. The electron beam had the low energy part and the high energy part. The high energy part had 12.6 pC of the charge and 1.7 fs of the pulse width. The parameters of the electron beam were similar to those of another experiment result. The results show the usefulness of the method to measure the electron beam.

研究分野：レーザー電子加速

キーワード：超短パルス電子ビーム 電子ビームパルス幅計測 周波数干渉計

1. 研究開始当初の背景

チャープパルス増幅[1]によるレーザー科学の発展により、高強度・超短パルスレーザーが実用化された。この高強度レーザーを用いて、フェムト秒オーダーの超短パルス電子ビームの生成が可能である。その電子ビームのパルス幅の計測は、応用のための重要な測定の一つである。この超短パルス電子ビーム計測方法として、(a)コヒーレント遷移放射(CTR) [2, 3]や(b)Electro-Optics (E/O) [4, 5]を用いる方法、(c)電子振動[6]を用いる方法がある。以下に各々について説明する。

(a) 電子ビームが物質の境界を通るとき、境界面で電磁波を放射する。これが遷移放射である。

電子ビームのパルス幅が電磁波の波長より短いとき、コヒーレント光が放射される。コヒーレント化する波長を測定することで、電子ビームのパルス幅を求められる。

(b) E/Oは、電子ビームの周りの電場と結晶との相互作用を利用した計測である。これは非接触型であるが、結晶の応答速度や厚さによる分解能の低下がある。

(c) 電子振動を用いた計測は、高強度レーザーで電子ビームに振動を与え、その振動をみる方法である。直接電子ビームの時間方向の分布を見ることができ、電子ビームをスクリーンに当てて見るため、電子ビームをそのまま応用に使用することはできない。

これまでのパルス幅測定方法には、電子ビーム利用との同時計測に問題がある。そこで、プローブ光を用いた被測定電子ビームにほとんど影響を与えない「周波数干渉計」による電子ビームのパルス幅測定を提案する。

[1] D. Strickland and G. Mourou, *Opt. Communications* Vol. 56, 219 (1985).

[2] O. Lundh, et al., *Nature Phys.* Vol. 7, 219 (2011).

[3] J. van Tilborg, et al., *Phys. Rev. Lett.* Vol. 96, 014801 (2006).

[4] K. Huang et al., *Scientific Rep.* Vol. 8, 2938 (2018).

[5] G. Berden, et al., *Phys. Rev. Lett.* Vol. 99, 164801 (2007).

[6] H. Kotaki et al, *J. Phys. Soc. Jpn.* Vol. 84, 074501 (2015).

2. 研究の目的

電子ビームそのものに大きな影響を与えず、電子ビームのパルス幅の直接計測を行うことを目的に、本研究を行った。高強度レーザーを用いて生成した電子ビームは、超短パルスであるという特徴を持つ。電子ビーム応用と同時にパルス幅測定を行うために「周波数干渉計を用いた電子ビームのパルス幅計測」を行った。

これまで、超短パルス電子ビームのパルス幅計測には、「遷移放射を用いる方法」や「E/O結晶を用いる方法」が用いられてきた。また、周波数干渉計は、プラズマ波の計測等、プラズマ密度のわずかな差を求めるために用いられている。しかしながら、周波数干渉計を用いた超短パルス電子ビームのパルス幅計測は、行われていなかった。

これまでの計測により、電子ビームのパルス幅は数フェムト秒程度であることが予想された。また我々のレーザーを用いた場合、電子ビームの電荷量は10pC程度であると考えられた。メインパルスの集光サイズより、電子ビームの横方向の直径を $10\mu\text{m}$ と仮定すると、電子密度は、約 $3\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ になる。レーザー電子加速実験にはガスジェットを使用しており、本電子ビーム計測はガスジェット中かガスジェット直後のガス中となる。ガスがあるため、干渉を用いた屈折率の変化の計測が可能である。干渉縞の位相シフトは、レーザーと電子ビームとの相互作用長 L_p 、電子密度の変化 δn 、臨界密度 n_c を用いて次のように表される。

$$\Delta\phi = -\pi(L_p/\lambda_{pe})(\delta n/n_c)$$

電子ビームの電子密度から計算すると、この電子ビームによる位相シフトは、相互作用長1mm弱で 2π 程度の位相シフトが観測でき、本計測が可能であると考えた。

研究代表者は、周波数干渉計を用いたプラズマ波計測を行っており、そこで得られた経験から、周波数干渉計を用いた電子ビームのパルス幅計測が可能であることに気付いた。しかもこの方法であれば被測定電子ビームに影響を与えないことがない、研究代表者のオリジナル研究である。

3. 研究の方法

周波数干渉計を用いて、電子ビームのパルス幅計測を行う。周波数干渉計測は、2つのレーザーパルスをわずかな時間差でスペクトロメーターに入射し、周波数領域で干渉させ、その干渉縞の位相変化から屈折率を求める計測である。この計測方法では、被測定物質に変化を与えないため、その物質を応用研究に使用しながら計測することが可能である。このとき、チャープパルスを用いることにより、光の波長を時間に変換でき、この位相変化より電子ビームのパルス幅を測

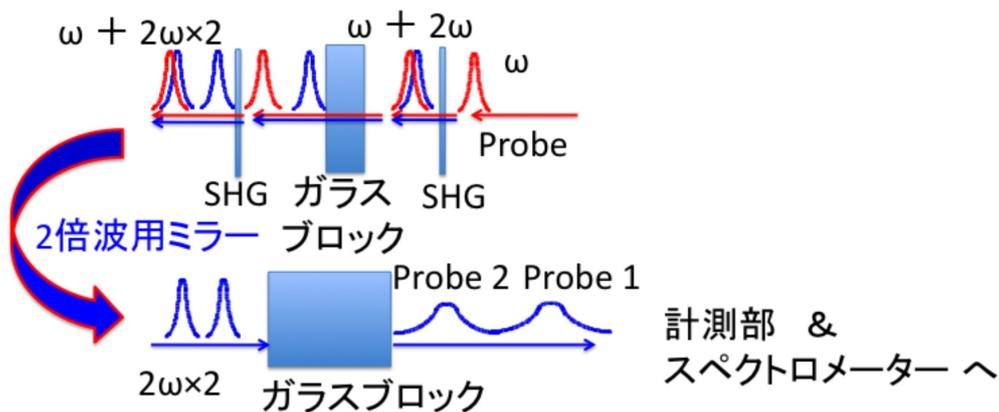


図1 周波数干渉計用プローブパルス生成

定する。

この周波数干渉計用のプローブパルスとして2倍波を使用する。2倍波を用いることにより、基本波であるメインパルスとの同軸化および分離を、誘電体多層膜ミラーで容易に行うことが可能となる。2つのプローブパルスは、図1のようにして作ることで、ジッターフリーとすることができる。プローブパルスはチャープパルスを用いるため、プローブパルスのパルス幅は電子ビームより十分長い。そのため、タイミング調整も比較的容易であり、時間的にジッターがあっても計測には影響がない。プローブパルスと電子ビームの位置合わせを正確に行えば、測定可能である。

4. 研究成果

ガスジェットに高強度レーザーを集光しプラズマを生成、そのプラズマ中の電子がプラズマ波でできる航跡場で加速されて電子ビームとなる（レーザー電子加速）。電子ビーム計測の前段階として、周波数干渉計を用いたプラズマ波計測を行った。周波数干渉計測では、周波数領域での干渉縞（フリンジ）の位相シフトから、電子密度の変化を求める。

電子ビームが計測ノイズとなる可能性が高いため、最初は、電子ビームが発生しないプラズマ密度で行った。この計測では、周波数干渉計での計測を行いながら、プラズマ密度（ガス密度）を下げていき、周波数干渉計でのフリンジシフトが、綺麗になる密度近辺での計測を行った。本計測により、プラズマ密度 $1.2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ でのプラズマ波の測定に成功した。計測したプラズマ波を図2に示す。計測されたプラズマ周期は90fsであり、ここから得られるプラズマ密度は、本測定にて使用されたプラズマ密度と一致した。これにより、本計測が有効であることが示された。

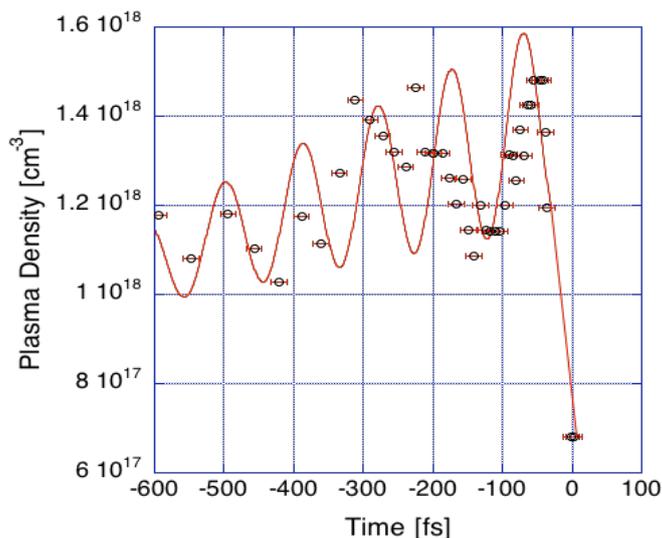


図2 プラズマ波

次に、プラズマ波および電子ビームの測定を、周波数干渉計を用いて行なった。同一条件下で、プラズマ波および電子ビームの位相シフトを比較するため、電子発生の際の境界のプラズマ密度で周波数干渉計測を行った。プラズマ密度を確定させるため、電子ビームの出ない密度から徐々に密度を上げていき、電子ビーム発生ギリギリの密度で固定し、実験を行った。このときのプラズマ密度は、 $4.8 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ である。本計測で計測した周波数干渉縞を図3に示す。上の図が電子ビームな

し、下の図が電子ビームありでの干渉縞を示す。このように、電子ビームなしでの位相シフトおよび電子ビームありでの位相シフトを観測した。電子ビームありでの位相シフトにおいては、プラズマによる位相シフトの上に、さらなる位相シフトを観測した。これは、生成電子ビームによる位相シフトであると考えられる。プラズマ波のみの位相シフトと比較し、電子ビームのみのデータを取得することに成功した。図4に電子ビームによるシフトの中心部分から得た変化を示す。このように、電子ビームには、時間的に広がった低エネルギー成分と超短パルスの高エネルギー成分が観測できた。高エネルギー成分の電子ビームの電荷量は12.6 pC、パルス幅は1.7 fsであり、これまでに確立された、別の測定方法での結果とほぼ同じパラメーターであることを確認できた。これにより、本計測の有用性を示すことができた。

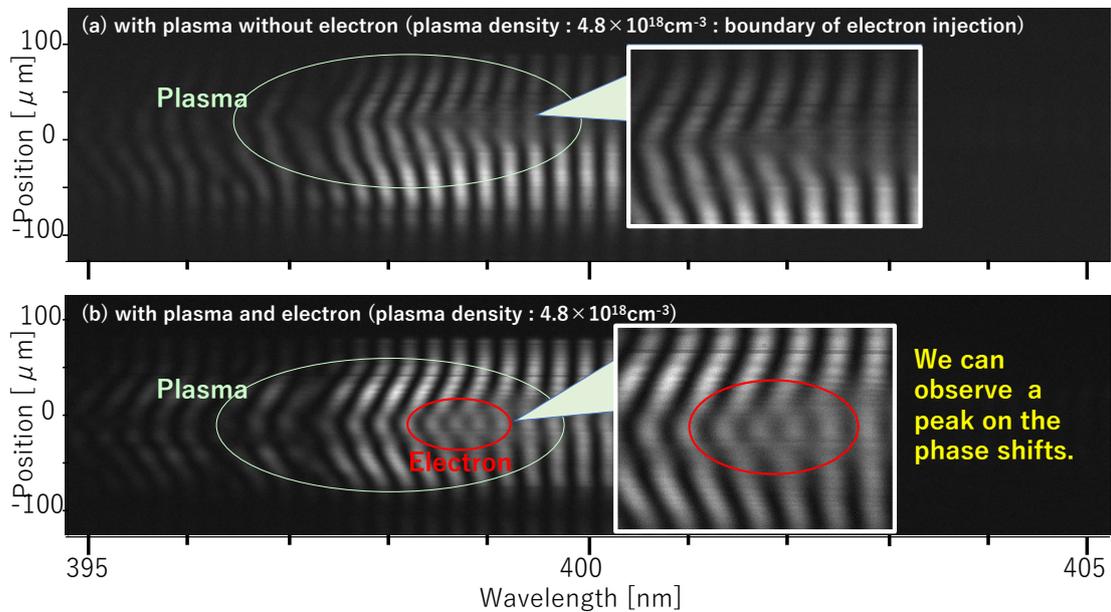


図3 電子ビーム発生境界密度におけるフリッジシフト

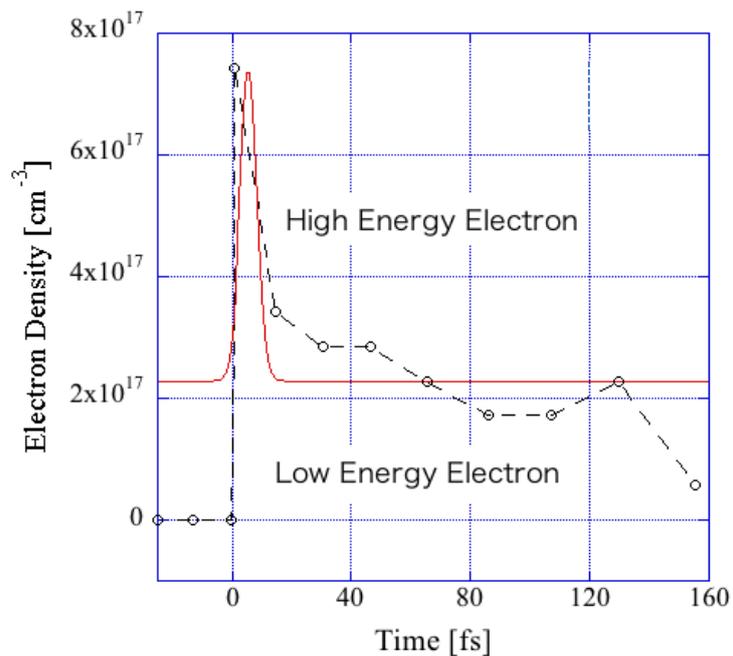


図4 生成電子ビーム

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Kai Huang, Hideyuki Kotaki, Michiaki Mori, Yukio Hayashi, Nobuhiko Nakanii, Masaki Kando	4. 巻 10
2. 論文標題 Single-shot electro-optic sampling on the temporal structure of laser wakefield accelerated electrons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Crystals	6. 最初と最後の頁 640
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/cryst10080640	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 3件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 KAI HUANG, Kotaki Hideyuki, Mori Michiaki, Esirkepov Timur, James Kevin Koga, Hayashi Yukio, Nakanii Nobuhiko, Zhan Jin, Hosokai Tomonao, Kando Masaki
2. 発表標題 Temporal characterization of laser driven ultrafast electron bunches via electro-optic sampling
3. 学会等名 The 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sagisaka Akito, Ogura Koichi, Esirkepov Timur, David Neely, Tatiana A. Pikuz, James Kevin Koga, Fukuda Yuuji, Kotaki Hideyuki, Hayashi Yukio, KAI HUANG, Bruno Gonzalez izquierdo, Sergey Bulanov, Kiriyama Hiromitsu, Kondo Kiminori, Kawachi Tetsuya, Kando Masaki, Alexander Pirozhkov
2. 発表標題 Measurement of BISER
3. 学会等名 光・量子ビーム科学合同シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 KAI HUANG, Kotaki Hideyuki, Mori Michiaki, Esirkepov Timur, James Kevin Koga, Hayashi Yukio, Nakanii Nobuhiko, Sergey Bulanov, Kando Masaki
2. 発表標題 Investigation on the emission timings of electron bunches from laser wakefield acceleration via E0 spatial decoding
3. 学会等名 第25回産研国際シンポジウム（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 KAI HUANG, Kotaki Hideyuki, Mori Michiaki, Esirkepov Timur, James Kevin Koga, Hayashi Yukio, Nakanii Nobuhiko, Kando Masaki, Zhan Jin, Hosokai Tomonao
2. 発表標題 Temporal characterization of laser wakefield accelerated relativistic electron bunches via electro-optic sampling
3. 学会等名 第5回 RIKEN-RAP and QST-KPSI Joint Seminar
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kai Huang, Hideyuki Kotaki, Michiaki Mori, Timur Esirkepov, James Koga, Yukio Hayashi, Nobuhiko Nakanii, Sergei Bulanov, Masaki Kando
2. 発表標題 A single shot non-destructive electro-optic monitor for the electron emission timing diagnostic in laser wakefield acceleration
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森 道昭, 小瀧 秀行, 林 由紀雄, 中新 信彦, 黄 開, 神門 正城, 近藤 公伯
2. 発表標題 QSTにおけるレーザー航跡場加速の安定性向上に向けた複合的アプローチ
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平 義隆, 神門 正城, 小瀧 秀行, 林 由紀雄, 中新 信彦, 黄 開, 大東 出, 川瀬 啓悟, 早川 岳人
2. 発表標題 高強度円偏光レーザーを用いた非線形逆トムソン散乱によるガンマ線渦の発生2
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akito Sagisaka, Koichi Ogura, Timur Esirkepov, David Neely, Tatiana A. Pikuz, James K. Koga, Yuuji Fukuda, Hideyuki Kotaki, Yukio Hayashi, Bruno Gonzalez izquierdo, Kai Huang, Sergei Bulanov, Hiromitsu Kiriya, Kiminori Kondo, Tetsuya Kawachi, Masaki Kando, Alexander Pirozhkov
2. 発表標題 Spectral measurement of BISER
3. 学会等名 光・量子ビーム科学合同シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kai Huang, Hideyuki Kotaki, Michiaki Mori, Timur Esirkepov, James K. Koga, Yukio Hayashi, Nobuhiko Nakanii, Masaki Kando, Jin Zhan, Tomonao Hosokai
2. 発表標題 Temporal characterizations of electron bunches from laser plasma accelerator
3. 学会等名 6th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hideyuki Kotaki, Michiaki Mori, Yukio Hayashi, Huang Kai, Nobuhiko Nakanii, Izuru Daito, Masaki Kando
2. 発表標題 Single shot measurement of “a plasma wave” and “an electron beam” by using Frequency Domain Holographic
3. 学会等名 Prospects for High Field Science (第79回藤原セミナー) (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
---------	---------