

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23600010

研究課題名(和文)フェムト秒電子バンチ生成とその計測及びコントロール

研究課題名(英文)Femtosecond electron bunch generation, measurement, and control

研究代表者

小瀧 秀行 (KOTAKI, Hideyuki)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター・研究副主幹

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、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：レーザープラズマ相互作用により生成されるレーザー加速電子ビームは、フェムト秒(1フェムト秒 = 1000兆分の1秒)という超短パルスであることが予想されている。本電子ビーム応用は、化学反応過程の測定や制御につながる。

本研究により、レーザー加速電子ビームの安定生成とそのパルス幅測定を行った。ターゲットとして、安全上及びプラズマ中の電子密度を容易に得るためにヘリウムを用いている。これを窒素に替え、安定電子ビーム生成に成功した。また、生成電子ビームをレーザー場で振動させ、その電子振動の計測より、電子ビームのパルス幅測定を行い、1.7フェムト秒という超短パルス電子ビームの計測に成功した。

研究成果の概要(英文)：Laser accelerated electron beam via laser-plasma interaction has an ultra-short pulse width. The expected pulse width is the order of femtosecond (1 femtosecond = 1/(1 quadrillion) second). The electron beam will be a source for measurement of the chemical reaction and the control.

In this research, a stable electron beam generation and a pulse width measurement are conducted. As a target, helium gas is used due to the safety and the easy estimation of the plasma density. By changing the target to nitrogen, we have succeeded the stable electron beam generation. Furthermore, we have succeeded to measure the pulse width of the electron beam. The electron beam is oscillated in the laser field. From the oscillation, 1.7 femtosecond of the pulse width has been measured.

研究分野：ビーム物理

科研費の分科・細目：量子ビーム科学

キーワード：レーザー加速電子ビーム パルス幅計測 電子振動 フェムト秒電子ビーム 電子ビームコントロール
相対論的自己収束 波長シフト

1. 研究開始当初の背景

分子振動や化学結合等のフェムト秒 (1フェムト秒 = 10^{-15} 秒) オーダーのダイナミクスの測定には、フェムト秒の量子ビーム (計測用プローブパルス及び反作用ドライバーパルス) が必要である。プローブパルスには、数サイクルのレーザーパルスやサブフェムト秒の高次高調波が使用できるが、ドライバーパルスとして使用できる超短パルス電子ビームやX線はない。一方、レーザーとプラズマとの相互作用によって生成したレーザー航跡場の周期は数十フェムト秒であり、この航跡場で生成されたレーザー加速電子ビームは、数フェムト秒という極短パルスであることが予想されている。本電子ビームを応用に使用するためには、電子ビームの安定性の向上とコントロール、特性の評価が必要である。

2. 研究の目的

(1) フェムト秒オーダーのレーザー加速電子ビームを生成し、超高速現象の計測に使用できるようにするため、本電子ビームの安定性の向上を行う。

(2) レーザー加速電子ビームは、フェムト秒オーダーであると予想されている。この電子ビームをコントロールし、さらにそのパルス幅の計測を行う。

3. 研究の方法

(1) 3TW, 40fs の高強度レーザーをガスジェット中に集光し、レーザープラズマ相互作用によるレーザー電子加速を行う。レーザー電子加速では、ターゲットとして、プラズマ密度の同定が容易であるヘリウムガスを用いていた。しかし、このターゲットをアルゴンガスや窒素ガスにすることにより、生成電子ビームの安定性が向上することを見いだした。本安定性の向上について、「レーザーパルスの波長の変化」と「プラズマチャンネル長」の関連を調査することにより、安定性の向上に必要な条件を調べた。

(2) 3TW, 40fs の高強度レーザーをガスジェット中に集光し、レーザープラズマ相互作用によるレーザー電子加速を行う。ターゲットガスとしては、窒素ガスを用いる。プラズマ密度をコントロールすることにより、生成電子ビームをレーザーパルス中に入れることが出来る。電子ビームをレーザーパルス中に入れ、レーザー電場で振動させ、その振動を測定することにより、レーザー加速電子ビームのパルス幅を求めた。

4. 研究成果

(1) ターゲットガスを窒素ガスやアルゴンガスにすることで、プラズマチャンネルが長くなり、レーザー加速電子ビームの安定性が向上することを見いだした。この安定性の向上

について、レーザープラズマ生成に使用したレーザーパルスの波長変化より、なぜチャンネルが長くなり安定性が向上するかを調べた。図1にプラズマ中を透過したレーザーパルスのスペクトルを示す。ガス種が違っていても、プラズマ密度が同じ場合、ほぼ同じ波長シフトを示した。同一波長で波長シフトが終わっているという結果より、レーザーとプラズマとの相互作用による波長シフトが、プラズマチャンネルに大きく影響していると考え、これについて考察した。図2に、相互作用距離を波長シフトの関係を示す。相互作用距離が0での波長シフトと相互作用距離に比例して、大きくなるシフトが観測された。相互作用距離0でのシフトは、レーザーがガスをイオン化する際の「イオン化ブルーシフト」であり、相互作用距離に比例して大きくなっていくシフトは「光子加速」である。「光子加速」を確かめるため、本レーザーパルスのトムソン散乱光を、カラーCCDを用いて測定した。

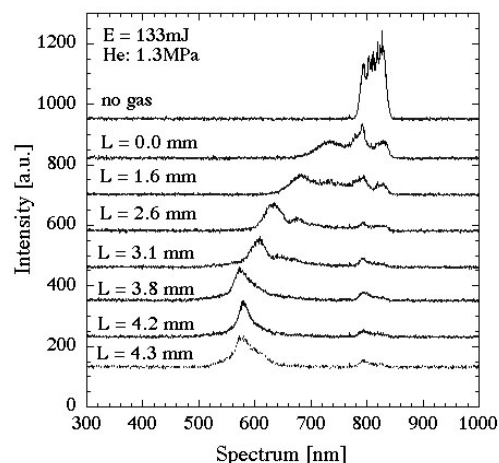


図1 プラズマ密度 $3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ での透過光の波長シフト。L は相互作用距離

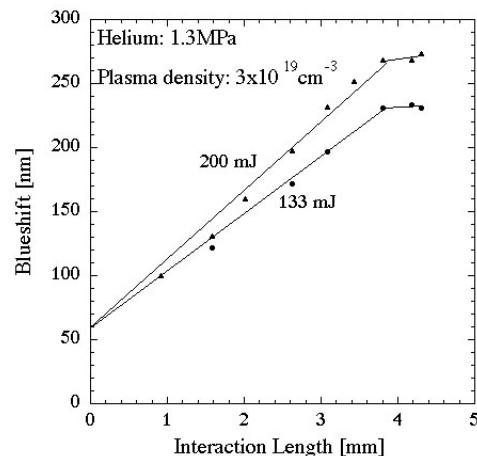


図2 波長シフト。相互作用距離とともにシフト量が増加している。

図3に、その結果を示す。このように、レー

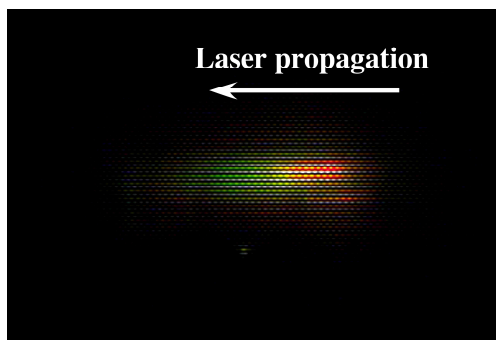


図3 カラーCCDカメラによるトムソン散乱イメージ

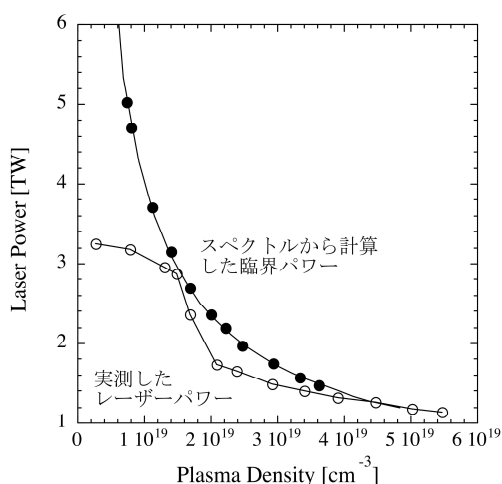


図4 透過光のパワーと透過光スペクトルから求めた自己収束の臨界パワーの比較

ザーパルスが、相互作用とともに波長シフトしているのがわかる。これらの結果は、レーザーパルスの波長がプラズマ航跡場と相互作用しながらシフトしていく「光子加速」が起こっていることを示している。この結果より、波長シフトのため、レーザーパルスの相対論的自己収束が起こるためのパワーが変化し、レーザーのセルフガイディングの条件が崩れ、プラズマチャンネルが終了してしまうのではないかと考えた。そこで、プラズマ密度とレーザー波長から求めたレーザーの自己収束のための臨界パワーと実際の透過光のレーザーパワーを比較した。図4にそれを示す。プラズマ密度 $1.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下では、プラズマ密度が低いため、レーザーパルスが自己収束していない。プラズマ密度 $2.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ から $4.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ では、レーザーパルスが自己収束及びブルーシフトを起こすが、ガスジェットの途中でチャンネルが壊れたため、レーザーの一部がガスにより散乱されていると考えられる。プラズマ密度 $4.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上では、密度が高いため、プラズマチャンネルがガスジェットの最後まで続き、両者の値が非常によく一致している。このレーザー波長のシフトにより、プラズマチャンネルが

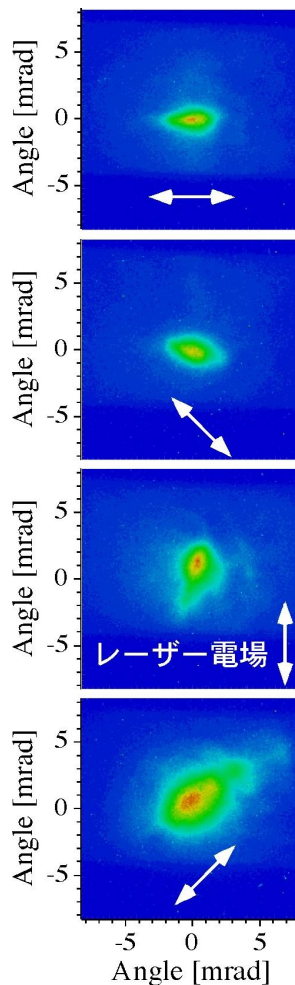


図5 レーザー電場による電子ビームプロファイルのコントロール

制限されている。ヘリウムガスの場合、価数が2と小さく、イオン化でのブルーシフトが大きい。一方、アルゴンガスや窒素ガスの場合、価数が大きいので、イオン化でのブルーシフトが小さい。そのため、アルゴンガスや窒素ガスの方が、ヘリウムガスよりも長いプラズマチャンネルが出来、レーザー加速電子ビームの安定性の向上につながったと考えられる。

(2) レーザー加速電子ビームのパルス幅測定を行うため、電子ビームをレーザーパルス中に入れ、レーザー電場での電子振動を測定した。まず、電子ビームがレーザー中に入っていることを確認するため、レーザーの偏光をコントロールしながら、電子ビームのプロファイルの測定を行った。図5にその結果を示す。矢印は、レーザー電場の向きを示している。このように、レーザー電場の方向に長い楕円プロファイルとなり、電子がレーザー電場方向に振動していることが分かる。次に、この電子振動の測定方法について考える。電子の空間情報を得ることは非常に難しいため、エネルギー分解した電子ビームから電子

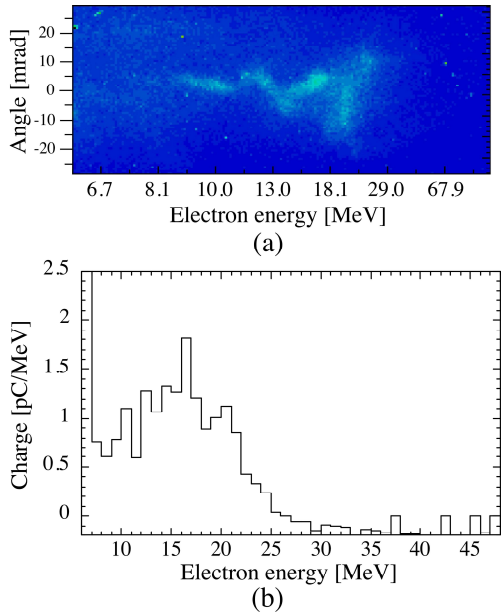


図6 プラズマ密度 $4.4 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ での電子振動測定

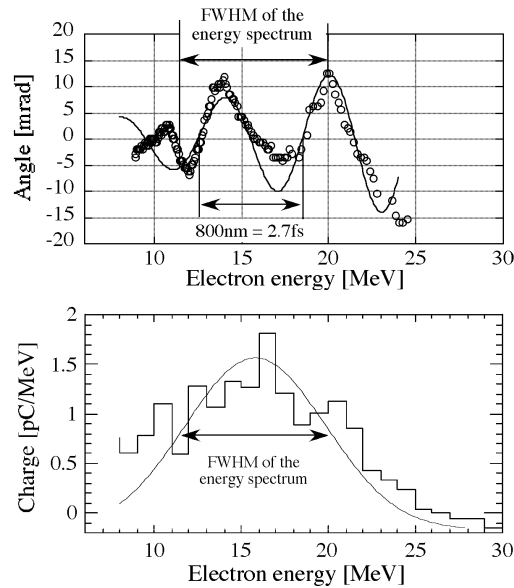


図7 測定した電子振動と理論計算との比較

振動を測定した。レーザーの電場方向と垂直方向にエネルギー分解し、レーザーによる電子振動の測定を行った。それを図6に示す。このようにエネルギー空間での電子振動を測定した。この結果について理論計算と比較した。レーザー強度と電子ビームのエネルギーから計算した、レーザー場による電子の拡がり角は、16mradとなる。この比較を図7に示す。このグラフで、○は計測結果、実線は計算結果を示している。このように、実験結果と計測結果は、非常によく一致している。位相空間における電子ビームの形は、エネルギースペクトルと一致するので、ここからパ

ルス幅を求めることができる。レーザーの波長は 800nm なので、この電子振動の波長も 800nm となる。エネルギースペクトルの幅が電子ビームのパルス幅となるので、これより、電子ビームのパルス幅は、半値全幅で 4 フェムト秒、rms で 1.7 フェムト秒となる。この測定により、超短パルス電子ビームのパルス幅測定に成功した。電子を振動させ、電子ビームそのものからパルス幅を計測した直接計測は、世界初の成果であり、超短パルス電子ビームのパルス幅測定のための新しい計測手法を見いだした。

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9件)

A. Giulietti, A. Andre, S. D. Dufrenoy, D. Giulietti, H. Kotaki (7 番目), 他 8 名, Space- and time-resolved observation of extreme laser frequency upshifting during ultrafast-ionization, Phys. Plasmas (査読あり) vol.20, 082307 (2013).

DOI: 10.1063/1.4818602

Y. Hayashi, A. S. Pirozhkov, M. Kando, K. Ogura, H. Kotaki, 他 4 名, Xe K-shell X-ray generation using conical nozzle and 25 TW laser, Laser Part. Beams (査読あり) vol.31, 419-425 (2013).

DOI: 10.1017/S0263034613000190

H. Kotaki, M. Mori, Y. Hayashi, M. Kando, I. Daito, 他 4 名, Stability improvement of a laser-accelerated electron beam and the pulse width measurement of the electron beam, Problems of Atomic Science and Technology (査読あり) vol.82, 134-138 (2012).

http://vant.kipt.kharkov.ua/CONTENTS/CONTENTS_2012_6.html

小瀧 秀行, オプティカルインジェクションを用いた単色エネルギー電子ビームの安定生成, レーザー研究 (査読あり) vol.40, 814-818 (2012).

http://www.lsj.or.jp/laser/ab_index_40.html

Y. Mizuta, T. Hosokai, S. Masuda, M. Kando (9 番目), H. Kotaki (11 番目), 他 9 名, Splash plasma channels produced by picosecond laser pulses in argon gas for laser wakefield acceleration, Phys. Rev. ST-AB (査読あり) vol.15, 121301 (2012).

DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.15.121301

A. S. Pirozhkov, M. Kando, T. Zh. Esirkepov, P. Gallegos, H. Kotaki (26 番目), 他 3 5 名, Soft-x-ray harmonics

comb from relativistic electron spikes, Phys. Rev. Lett. (査読あり) vol.108, 135004 (2012).

DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.135004
M. Mori, M. Kand, H. Kotaki, Y. Hayashi, S. V. Bulanov, 他 5 名, Condition of MeV Electron Bunch Generated from Argon Gas-Jet Target in the Self-Modulated Laser Wakefield Regime, J. Phys. Soc. Jpn. (査読あり) vol.80, 105001 (2011).

DOI: 10.1143/JPSJ.80.105001
H. Kotaki, M. Kando, I. Daito, T. Kameshima, K. Kawase, 他 1 3 名, Effect of the Laser Contrast Ratio within Picosecond Timescales on Generating a High-Quality Electron Beam by Laser-Plasma Interaction, Jpn. J. Appl. Phys. (査読あり) vol.50, 066401 (2011).

DOI: 10.1143/JJAP.50.066401
H. Kotaki, Y. Hayashi, K. Kawase, M. Mori, M. Kando, 他 4 名, Manipulation and electron-oscillation-measurement of laser accelerated electron beams, Plasma Phys. Control. Fusion (査読あり) vol.53, 014009 (2011).

DOI: 10.1088/0741-3335/53/1/014009

[学会発表](計5件)

Hideyuki Kotaki, Electron and photon acceleration by interaction between laser and plasma, International Conference on High Energy Density Sciences 2014 (HEDS2014), 2014 年 4 月 24 日, 神奈川県横浜市

Hideyuki Kotaki, Limitation of the Plasma Channel due to the Frequency Blueshift, The Eighth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA 2013), 2013 年 9 月 9 日, 奈良県奈良市

Hideyuki Kotaki, Stability Improvement of a Laser-Accelerated Electron Beam and The Pulse Width Measurement of The Electron Beam (Invited talk), International Conference and School on Plasma Physics Workshop (Alushta-2012), 2012 年 9 月 20 日, Alushta (Crimea), Ukraine
Hideyuki Kotaki, Stability improvement of laser accelerated electron beams, International Conference on High Energy Density Sciences 2012 (HEDS2012), 2012 年 4 月 26 日, 神奈川県横浜市

Hideyuki Kotaki, Ultra-short X-ray and electron generation via laser-plasma interaction (Invited talk), PLASMA2011, 2011 年 11 月 24 日, 石川県

金沢市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小瀧 秀行 (KOTAKI, Hideyuki)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター・研究副主幹

研究者番号: 60354974

(2) 研究分担者

神門 正城 (KANDO, Masaki)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター・研究主幹

研究者番号: 50343942