

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K12505

研究課題名(和文) レーザー電子加速器電子エネルギー簡易測定法の開発

研究課題名(英文) Development of simplified electron energy measurement method for laser electron accelerator

研究代表者

森 道昭 (Mori, Michiaki)

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

研究者番号：10323271

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：レーザープラズマ電子加速における新奇な非接触型の電子エネルギー計測法として、電気光学効果(EO)を用いたToF型電子バンチの評価法について提案を行い、その原理実証に関する研究を行った。電子ビームは励起レーザー光と同軸に発生し、且つレーザー光よりも拡がり小さいことから、その除去が重要となる。それを根本的に解決するための手法として、従来のガスターゲットとは異なるキャピラリープレートを用いることにより、大幅な励起レーザー透過光の低減に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザー加速は非常にコンパクトに加速器を構成出来る事から、医学応用から物性研究や素粒子物理研究などの幅広い分野で応用が期待されている。この実現には、発生する電子の制御と計測が重要で、中でも電子ビームのエネルギー(粒子の速度)の評価は特に重要である。そこで非接触の手法として、EO(電気光学効果)を用いた光学的な計測手法を提案した。その原理実証にあたり計測の雑音となる励起レーザー光を低減させる手法としてキャピラリープレートを用いることで、その低減に成功することができた。

研究成果の概要(英文)： As a novel non-contact type electron energy measurement method for laser plasma electron acceleration, the evaluation method of ToF type electron bunch using Electro-optic (EO) effect was proposed, and the research on the principle demonstration was carried out. Since the electron beam is generated coaxially with the excitation laser beam and spreads less than the laser beam, its removal is important. As a method to fundamentally solve this problem, a capillary plate, which is different from a conventional gas target, was used, and a significant reduction of the excitation laser transmitted light was succeeded.

研究分野：高出力レーザー応用

キーワード：レーザー加速 プラズマ 電子ビーム

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

レーザープラズマ粒子加速は近年の研究では、レーザーおよびターゲットの改良・最適化により、電子ビームのエネルギーは 20cm の加速長で 8GeV 級まで達し (Leemans et al., AAC conference 2018)、当研究所においても 800MeV 級の電子パンチの発生の成功に至っている。しかしいずれの研究もシングルステージ (単段) での電荷量は数 pC であり、幅広い応用にはより高い電荷量が求められる。このような状況のもと多段加速に向けた研究が進められている。多段加速はシングルステージでの加速で課題となっている電荷量と高エネルギー性と単色性を高い次元で両立できる。その反面、原理上波長数ミクロンから数 100 ミクロンの周期長のほぼ光速で伝搬するウェーク(プラズマ波)の 1/4 の周期内に特定のエネルギーの電子パンチを注入しなければ効率よく加速できないことからその難易度は非常に高く、生成されているウェーク場の構造および入射電子のタイミング・エネルギー等の情報を正確に診断・制御することが必須となる。しかしながら制御はもちろんリアルタイムで計測をされていないのが現状である。特に入射電子パンチの診断については現状でさまざまな課題がある。その大きなものとして電子ビームの診断に伴う品質の劣化が挙げられる。レーザープラズマ加速では電子のエネルギーは古くから磁場偏向と放射線検出器を組み合わせた手法で分析を行っている。これは電子のエネルギーによってラーマー半径(様な磁場中での荷電粒子の曲率半径)が異なる性質を利用し、エネルギーを空間的に弁別させアレー状の放射線検出素子を通じて検出するというものである。しかしこの手法では、偏向を伴うことからビーム品質に劣化が生じ、さらに、蛍光板などの検出素子上で散乱が発生するため、このような診断装置が稼動した状態でのレーザー加速が本質的に有する高いビーム品質を維持した多段加速は難しい。

### 2. 研究の目的

このような背景から加速電子パンチのビーム品質に影響の無い非接触によるエネルギー計測器開発は急務である。この技術の実現により例えばすでに開発した加速場構造のリアルタイム計測と併用することで、電子プラズマ波(ウェーク場)の位相、加速電子パンチのタイミングが完全同期した非接触式分析がリアルタイムで可能になり、レーザー電子加速の多段加速化技術開発を大いに推進できる。研究代表者らは、EO(電気光学効果)サンプリングを用いた非接触によるフェムト秒級のレーザー駆動電子パンチ幅の計測に成功した[1]。このEOサンプリングは、サンプリング光を用いたEO効果を利用した相互相関が基礎となっている。電子パンチは近接するサンプリング材料(リン化ガリウム(GaP)などのEO結晶)を横切の際に過渡的に流れる電場により結晶に歪みを与える。その結果、EO結晶に複屈折等の光学特性の変化が生じる。この変化を短パルスレーザーを用いて時間走査を行うことでその時間スケールを調べ電子ビームのパンチ幅を評価するというものである。この走査は短パルスレーザー光を基準とする電子ビームの時間的な位置(タイミング)情報を含んでいるため、そもそも超高エネルギーの電子は光速に準ずる速度を持つことを考えると、光速を基準とするわずかな速度差を精密に計測することができれば、上記のような磁場の偏向を使うまでもなくシンプルに評価でき、多段加速の段階における電子のエネルギーを非接触で診断できる計測手法となり得るはずである。しかしながらこの調査には、電子ビームとほぼ同時に同じ方向に励起レーザー光が進行すること、また発生する電子ビームが励起レーザーの立体角よりも狭い角度で発生する事などの理由で透過する励起レーザー光を抑制させることが必要になる。通常、発生部のターゲットはパルスガスジェットを使うが、この場合のレーザー光は30%程度の透過が発生することからこの抑制が重要となるため、この低減に関する技術開発を行った。

### 3. 研究の方法

ターゲットを従来のガスからキャピラリーアレーに変更し発生する電子ビームの性質とレーザー透過光の透過率を調べた。図1(a)に実験セットアップを示す。孔径10ミクロン、ピッチ12.5ミクロン、厚み400ミクロンのキャピラリープレート(図1(b))にf/22の軸外し放物面鏡で10TW級チタンサファイアレーザーJLITE-Xから発生する波長800nmの短パルスレーザー光を25ミクロン径( $e^2$ 径)で集光させた。この1つのキャピラリー構造から発生する電子ビームの性質とレーザー光透過率を評価した。電子ビームのエネルギースペクトルは電磁石とイメージングプレート(IP)を用い、また電子ビームの空間分布は電磁石を取り外す形で評価を行った。レーザー光のエネルギー計測は、この電子線計測器(電子線分光器(ESM), IP)を取り外し、パイロ型レーザーエネルギーメーター(Coherent社製J100)に置き換え直接評価

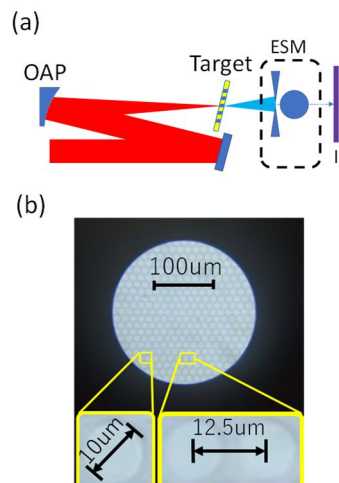


図1 (a)実験セットアップ. (b) キャピラリーアレーターゲットの顕微鏡像[2].

した。

#### 4. 研究成果

図2に発生した電子の典型的なエネルギースペクトルを示す。レーザーエネルギー160 mJ一定で励起レーザーパルス幅を1 psから40 fsに変えることで励起レーザー強度を $4 \times 10^{16}$  W/cm<sup>2</sup>から $1 \times 10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>に変化させ励起強度依存性を評価した。その結果、1 psの励起レーザーパルス幅を除き100 keV以下での電子発生量とスペクトルのスロープは励起レーザーパルス幅に対し非常に弱い依存性を持つこと、また200~400 keV付近においてレーザー強度の増加と共にハンプ構造の出現などの著しい変化を認めた。特にこのハンプ構造は $2.5 \times 10^{17}$  W/cm<sup>2</sup>以上で出現し、準単色様の構造を持つことが明らかとなった。

一方、空間分布についても評価した。図3に励起レーザー強度に対する40 keV以上のエネルギーでの発生電子の発散を示す。電子の空間分布はレーザー光の照射を避けるためAl 12 μmフィルタでカバーされたイメージングプレート (Fujifilm BAS SR) を用いて測定した。その結果、数10keVの弱いバックグラウンド電子エネルギーに含まれる形で、半角で約30 mradの非常に低いビーム発散角を観測した。この発散角の励起レーザー強度に対する依存性は非常に弱く、キャピラリーチューブの視野角( ~25 mrad (は半角))に近い。過去の類似研究において、X線管からのX線のコリメートをキャピラリーチューブアレーを使って実証しており、同様のメカニズムの介在が考えられる。これらの得られた電子線のスペクトルと発散角から電子ビームの発生量を評価することができる。その結果、40keV以上のエネルギーで約 $10^6$ 個もしくはサブpC程度の電子ビームが発生していることが分かった(図4)。

更に、このような条件でのレーザー光透過率は、キャピラリーアレープレート挿入あり/なしでそれぞれ5ショットずつ計測したところ、最大励起強度において従来の1/6に相当する5.1%まで低減出来ることが分かった。このデータの分散量は何も置かない場合は $\approx 4.2\%$ である一方、キャピラリーアレープレートを置いた場合は $\approx 4.0\%$ であることから安定的にレーザー光が吸収されていることを示している。このように、提案した手法の基礎となる抑制のための技術開発を確立できた。

#### 参考文献

[1] K. Huang, T. Esirkepov, J. K. Koga, H. Kotaki, M. Mori, Y. Hayashi, N. Nakanii, S. V. Bulanov, and M. Kando, Scientific Reports 8 2938 (2018): "Electro-optic spatial decoding on the spherical-wavefront Coulomb fields of plasma electron sources"  
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21242-y>

[2] M. Mori, E. Barraza-Valdez, H. Kotaki, Y. Hayashi, M. Kando, K. Kondo, T. Kawachi, D. Strickland, and T. Tajima, AIP Advances 14 035153 (2024): "Experimental realization of near-critical-density laser wakefield acceleration: Efficient pointing 100-keV-class electron beam generation by microcapillary targets"  
DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0180773>

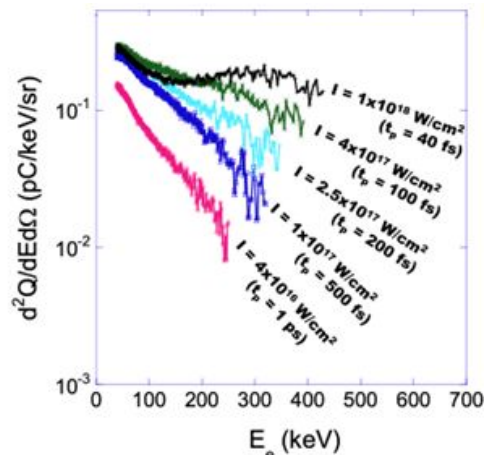


図2 発生した電子ビームのエネルギースペクトル。[2].

に含まれる形で、半角で約30 mradの非常に低いビーム発散角を観測した。この発散角の励起レーザー強度に対する依存性は非常に弱く、キャピラリーチューブの視野角( ~25 mrad (は半角))

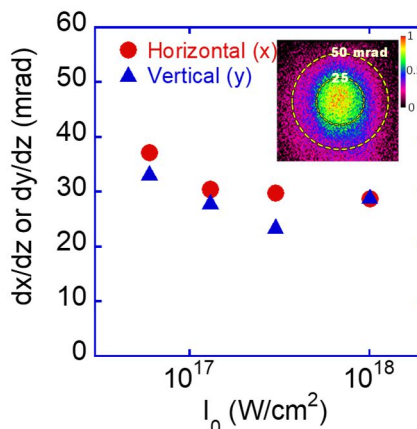


図3 発生した電子ビームの角度分布の励起強度依存性( $E > 40$  keV)[2].

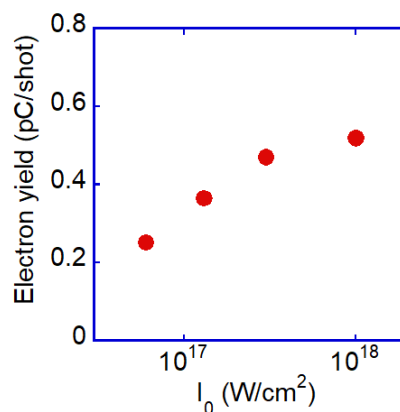


図4 電子ビーム発生量のレーザー強度依存性[2].

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 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Mori Michiaki, Barraza-Valdez Ernesto, Kotaki Hideyuki, Hayashi Yukio, Kando Masaki, Kondo Kiminori, Kawachi Tetsuya, Strickland Donna, Tajima Toshiki	4. 巻 14
2. 論文標題 Experimental realization of near-critical-density laser wakefield acceleration: Efficient pointing 100-keV-class electron beam generation by microcapillary targets	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 035153 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0180773	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 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Michiaki Mori
2. 発表標題 Recent Development Activities of Energetic Ion Source Driven by High-intensity Laser Toward Heavy Ion Therapy at QST
3. 学会等名 OSA Laser Congress 2021（招待講演）（国際学会）
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

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 超高速顕微鏡	発明者 森道昭 他	権利者 量子科学技術研究開発機構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-032770号	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------