

レーザー航跡場加速を用いた超高速電子線回折

ULTRAFAST ELECTRON DIFFRACTION IMAGING USING LASER WAKEFIELD ACCELERATION

岩佐健太^{A)}, 細貝知直^{B),C)}, 益田伸一^{B),C)}, 中新信彦^{B),C)}, 金展^{B)}, 水田好雄^{A)}, ジドコフアレクセイ^{B),C)}, ナビーンパサック^{B)}, 竹口直樹^{A)}, 末田敬一^{B)}, 佐野智一^{A),B)}, 荒河一渡^{F)}, 神門正城^{E)}, 兒玉了祐^{A),B),D)}, Kenta Iwasa^{A)}, Tomonao Hosokai^{B),C)}, Shinichi Masuda^{B),C)}, Nobuhiko Nakanii^{B),C)}, Jin Zhan^{B)}, Yoshio Mizuta^{A)}, Zhidkov Alexey^{B),C)}, Naveen Pathak^{B)}, Naoki Takeguchi^{A)}, Keiichi Sueda^{B)}, Tomokazu Sano^{A),B)}, Kazuto Arakawa^{F)}, Masaki Kando^{E)}, Ryosuke Kodama^{A),B),D)}

^{A)} Graduate School of Engineering, Osaka University

^{B)} Photon Pioneers Center, Osaka University

^{C)} Japan Science and Technology Agency (JST), CREST

^{D)} Institute of Laser Engineering, Osaka University

^{E)} Kansai Photon Science Institute, Japan Atomic Energy Agency

^{F)} Department of Physics and Materials Science, Shimane University

Abstract

Laser Wakefield Acceleration (LWFA) is expected as a high quality electron source for the ultrafast electron imaging thanks to its characteristics. We obtain the low divergence electron beam using LWFA which has the pointing stability as good as 0.3 mrad(rms) and controllability of the electron beam direction by control of the plasma condition. Furthermore we have also succeeded to develop quasi-monoenergetic electron beams using the staged LWFA driven by two coaxial laser pulses. For the electron diffraction imaging, the beam transport line has been made and we can focus the electron beam with 0.1 mm or less in diameter using the Quadrupoles magnets.

1. はじめに

レーザー航跡場加速(Laser Wakefield Acceleration : LWFA)は高強度レーザーによって励起されたプラズマ波による粒子加速法であり、100GeV/m を超える非常に高い加速勾配を持ち、THz オーダーのプラズマ波で粒子を加速し、プラズマから直接電子を取り出すことから、大電荷(~nC)かつ極短パルス(~10fs)の高エネルギー電子ビームの生成が可能である。こうした特徴から、物質の高速過渡現象を観測するための超高速電子線回折に用いる高品質な極短パルス電子源への応用が期待されている。超高速電子イメージングにおいて、発生する電子の安定性、再現性は重要であり、またエネルギー幅の小さい電子ビーム

が必要とされている。しかし、従来のレーザー航跡場加速によって得られる電子ビームは比較的広がったエネルギーを持ち、また位置安定性、再現性にも課題があった。

これまで、プリフォームドプラズマを外部磁場の印加によって制御することで高強度レーザーパルスの伝搬を制御し、低ダイバージェンスかつ高い位置安定性を持つ高エネルギー電子ビームの発生に成功し、さらにその発生方向の制御を可能とした。また、イメージング用ビームラインを構築し、発生した電子ビームの輸送、さらに四重極電磁石による収束に成功した。Fig.1 にレーザー駆動電子源による超高速電子線回折の概略図を示す。レーザー駆動電子源における安定な電子発生及びイメージングに向けた電子輸送系について報告する。

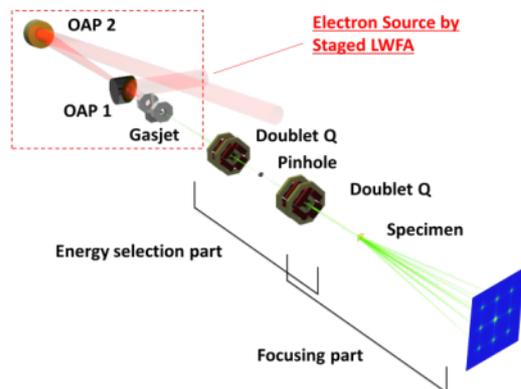


Figure 1: Setup of LWFA for Electron Imaging.

2. レーザー航跡場加速を用いた電子源開発の現状

2.1 プラズマオプティクスを用いた安定な電子発生

これまで、レーザー航跡場加速はプラズマを加速媒体にすることから、電子ビームの再現性の確立が課題とされてきた。しかし、プラズマに光学素子の機能を持たせて高強度レーザーパルスの伝搬を積極的に制御することで安定な電子発生が可能となる。一般に、CPA (Chirped Pulse Amplification) 法を用いて生成された高強度極短パルス(~10fs)の前方には

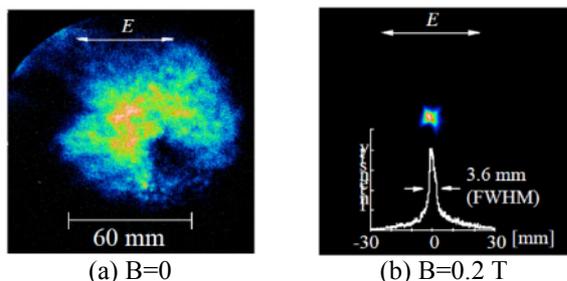


Figure 2: Electron beam profile at 0.4 m from electron source.

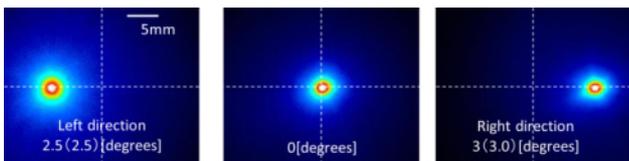


Figure 3: Direction control of electron beam by external magnetic field(B=0.2 T).

ns~ps オーダーのプレパルスが存在し、これによってガス標的がプラズマ化し、プレプラズマ(プリフォームドプラズマ)が形成される。高強度のメインパルスはプレプラズマの作る屈折率勾配によって回折することで集光強度が低下し、集光プロファイルも悪化する。これによって、LWFA によって発生する電子ビームの電荷量の低下し、プロファイル、再現性も悪化する。しかしながら、これまでの研究で外部磁場(B~0.2 T)を集光点付近に印加することでプレプラズマの形状を制御し集光オプティクス機能を持たせることによって、メインパルスの回折を抑制し、LWFA による電子発生安定化に成功している[1]。ここで、磁場を印加しない場合と磁場を印加した場合の電子の典型的な空間プロファイルを図2(a), (b)に示す。図2(a), (b)に示されるように、磁場の印加によって非常に指向性の高い電子ビームが発生する。また、磁場を印加した場合、発生するビームは±0.3 mrad の位置安定性を達成した。さらに、プレプラズマに光ファイバーと同様の光導波機能が付加し、長尺のプラズマチャンネル中でレーザー航跡場を励起することで、準単色電子の生成も確認されている[2][3]。プレプラズマの形成はコントラスト比に大きく依存する。したがって、発生する電子ビームのプロファイル、安定性はコントラスト比に大きく影響を受ける。レーザーのコントラスト比を最適化することで、発生する電子ビームのさらなる安定化が期待できる。

2.2 多段レーザー航跡場加速

一般にプラズマ波破碎によって発生する電子は熱的な広いエネルギー幅を持つ。これは電子線回折に応用するうえでの問題点である。これに対して、多段加速方式を利用した位相回転によるエネルギー幅

の狭帯域化が提案されている。多段加速とは電子入射器からの電子を独立した複数の航跡場によって段階的に加速する手法であり、前段の航跡場で発生させた電子を後段の航跡場に入射させ追加速を行う。航跡場の適切な位相空間に電子を入射することで、低エネルギー成分は加速、高エネルギー成分は減速されることにより電子ビームのエネルギーを狭帯域化する(位相回転)。

多段加速による電子発生実験はFig.4に示す体系で行った。メインパルスをビームスプリッターで分割し、単焦点 OAP(F/3.5)および長焦点 OAP(F/20)によってガス標的に集光する。ここで、単焦点パルスによって前段の電子発生用航跡場、長焦点パルスによって後段の追加速用航跡場を生成する。ガス標的は He ガスを用い、プラズマ密度 $\sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$ で実験を行った。発生した電子は後段の Energy Spectra Meter:ESM に入射されエネルギー分解される。

プローブパルスによるレーザーの集光点付近のシャドウイメージ、またFig.4において紙面手前方向より観測したトムソン散乱光のイメージをそれぞれFig.5(a), (b)に示す。Fig.5(a)に示すように、短焦点パルスの集光点の後方に長焦点パルスによるチャンネルの形成が見られた。また、Fig.5(b)において、トムソン散乱の強い発光の後方に長尺の散乱光が確認でき、前段の発光よりプラズマ波破碎による電子入射、後段の発光より長焦点パルスによる追加速用航跡場が発生していることが裏付けられる。また、ESM によって観測された発生した電子のエネルギースペクトルを Fig.5(c)に示す。Fig.5(c)に示すように、多段加速によって生成された電子ビームの準単色性が確認された。ここで 2 つのパルスの入射タイミングを変化させることで発生する電子のエネルギーが変

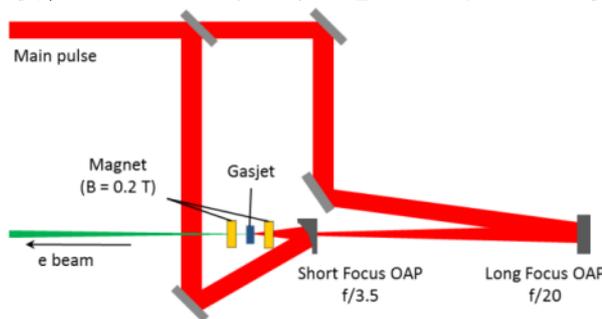


Figure 4: Setup of the staged LWFA.

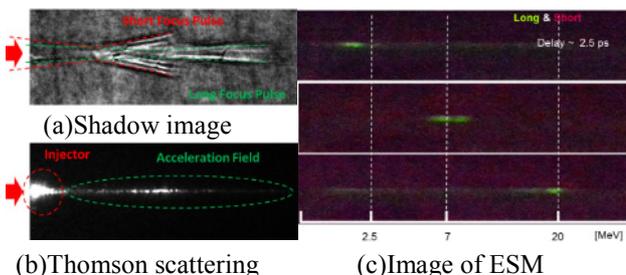


Figure 5: Profiles of Staged LWFA.

化した。これらの結果より、前段の航跡場で生成された入射電子の後段の航跡場での追加速が確認された。さらに、入射電子の後段の航跡場への入射タイミングを制御することで、発生する電子ビームのエネルギーを制御することが可能である。

3. 超高速電子線イメージングにむけた電子輸送系

電子線回折に向けて、プラズマチャンバーにおいて発生した電子をレーザー軸上に輸送する加速器ビームラインを構築した。構築したビームラインをFig.6に示す。このビームラインを用いて、発生した電子ビームの輸送実験を行い、ビームライン最下流(~7 m)への電子輸送に成功した。加えて、ビームライン上の四重極電磁石を用いて電子の収束実験を行った。四重極電磁石による電子の収束はエネルギーによってその収束角が異なるため、収束点にピンホールを置くことでエネルギーの選別が出来る。四重極電磁石によってビームライン最下流

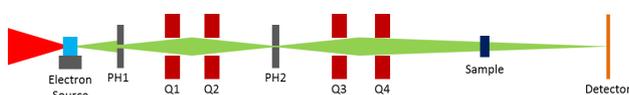
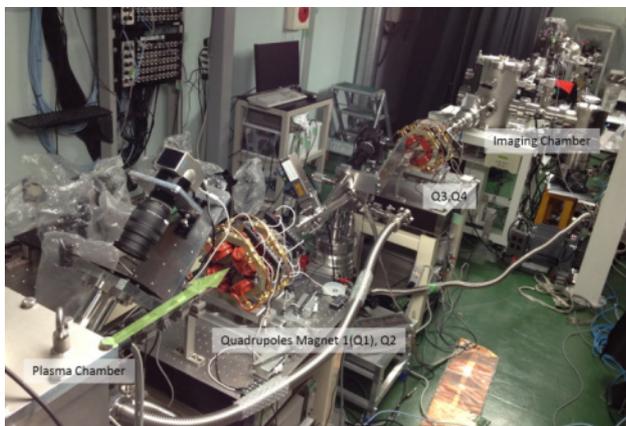


Figure 6: Electron beam line.

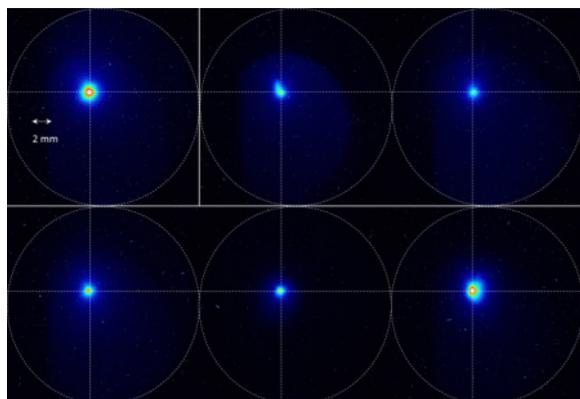


Figure 7: Pointing stability of electron beam focused by Q1 and Q2 at 6.5 m from electron source.

に収束された電子の空間プロファイルを図.7に示す。ここで、輸送された電子ビームは~1 mm (FWHM)以下に収束された。これによって、発生した電子のエネルギー選別および準単色電子ビームによる超高速電子線回折実験が可能となった。また、多段加速による位相回転によって発生した準単色電子をこの手法を用いて輸送することで、大電荷かつ単色の電子ビーム源としての応用が期待できる。

4. まとめ

レーザー航跡場加速はその高いポテンシャルから次世代の加速器、電子源として期待されており、我々は超高速電子線回折に用いる極短パルス電子源としての応用を目指して研究を進めてきた。レーザー航跡場より生じる電子ビームはその位置安定性、再現性に問題があったが、外部磁場によってプレプラズマを制御することで±0.3 mrad(FWHM)の位置安定性を持つ、再現性の高い電子の発生が可能となった。また、電子入射と追加速を独立に行う多段レーザー航跡場加速実験を行い、MeV オーダーの準単色電子の発生が確認された。加えて、構築した加速器ビームラインにおいて電子ビームの~7 m 下流への輸送に成功し、さらに四重極電磁石を用いて 1 mm 以下に収束した。これらの成果によって、電子のエネルギー選別および電子線回折実験が可能となり、現在実験を進めている。

参考文献

- [1] T. Hosokai, et al., "Effect of External Static Magnetic Field on the Emittance and Total Charge of Electron Beams Generated by Laser-Wakefield Acceleration", Physical Review Letters, vol. 97, 075004 1-4(2006).
- [2] T. Hosokai, et al., "Electron energy boosting in laser-wakefield acceleration with external magnetic field $B \sim 1$ T and laser prepulses", Applied Physics Letters, Vol. 96, 121501(2010).
- [3] Y. Mizuta et al., "Splash plasma channels produced by picosecond laser pulses in argon gas for laser wakefield acceleration", Physical Review Special Topics – Acceleration and Beams 15, 121301(2012)