

実用加速器を目指したステーシングレーザー航跡場加速

STAGING LASER WAKEFIELD ACCELERATION RESEARCH

AT PRACTICAL ACCELERATORS

細貝知直^{A,B)}, 益田伸一^{B)}, ジドコフ アレクセイ^{B)}, パサク ナヴィーン^{B)}, 大塚崇光^{B)}, 中村隆浩^{A)}, 末田敬一^{B)}, 金展^{B)}, 田口雄基^{A)}, 大迫浩幹^{A)}, 中新信彦^{D)}, 兒玉了祐^{A,B,C)}

Tomonao Hosokai^{A,B)}, Shin-ichi Masuda^{B)}, Alexei Zhidkov^{B)}, Naveen Pathak^{B)}, Takamitsu Otsuka^{B)}, Takahiro Nakamura^{B)}, Keiichi Sueda^{B)}, Zhang Jin^{B)}, Yuki Taguchi^{A)}, Koki Osako^{A)}, Nobuhiko Nakanii^{D)}, and Ryosuke Kodama^{A,B,C)}

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

^{B)} Photon Pioneers Center, Osaka University

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

^{D)} Kansai Photon Research Institute, National Institute for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

Abstract

Laser wake-field acceleration (LWFA) is expected to be basis for a novel technology allowing to downsize GeV-class high-energy particle accelerators into tabletop-size due to ultra-high-gradient acceleration fields in laser driven plasma waves. Nowadays, the topmost goal of LWFA researches is beam control and repeatable/stable generation on a state of the art level of conventional accelerators. In this paper, updated achievements of our recent activity at ImPACT-UPL program on the staging LWFA aiming at practical accelerator devices are summarized.

1. はじめに

1970年代に提案されたレーザー航跡場加速(Laser Wakefield Acceleration: LWFA)である[1]が,当初目標とされた準単色電子発生やGeV級加速などの原理実証は既に達成された.欧米アジアではマルチペタワット級の大型レーザー施設の建設が進められ,さらなる高エネルギー加速への挑戦が試みられている.一方で,実用的なコンパクトな高エネルギー加速器を目指した安定かつ再現性の高いレーザー加速への関心も高まりつつある.日本ではレーザー加速電子駆動X線自由電子レーザー(XFEL)の実現を最終目標とした要素技術開発研究が内閣府の革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)のもとで開始された.レーザー加速研究はこれまでの原理実証から一歩進み実用化を目標とした研究へとシフトしつつある.

本講演では,現在著者らがImPACT-UPLプログラムのもとレーザー航跡場加速の実用化を目指して取り組んでいるステーシング加速の要素技術開発とその状況について報告する.

2. ステーシングレーザー航跡場加速

高強度レーザーパルスの電磁場で電子を加速するためには,高強度レーザーパルスとプラズマの相互作用で励起される電子プラズマ波(レーザー航跡場)

の超高電場を利用する.まず,超短パルスレーザー光をガスに集光して $10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$ 程度の強度にするとレーザーパルスの後方に航跡場(ウエーク)が励起される.航跡場振動は位相速度がレーザーパルスの群速度(ほぼ光速)に等しい縦波であり,この電子密度の疎密によって生ずる加速電場に電子を捕捉して加速する.

一般的な自己入射方式のLWFAにおいては1つのレーザーパルスで励起された1つのレーザー航跡場の中で電子の入射と加速を連続的に行う.しかしながら,電子ビームパラメータを精密に制御するためには,従来加速器と同様に加速場の適切な位相への正確な電子入射が必要である.この理由から,電子入射器用のレーザー航跡場と加速管用のレーザー航跡場を(同期した複数のレーザーパルスの照射で)独立に生成する多段(ステーシング)レーザー航跡場加速を提案する.ImPACT-UPLプログラムにて計画中の三段のステーシングレーザー航跡場加速の例をFig.1に示す.上流のレーザー航跡場の波破碎で生成した電子バンチを下流の位相回転および追加速レーザー航跡場に入射し単色化と追加速を行う.上流のレーザー航跡場で生成した低エミッタンス極短電子バンチを下流のレーザー航跡場の適切な位相空間に正確に入射すると,位相回転によって電子エネルギースペクトルの狭帯化が起こる.数値計算(Fig.2)では,典型的なプラズマ波破碎による電子バンチの熱的なスペクトル(一点鎖線)が下流の追加速レーザー航跡場の適当な位相 ϕ [rad]への入射で狭帯化(実線)するこ

nobu.nakanii@ppc.osaka-u.ac.jp

とが確認されている[2]. また,追加速航跡場の数を増やし直列に配置することによってさらなる高エネルギーまで電子を加速することが可能になる.

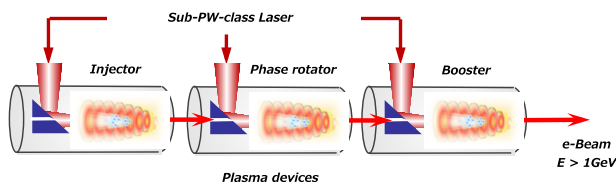


Figure 1: Typical configuration of staged LWFA.

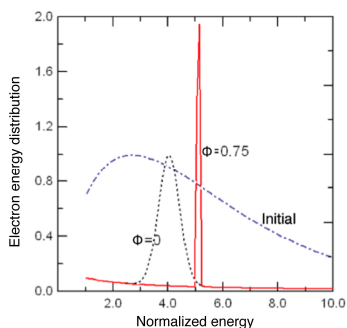


Figure 2: Energy spectrum narrowing of injected electron bunch by phase rotation effect in a boosting wake-field.

3. レーザー航跡場加速器の開發現状

3.1 電子入射器

近年, プラズママイクロオプティクス(PMO: Plasma Micro Optics)と呼ばれるプラズマ光導波技術の開発[3-5]によって, LWFAの電子ビームの品質, 安定性, 制御性が飛躍的に向上した(詳細は文献[3-5]に譲る). PMOは光ファイバーやレンズと同様のウェーブガイド機能や集光機能を持ち, TW級のハイパワー領域のレーザー光にも使用可能なプラズマで作られた光学素子である[5].⁹⁾ PMOはガス標的のレーザー集光点付近にレーザー軸方向の磁場を印加し, さらにドライバーレーザーのプレパルスの強度・形などを精密に調整することで形成する[3-5].

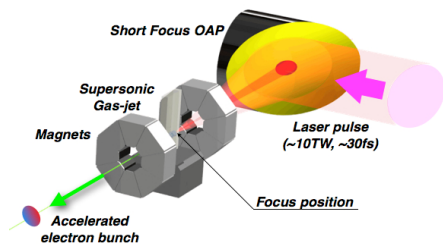


Figure 3: Experimental set up for LWFA injector

Fig.3 にレーザー航跡場電子入射器の実験配置を

示す. 真空容器中にシート形状の超音速ヘリウムガスジェット標的を挟むように二つの永久磁石を配置し, ガスジェット内のレーザー伝播軸方向に約0.2Tの磁場を印加する. リング状磁石の中心穴を通して高強度レーザーパルス(〜20TW, ∼25fs)を標的ガス上に集光する. Fig.4に電子ビーム連続6ショットの空間プロファイルを示す. PMOを形成した場合の電子ビームの指向性は非常に高く, 横方向幾何学的エミッタンスは $0.02\pi\text{mm mrad}$, 位置安定性は $\pm 200\mu\text{rad}(\text{rms})$ 以下, 総電荷量は1nCを越える.(詳細は文献[3,5]を参照). さらに, PMOを用いた電子ビームの正確なステアリング(方向操作)法も確立した.⁶⁾ このステアリング法はエネルギースペクトルが熱的に広がっている(有効電子温度 $\sim 25\text{MeV}$)入射器からの電子ビームにも有効で, 高い指向性を維持したまま方向を高い精度で操舵することが可能である(Fig.6).(詳細は文献[6]を参照) さらに, 最近, エネルギースライス技術を導入し極めて再現性の高い準単色入射電子発生($\Delta E/E$ 数 $\sim 1\%$)を実現した.

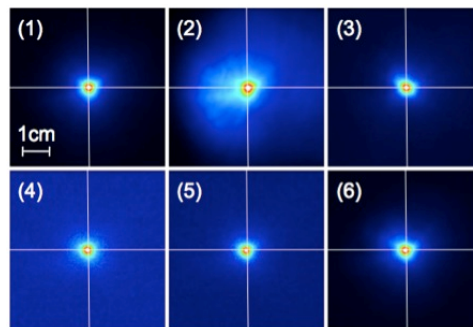


Figure 4: Electron beam profiles of 6 successive shots.

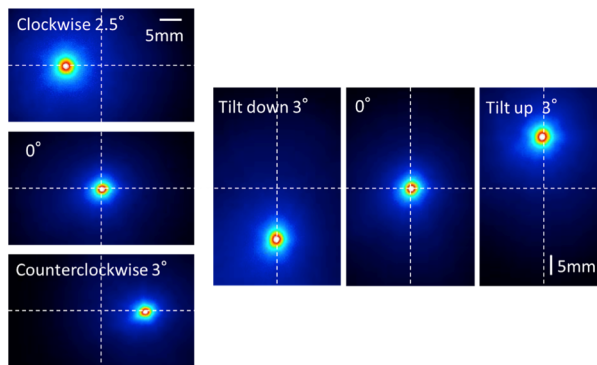


Figure 5: Steering of electron beams by PMO.

3.2 二段ステージング加速

研究開発当初は, 多段 LWFA の原理実証に2つのPMO(前段にコーン形状³⁾, 後段に長尺中空ファイバー形状⁵⁾)と一つの駆動10TW級レーザーパルスで実施された.⁴⁾ 各PMOの中で励起されるレーザー航跡場がそれぞれ電子入射器と追加速管の役目を負う. この実験で, 電子ビームは高い指向性と安定性を

維持したままビームの追加速（チャンネル長～2 mm で～100MeV）と位相回転による準単色化($\Delta E/E < 10\%$)を同時に達成し電子入射器を用いた多段 LWFA を世界で初めて実証した[4].

しかしながら、電子ビームのエネルギースペクトルを自在に操るためには、同期のとれた複数のレーザーパルスで各々のレーザー航跡場を独立に駆動し電子入射の位相制御を正確に行うことが必要である.

次のステップとして二つのレーザーパルスで駆動する二段レーザー航跡場加速装置にアップグレード (Fig. 6) し原理実証を行った. 二つのレーザーパルスの同期条件を変え入射電子の追加速航跡場への入射位相を制御する事により電子ビームのエネルギースペクトルを 2～300MeV（準単色）の範囲で制御することに成功した.



Figure 6: Staging LWFA beam-line at Osaka university.

4. まとめ

超小型 GeV 電子加速器の実現を目指すレーザー航跡場加速器開発取り組みとの現状について報告する. 再現性の高い LWFA を目指し PMO を開発した. これによって、これまで不安定で制御が困難であった LWFA がようやく制御可能な電子加速法となりつつある. この PMO によるビームの安定化技術をベースにビームステアリングなどレーザー加速器が実用化に近づくための技術開発も進めている. そして、それらのキーコンポーネントを集結して GeV 級多段 LWFA 開発を開始した.

謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) により、科学技術振興機構を通して委託されたものです.

参考文献

- [1] T. Tajima and J. M. Dawson, Phys. Rev. Lett. 43, (1979) 267.
- [2] T. Hosokai, S. Masuda, N. Nakanii *et al.*, Proc. of Int. Conf. on High Energy Density Sciences 2012 (2012) HED-6-4.
- [3] T. Hosokai, K. Kinoshita, A. Zhidkov *et al.*, Phys. Rev. Lett. 97, (2006) 075004.
- [4] T. Hosokai, A. Zhidkov, A. Yamazaki *et al.*, Appl. Phys. Lett. 96, (2010) 121501.
- [5] Y. Mizuta, T. Hosokai, S. Masuda *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams. 15, (2012) 121301.
- [6] N. Nakanii, T. Hosokai, K. Iwasa *et al.*, Phys. Rev. ST, Accel. Beams. 18, (2015) 021303.