

Study on Laser-Plasma Driven Electron Acceleration at Univ. of Tokyo

Tomonao Hosokai^{1,A)}, Kenichi Kinoshita^{A)}, Alexei Zhidkov^{B)}, Masaki Kando^{C)},
Hideyuki Kotaki^{C)}, Kazuhisa Nakajima^{C)}, and Mitsuru Uesaka^{A)}

A) Nuclear Professional School, University of Tokyo
22-2 Shirane-shirakata, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1188

B) Department of Accelerator Physics and Engineering, National Institute of Radiological Sciences
4-9-1, Anagawa, Inage, Chiba, 263-8555

C) Advanced Photon Research Center, Kansai Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute
8-1 Umemi-dai, Kizu, Soraku, Kyoto, 619-0215

Abstract

Recently, it is strongly required to develop ultra-short electron beam sources for ultra-fast material and biological sciences. The laser wake-field acceleration (LWFA) provides one of the most promising approaches. In this paper, updated achievements of generation of ultra-short electron bunch by wave-breaking scheme of LWFA are summarized. We describe latest results of plasma cathode experiment in Univ. of Tokyo, including shingle-shot measurements, quasi-mono-energy spectra, pre-pulse control, wave-free supersonic gas-jet, and capillary plasma wave guiding.

東京大学原子力専攻におけるレーザープラズマ電子加速研究

1. はじめに

材料科学や生体科学分野における物質の高速過渡現象の動的物性研究は近年急速に展開し、要求される時間領域はピコ秒からフェムト秒へと移行しつつある。これにともない、計測手段としてのフェムト秒オーダー極短電子パルスビーム源の研究が重要となっている [1]。このような背景から、従来加速器では発生困難であった極短時間領域をカバーするコンパクト、高エネルギー、フェムト秒パルスの高品質な多目的極短パルス電子源としてのレーザープラズマ電子加速 (Laser Wake-Field Acceleration: LWFA) が有望視されている。従来、LWFAでは入射器に高周波加速器が用いられていたが、超短パルス超低エミッタンスの電子ビーム入射器の必要性が認識され、近年は、レーザープラズマカソードと呼ばれる超短パルスレーザーを用いた電子入射法による第二世代のLWFAの研究が世界各国で進められている。本稿では、我々が東京大学大学院原子力専攻にて行ってきたレーザープラズマ電子加速に関する研究について報告する。

2. レーザープラズマカソード

2.1 原理

臨界密度以下のプラズマ中に入射された高強度超短レーザーパルスの後ろにはレーザーパルスのポンデロモーティブ力によって大振幅のプラズマ波 (航跡場) が励起される。このプラズマ波の持つ加速勾配は $\sim 100\text{GV/m}$ にも及び、またプラズマ波長は (密度

$10^{18}\sim 10^{19}\text{cm}^{-3}$ に対して) $10\sim 100\mu\text{m}$ 程度、になる。したがって、プラズマ波で加速される電子は加速長が $100\mu\text{m}$ 程度であっても数十MeV以上のエネルギーまで加速され、またフェムト秒オーダーの極短バンチになる。RF加速器を入射器に用いないレーザープラズマカソードでは、外部からの電子入射無しにプラズマ中のバックグラウンド電子を非線形プラズマ波中に捕獲して加速しなければならず、航跡場への電子入射 (捕獲) にプラズマ波破碎を利用する。相対論的なプラズマにおいて、プラズマ波は振幅が大きい値 $E_B \sim [2(\omega/\omega_{pl}-1)]^{1/2}mc\omega_{pl}/e$ を越えると破碎する [2]。ここで ω 、 ω_{pl} は、それぞれレーザー、プラズマ振動数である。このプラズマ波の破碎は $\lambda_{pl}dN/dx \sim 1$ 、 $\lambda_{pl}=2\pi c\omega_{pl}/c$ で示されるような急峻な密度勾配があるときにはこの密度境界で発生する。(ただし、 λ_{pl} はプラズマ波の波長、 N はプラズマ密度である。) したがって、この方法では一つのレーザーパルスで電子の入射と加速の両方を行うことになる。まず急峻な密度境界を持つプラズマに a 値が 1.0 を越える集光条件でレーザーパルスを入射しプラズマ波を励起する。励起されたプラズマ波は急峻な密度境界で破碎すると同時に、捕獲されていたプラズマ電子が下流のプラズマ波の加速位相に入射される。

2.2 実験

図1に実験配置の概略を示す。超音速ガスジェット装置を真空容器内に設置し、噴射した超音速ヘリウムスリットジェットにチタンサファイアレーザー (最大12TW、40fs 中心波長790nm、プレパルスのコ

¹ E-mail: hosokai@utnl.jp

ントラスト比 $\sim 1:10^{-6}$)を強度 $I \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ Wcm}^{-2}$ で集光する。レーザー照射によってガスジェットから発生する電子の空間分布はガスジェット下流方向に設置されたDZRフィルムで可視光に変換されCCDカメラで検出された。エネルギースペクトルはダイポールマグネットで、電子ビームのチャージ量はICTカレントトランスフォーマーを用い計測した。レーザーパルスをもとに1/100程度切り出しプローブパルスとして用い、プラズマのシャドウグラフィイメージ、シュリーレンイメージ、干渉イメージを $\sim 40\text{fs}$ の時間分解能で取得した。これらの計測を同時に行うことによって、ビームのプロファイル、エネルギースペクトル、プラズマのダイナミクスをシングルショットで、一度に取得することを可能とした。

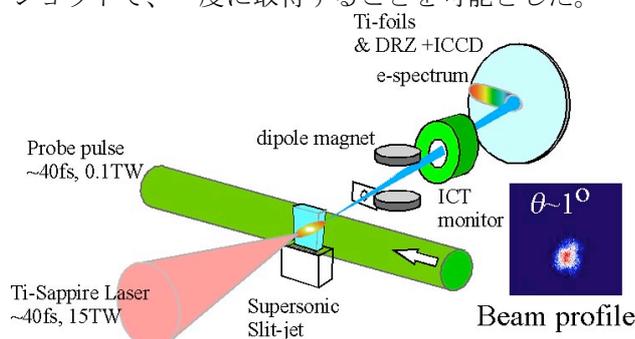


図1 レーザープラズマカソード実験配置図典型的な電子ビームのプロファイルに合わせて示す。

これまでに、レーザーパルスの大きさや形を制御することにより、指向性の良い(横方向幾何学的エミッタンス $0.1\pi \text{ mm mrad}$)電子ビームの発生に成功し、プラズマキャビティー端(衝撃波フロント)でのプラズマ波破碎による電子入射スキームが実験で確認されている[3, 4]。図2にプラズマを横方向から観測したシャドウグラフィ、典型的なシュリーレンイメージ、干渉計イメージを示す。フォーカスポイントではプレプラズマキャビティーが形成され、下流ではプラズマチャネルが形成されていく様子が見られるシュリーレンイメージではチャネルがブレイクする様子が明確に表れている。これらのデータをPIC計算[5]と詳細に比較検討し、解析していくことによってプラズマのダイナミクスを解明していくことができる。エネルギースペクトルは典型的には100%広がりを持っているが、プレパルスの条件や密度分布の条件によっては準単色のピークも観測されている。図3に実験で得られた準単色のエネルギースペクトルを示す。正確な照射条件および、密度パラメータの制御によって、プラズマ波破碎のポジション制御によってエネルギースペクトルにピークを作ることが実験で確認されているこの場合、発散角 ~ 1 度の電子ビームの持つ電荷量は $\sim 8\text{pC}$ であった。

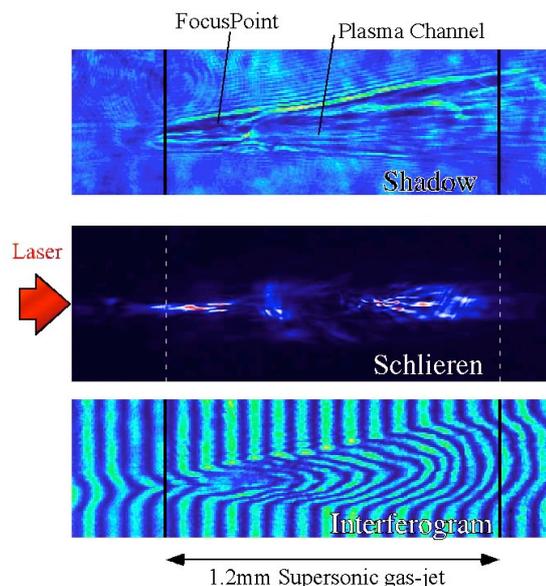


図2 シングルショットプローブ計測で得られたプラズマのイメージ(上から、シャドウグラフィ、シュリーレン写真、干渉縞イメージ)

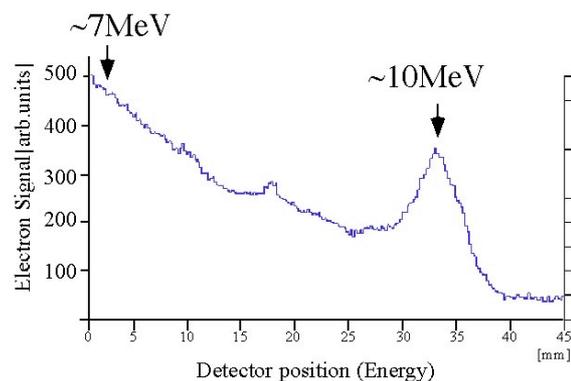


図3 実験で得られた準単色のエネルギースペクトル

3. 要素技術開発

プラズマカソードによる高品質極短電子パルス源の実現には、レーザーパルス効果、レーザーの伝播過程、などプラズマダイナミクスを含めた粒子加速機構の詳細にわたる理解がキーポイントになる。そのためには、良く定義された条件での実験結果と精度の高いシミュレーション結果との定量的な比較検討が必要不可欠である。良く定義された実験のためには、安定で高コントラストなレーザーパルスの供給はもとより、ターゲットの超音速ガスジェット、プラズマ光導波路など基本的な要素技術の開発を着実に進めていく必要がある。

3.1 レーザーパルスによる密度分布の制御

プラズマ波破碎に必要な急峻な密度境界の形成にレーザーパルスを積極的に利用する方法を提案し、実験において確かめられた[3, 4]。CPAレーザー装置から発生するフェムト秒レーザーパルスの裾野

にはナノ秒オーダーのプレパルスが存在する。フェムト秒レーザーパルスとプレパルスのコントラスト比は典型的に $1 : 10^{-6} \sim 10^{-7}$ 程度であるが、プレパルスはそのパルス幅の長さから、メインパルスの10-20%程度のエネルギーを持つ。レーザ長 L_R が短い (焦点距離が短い) 集光光学系を用いる場合、焦点付近 $Z_R = Cs\tau \gg L_R$ の領域 (ただし、 Cs はプラズマ中の音速、 τ はプレパルスのパルス幅とする。) に周囲よりも密度の低いキャビティ (空乏領域) が形成される。これは、プレパルス照射といえども集光強度 I が 10^{13} W/cm^2 を越えるため焦点 ($Z_R=0$) 付近のガスが急加熱され衝撃波が駆動されるためである。結果として、伝播する衝撃波のフロントにはプラズマが雪かき的に集められ密度が急峻化する。衝撃波のフロント部分の厚さ Δz は $\Delta z \sim (M/m)^{1/2} l_i$ で与えられプラズマ波の波長 λ_{pl} よりも小さい。(ただし、 M と m はそれぞれ、イオンと電子の質量であり、 l_i はイオンの平均自由行程とする。) したがって、プレパルスによって駆動された衝撃波で急峻化したプラズマにメインパルスが入射しプラズマ波が励起されると、衝撃波のフロント部分で破碎が発生する。

3.2 超音速パルスガスジェット

高密度ガスジェットがレーザーパルスと並ぶ重要なコントロールパラメータである事は明白であるにも関わらず、十分な研究開発が行われてなかった。特性曲線法を用いた2次元急膨張スリットノズルの設計を行い内部密度分布の制御が可能で指向性が極めて高い超音速高密度ガスジェットを作り出した。ノズルの開発と同時に信頼性の高い高速パルスバルブ装置の開発に取り組み、150気圧のガスを $\phi 2$ ミリのオリフィスより、立ち上がり 150μ 秒かつ10Hzで噴射できるソレノイドバルブを開発した。これにより、超音速ガスターゲット生成における安定性を格段に向上させることができた。図4に典型的なガスジェットの干渉イメージを示す。

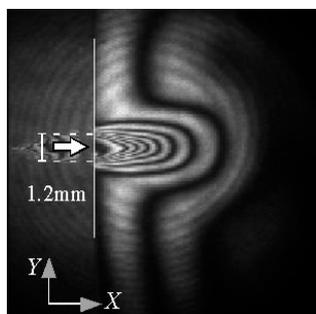


図4 典型的なガスジェットの干渉計測結果
無限縞 (フリンジは等密度線に対応している。)

3.3 プラズマ光導波路

レーザープラズマカソードの大きな問題として、加速電子のエネルギースペクトルがほぼ100%の広

がりを持っており、単色ビームを発生する従来の加速器の定義から大きく外れていることがあげられる。この問題に対して、プレチャンネル法によるプラズマ光導波路[6]を作り加速長を大きくすることにより、航跡場中の正しい加速位相に乗っている電子を支配的に加速しエネルギースペクトルにピークを作るという提案がある[7]。また、プラズマカソードの電子ビームのエネルギーゲインは現在、最大200MeV程度に留まっているが、さらに大きな加速エネルギーを必要とする場合にはレーザー光をガイディングすることにより長い加速長 (航跡場の長さ) を得るプラズマ光導波路が有効であるとされる。これまでに我々は、プラズマ光導波路の研究開発を行い、高速キャピラリーZピンチ放電の収縮プロセスで駆動される衝撃波によって形成される径 $\sim 50 \mu$ m以下プラズマの内部構造を利用し $1 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ の高強度超短パルスレーザーを回折距離の12.5倍に相当する2cmにわたって形成しガイドすることに成功している[8]。図5にキャピラリープラズマ導波路実験の概略とチャンネルガイドされたレーザーのプロファイルを示す。

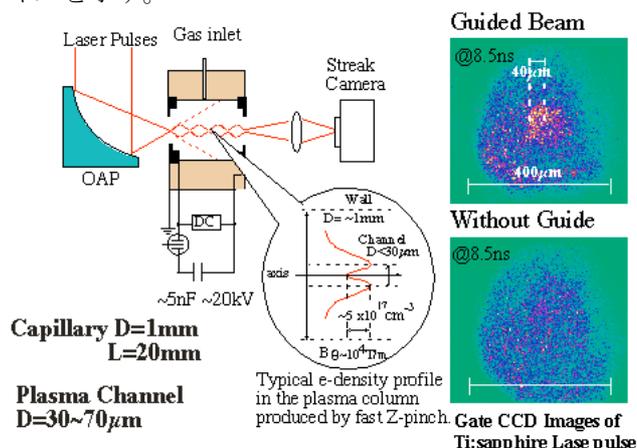


図5 キャピラリー放電プラズマ光導波路実験

参考文献

- [1] Y. Glenec, J.Faure, L.LeDain, T.Hosokai, *et al*, Phys. Rev. Lett. **94**, 025003 (2005)
- [2] S.V. Bulanov, *et al*, Phys. Rev.E **58**, R5257 (1998); S.V. Bulanov, *et al*, JETP Lett. **53**, 565 (1991)
- [3] T. Hosokai, K. Kinoshita, A.Zhidkov, *et al*, Phys. Rev. E. **67**, 036407(2003)
- [4] T. Hosokai, K. Kinoshita, A.Zhidkov, *et al*, Phys. Plasma. **11**, L57(2004)
- [5] A.Zhidkov, J. Koga, T. Hosokai, *et al*, Phys. Plasma. **11**, 5379(2004)
- [6] P. Sprangle, E. Esarey, J. Krall, *et al*, Phys. Rev. Lett. **69**, 2200 (1992)
- [7] M. Kando, *et al*, Proc. of Workshop on Beam Physics 1999, pp409-417 (1999)
- [8] T. Hosokai, M. Kando, H. Dewa, *et al*, Opt. Lett. **25**, 10 (2000)