DEVELOPMENT OF SPATIAL FILTER FOR PLASMA CATHODE EXPERIMENTS

N.YAMAOKA^{1A)}, T.OHKUBO^{A)}, T.HOSOKAI^{A)}, K.KINOSHITA^{B)}, K.NAKAMURA^{A)}, A.ZHIDKOV^{B)}, A.SAKUMI^{A)}, M.UESAKA^{A)} ^{A)}Nuclear Engineering Research Laboratory, School of Engineering, University of Tokyo 2-22 Shirakata-shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, JAPAN 319-1188 ^{B)}National Institute of Radiological Sciences 4-9-1 Anagawa, Inage, Chiba, Chiba, JAPAN 263-8555

Abstract

In order to improve the stability of generated electon-bunch in Laser-Plasma Cathode Experiments, I developed Spatial Filter in our 12TW-50fs Laser system and spatial profile of laser was brought close to ideal Gauss function. Generally, commercial Spatial Filter with pinhole form has low damage threshold and cannot be used within TW laser system. In order to prevent Spatial Filter from damage, I developed Spatial Filter with taper form that can be used within TW laser system.

レーザープラズマカソード実験のための空間フィルターの開発

1.はじめに

近年の極短時間領域での動的物性研究の発展に伴 い、フェムト秒オーダーの超短X線パルス発生装置 の需要が高まっている。我々は、フェムト秒X線パ ルスの発生源の開発を最終目的とした、レーザープ ラズマカソードを用いた極短電子バンチ発生源の研 究開発を進めている。これまでの実験では、指向性 の良い(0.1 mm-mrad)高エネルギー(40MeV)の電子 ビームの発生が確認され、レーザープリパルスの照 射よって形成されるプラズマキャビティによる電子 入射機構も明らかとなった。さらにPIC(Particle In Cell) シミュレーションでは40fsの電子バンチの発 生が示唆されている。指向性・再現性の良い電子バ ンチを安定に発生させるには、空間的に安定なプロ ファイルをもつレーザーが必要不可欠であることが、 これまでの研究で明らかになっている。本研究は高 強度超短電子バンチを安定に発生させるため、 12TW-50fs レーザーシステム内で使用可能な空間 フィルター(Spatial Filter; SF)を開発して、レーザー の空間プロファイルを向上させることを目的とする。

2. レーザープラズマカソード

レーザープラズマカソードとは、1つのレーザー パルスで入射と加速を同時に行なうレーザー航跡場 加速(Laser Wake-Field Acceleration; LWFA)である。 高強度レーザーをプラズマに集光(~ $10^{19}W/cm^2$)す るとプラズマ中の電子が動重力(Ponderomotive force) によって振動し、レーザーパルスの後方に数百 GV/mに及ぶ加速勾配をもつ航跡場が励起される。 入射電子はこの航跡場にトラップされることにより 加速される。加速電場の周波数は数十THzのプラズ マ周波数で決まるため、数十フェムト秒のパルス幅 の電子バンチを発生させることができる。しかしな がら、レーザー航跡場加速において航跡場への電子 入射が重要な問題となっている。線形加速器を用い た電子入射法においては、電子バンチのパルス幅は ピコ秒オーダーであり、入射電子とレーザー航跡場 の同期が難しく、フェムト秒オーダーの電子バンチ を安定に発生させることが困難である。そこで我々 は、航跡場へ電子入射に相対論的プラズマ波破砕を 用いている^[1]。相対論的なプラズマにおいて、プラ ズマ波はプラズマ波長オーダーで急峻に立ち上がる 密度勾配をもつとき、効率的に破砕する。このよう な密度勾配を形成するため、レーザープリパルスを 利用しプラズマ中の密度分布を制御している。図1 は、東京大学大学院原子力工学研究施設にあるチャ - プパルス増幅法(Chirped Pulse Amplification; CPA) を採用した12TW-50fsレーザーシステム概略図であ る。チャ-プパルス増幅法によるレーザーでは、自 然増幅光(Amplified Spontaneous Emission; ASE) や再 生増幅器の切り出し漏れによるナノ秒オーダーのプ リパルス(コントラスト比:約10-6、エネルギー: メインパルスの10~20%)が存在する。プリパルスの 照射によりプラズマ中に衝撃波が駆動され、急峻な 密度勾配をもつプラズマキャビティが形成され、破 砕現象により電子が入射される。



図2は、レーザープラズマカソード実験において ガス中に照射したレーザープロファイルとそれによ り形成されたプラズマジェット及び発生した電子を 示す。(a), (b), (c)はそれぞれ空間的に対称なレー ザーパルスを照射した場合のレーザー・プラズマ・ 電子を、(d), (e), (f)は非対称なレーザーパルスを照 射した場合のレーザー・プラズマ・電子を示す。図 2から、プラズマジェット及び電子バンチの発生は レーザーの空間プロファイルに明確に依存すること がわかる。従って指向性・再現性のある電子を発生 させるためには、よく定義された空間プロファイル をもつレーザーパルスの照射によってプラズマダイ ナミックスを制御する必要がある。そこでレーザー システム内のプリアンプ出力後に空間フィルター1 を、メインアンプ1出力後に空間フィルター2を開 発して、レーザーの空間プロファイルをガウシアン に近づける。



図2 空間的に対称なレーザーパルス(a)照射による 対称なプラズマジェット(b)と指向性の良い電子 ビーム(c)、及び空間的に非対称なレーザーパルス (d)照射による非対称なプラズマジェット(e)と指向 性の悪い電子ビーム(f)

3.空間フィルター1の設計

空間フィルターとは、フーリエ光学素子であり レーザー空間プロファイルの高周波成分を除去する 効果がある。12TWレーザーシステム内のプリアン プ出力後のレーザーパルス(エネルギー35mJ/pulse, パルス幅300ps, ビームサイズ2mm)に対して空間 フィルター1を開発した。図2に空間フィルター1 光学系概略図を示す。2枚の集光レンズ(f=452mm) を用いてピンホール出口穴(=0.2mm)中心部に集光 し、ピンホール透過後の回折光を平行化した。集光 点における強度は $6.8 \times 10^{11} W / cm^2$ に達し大気中で はプラズマ化を起こしてしまうため、ピンホールは 真空チェンバー内部に設置した。数値計算結果によ ると、市販されているピンホール形状の空間フィル ターを用いた場合、ピンホール上での集光強度は最 大 $4.9 \times 10^9 W / cm^2$ に達し損傷の恐れがある。一般 にピンホールの損傷閾値は、表面の面精度に依存す るため知られていないが、誘電体ミラーの損傷閾値 の~ $10^{11} W / cm^2$ を参考に、目標値を $10^9 W / cm^2$ 以 下と定めた。集光強度を1桁以上落とすため、テー パ形状のピンホールを用いてレーザーの照射される 面積を稼ぎ、 $2.8 \times 10^8 W / cm^2$ に抑えた。



図2 空間フィルター1光学系概略図

レーザーパルスの空間プロファイルは2枚目のレンズ後にCCDカメラを設置して計測した。図3に空間フィルター透過前(a)と透過後(b)の空間プロファイルの比較を示す。非対称な楕円形であったレーザープロファイルが空間フィルターを透過することにより対称な円形のプロファイルに整形された。ガウス関数との相関は、透過前の約79%に対して、透過後は約97%に向上した。またエネルギー透過率は約80%であり、約20%の損失があるが、下流の増幅器により飽和増幅まで増幅されるため問題ない。



図3 SF透過前(a)と透過後(b)の空間プロファイル

Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan (August 4 - 6, 2004, Funabashi Japan)

4.空間フィルター2の設計

空間プロファイルの更なる向上のため、レーザー システム内のプリアンプより下流にあるメインアン プ内のレーザーパルス(エネルギー600mJ/pulse、パ ルス幅300ps, ビームサイズ20mm)に対して空間フィ ルター2を開発する。レーザーの空間プロファイル がガウス分布に従うと仮定すると、焦点での集光強 度は $1.6 \times 10^{14} W / cm^2$ となり空間フィルター1への 入力より3桁大きい。この集光条件に対してプリア ンプ出力後の空間フィルターと同様に、直径が回折 限界(20um)のピンホールを用いると、ピンホール内 部壁での集光強度は最大 6.1×10¹⁰ W / cm² に達し 損傷の恐れがある。例えば直径が回折限界の3倍 (60 µ m)のピンホールを用いると、表面での集光強 度を約7.9×10⁸W/cm²に抑えることができる。し かしながら実際のレーザーの空間プロファイルは高 周波成分を含んでおり、ピンホール内部壁での集光 強度はガウス分布と仮定した場合より高くなり、損 傷の可能性が高くなる。図4は、プリアンプ出力後 のレーザーを空間フィルター2への入力として、回 折限界の1倍、3倍、8倍のピンホールを用いた場 合の出力プロファイルの数値計算結果を示す。また、 表1は各々のピンホール径におけるエネルギー透過 率とピンホール内壁での最大集光強度の数値計算結 果を示す。ピンホール径を回折限界の8倍にとって も集光強度が目標値の10⁹W/cm²を超えた。つま り、空間フィルター1による空間プロファイルの整 形が必要不可欠であることがわかった。また、ピン ホール径を回折限界の3倍にとる場合、ピンホール 内壁での集光強度を10⁹W/cm²以下にするために は、 集光レンズの 焦点距離を 452mmから 1120mm以 上へ変更する必要があることもわかった。



用いた場合の出力プロファイル(数値計算結果)

ビンホール 住/ 国新開界	1	a	8
透過中[%]	87,7	95.7	98.7
ビンホール内壁での暴光。 態度[第/cm ⁴]	$1.1{\times}10^{11}$	6.1×10*	1.7×10*

表 1	ピンホ-	-ル径 /	回折限界	に対す	るエネ	ルギー
透過率	及び集光	強度の	関係			

5.まとめと今後の予定

12TW-50fsレーザーシステム内のプリアンプ出力 後で使用可能な空間フィルター1の開発を行なった。 その結果、空間プロファイルのガウス関数との相関 は設置前の79%から97%まで向上し、エネルギー透 過率は約80%であった。ピンホールの損傷を防止す るため、形状をテーパ形状にして内壁での集光強度 を 2.8×10⁸ W / cm² に抑えた。また更なる空間プロ ファイルの向上のため、システム内のメインアンプ 内に空間フィルター2を開発している。入力プロ ファイルに高周波成分を多く含む場合、ピンホール 内壁での集光強度は $6.1 \times 10^9 W / cm^2$ に達するため、 空間フィルター1による空間プロファイルの整形が 必要不可欠であること、10⁹W/cm²以下にするた めにはレンズの焦点距離を452mmから1120mm以上 のものに変えなくてはならないことがわかった。今 後、空間フィルター2への入力プロファイルの測定 を行ない、最適な体系を組む。

2つの空間フィルターの設置後は、整形された空間プロファイルをもつレーザーパルスを用いてレー ザープラズマカソード実験を行ない、空間フィル ターの効果を評価し、プラズマダイナミックスと電 子発生との相関及び加速機構の詳細を明らかにする。 そして指向性・再現性の向上した電子バンチを用い て、フェムト秒X線を発生させる予定である。

[1] T. Hosokai, K. Nakajima, A. Zhidkov, et al, Phys. Rev. E. 67, (2003) 036407

[2] 山岡宣章, 細貝知直, et al, 日本原子力学会 2004年(第42回) 春の大会要旨集 第 部冊 P.201