



56. レーザー加速の為の Z ピンチプラズマ光導波路の開発 Development of Z-pinch Optical Guiding for Laser-Plasma Accelerator

細貝 知直, 神門 正城, 出羽 英紀, 小瀧 秀行, 近藤 修司,
金沢 修平, 中島 一久
日本原子力研究所 関西研究所 光量子科学研究センター
〒619-0215 京都府相楽郡木津町梅美台 8-1
堀岡 一彦
東京工業大学 総理工 創造エネルギー専攻
〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259

**Tomonao HOSOKAI, Masaki KANDO, Hideki DEWA, Hideyuki KOTAKI, Shuji KONDO,
Shuhei KANAZAWA, and Kazuhisa NAKAJIMA**
*Advanced Photon Research Center, Kansai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
8-1 Umemidai, Kizu, Souraku, Kyoto 619-0215, Japan*

Kazuhiko Horioka
*Department of Energy Sciences, Tokyo Institute of Technology,
4259 Nagatsuta, Midori-ku Yokohama 226-8502, Japan*

We have proposed optical guiding of intense laser pulse by fast Z-pinch for channel guided laser wakefield acceleration (LWFA). It has been developed based on capillary discharge-pumped X-ray laser technique. The discharge driven by current of 4.8 kA with a rise time of 15 ns through preionized helium gas could produce an uniform guiding channel with good reproducibility. With this new guiding method an intense Ti-Sapphire laser pulse ($\lambda = 790$ nm, 2.2 TW, 90 fs, 1×10^{17} W/cm²) was transported through the channel over a distance of 2 cm corresponding to 12.5 times the Rayleigh length.

Keywords: Laser wakefield acceleration (LWFA), optical guiding, channel guide, Z-pinch

1. はじめに

レーザープラズマ加速の一つである、レーザー航跡場加速 (LWFA : Laser Wakefield Acceleration)⁽¹⁾ は、チャープパルス増幅法開発による、パルス幅サブピコ秒、出力テラワット以上の高強度超短パルスレーザーの出現によって実現可能となった。レーザー光をガス中で集光して 10^{18} W/cm² 程度の強度にするとレーザーの光電場は $\sim 10^9$ V/cm 程度になり、原子内の束縛電子はトンネル効果により 10 フェムト秒以下の短時間のうちに完全電離してプラズマ化する。このプラズマ中ではレーザーの空間的なパルス幅がプラズマ振動の波長程度になるとレーザーパルスのポンデロモティブ力により大振幅のプラズマ波の航跡場 (ウエーク) が励起される。この航跡場 (ウエーク) 振動の位相速度は、レーザーパルスの群速度に等しい縦波である。 10^{18} cm⁻³ の密度のプラズマ中に形成される電場はほぼ 10^9 V/m に達し、この縦波中の超高電場で粒子を加速する。

加速器のエネルギーゲインを決定する要因は加速勾配と加速長である。レーザー航跡場加速では加速勾配は従来の高周波加速に比べ格段に大きい。しかしながら、プラズマ中で航跡場の励起される長さ(加速長)がレーザーの回折効果によってレーザ長程度に制限されてしまうので大きなエネルギーゲインが得られない。実際に実験では 20GV/m を越える加速勾配が得られているものの、加速長が短いために粒子のエネルギーゲインは最大 200MeV 程度に留まっている⁽²⁾。レーザー航跡場加速ではレーザーのスポットを小さく絞りパワー密度を上げ大きな加速勾配を稼ぐことと、加速長を長くすることはトレードオフの関係にある。これらを同時に満足するものがプラズマ光導波路を加速管に用い加速長を稼ぐチャンネルガイドレーザー航跡場加速である⁽¹⁾。

プラズマ光導波路とはプラズマ中でレーザーを小さなスポットサイズのまま長距離伝搬させる技術である。一般に、分布屈折率光ファイバーのように、中心で屈折率が大きく、周辺にいくにし

たがい屈折率の小さくなる媒質をレーザの通り道に沿って形成すればレーザは一定の半径のまま媒質中をガイドされる。角周波数 ω の電磁波に対するプラズマの屈折率 N は $N=[1-(\omega_p/\omega)^2]^{1/2}$ の関係でプラズマの密度に依存する。ここで ω_p は、プラズマ周波数 $\omega_p=(e^2n/\epsilon_0m)^{1/2}$ である。(ただし、 n はプラズマ密度、 e は電気素量、 m は電子の質量、 ϵ_0 は真空の誘電率とする。)したがって、レーザの通り道に沿ってプラズマ密度が凹型分布を持つチャンネルを作れば光導波路特性を持たせることができ、レーザ光を集束したまま長距離伝搬させることができる。プラズマ光導波路にはさまざまなアイデアが提案されているが、大きく分けて2つの方式がある。伝搬させる高強度レーザ自身の相対論的自己集束効果で密度チャンネル(光導波路)を作るセルフチャネリング法⁽³⁾と、伝搬させるレーザが通過する前に何らかの方法であらかじめ光導波路を形成しておくプレチャンネル法である。レーザ自身の相対論的自己集束効果はプラズマ波長よりも短いパルス幅では起こり得ず⁽⁴⁾、したがってフェムト秒オーダーの超短パルスレーザを用いるレーザ航跡場加速に対してはプレチャンネル法が有効である。プレチャンネル法に関しては、チャンネル形成にガス中でのレーザの線集光⁽⁵⁾や、キャピラリーと呼ばれるプラスチック製の細管中での真空放電⁽⁶⁾を用いた例がこれまでに報告されている。我々はこれまでに、プレチャンネル法の一つとして上記の生成法とは全く異なったチャンネル生成機構を持つ高速Zピンチ放電による光導波路形成の研究を行ってきた⁽⁷⁾。ここでは高速Zピンチ放電を用いたレーザ航跡場加速の為のプラズマ光導波路について述べる。

2. 高速Zピンチ放電

高速立ち上がりの電流で駆動されるZピンチ放電では、高速で収縮する同軸状電流層の前面に衝撃波が駆動される。そして、プラズマ柱が中心軸でスタグネートする直前に電流層と衝撃波の相互作用によってコア内部の直径 $100\mu\text{m}$ 程度の領域に凹型のプラズマ密度分布が形成される。近年のキャピラリー放電型X線レーザの研究では、高速Zピンチ放電で作られたX線レーザ媒質中の密度チャンネル内を誘導放射光がガイドされながら増幅することが示唆されている⁽⁸⁾。我々はこの高速Zピンチの収縮プロセスで形成されるプラズマの内部構造を積極的に高強度超短パルスレーザのガイドチャンネルとして用いることを提案する。この方式では予備電離を行い初期条件を均一にすれば広い密度領域で電磁流体的不安定性のない非常に再現性の良いプラズマチャンネルが形成できることが前述の研究で示されており、実際に 10^{19}cm^{-3} 以上の電子密度のプラズマチャンネルが12cmに渡って安定に形成されている。

チャンネルガイドレーザ航跡場加速のためのプラズマ光導波路という観点からは安定で再現性の良いプラズマチャンネルであることが前提になるが、当面の目標となる1GeVの加速エネルギーゲインを得るための典型的なパラメータは以下の通りである。出力2TW、パルス幅100fsのレーザを用いる場合は電子密度約 10^{17}cm^{-3} 長さ10cm、原研関西研で既に開発した出力100TWパルス幅20fsのレーザ⁽⁹⁾を用いる場合は、電子密度約 10^{18}cm^{-3} 長さ2cmのプラズマ光導波路が必要であると見積もられる。⁽¹⁾

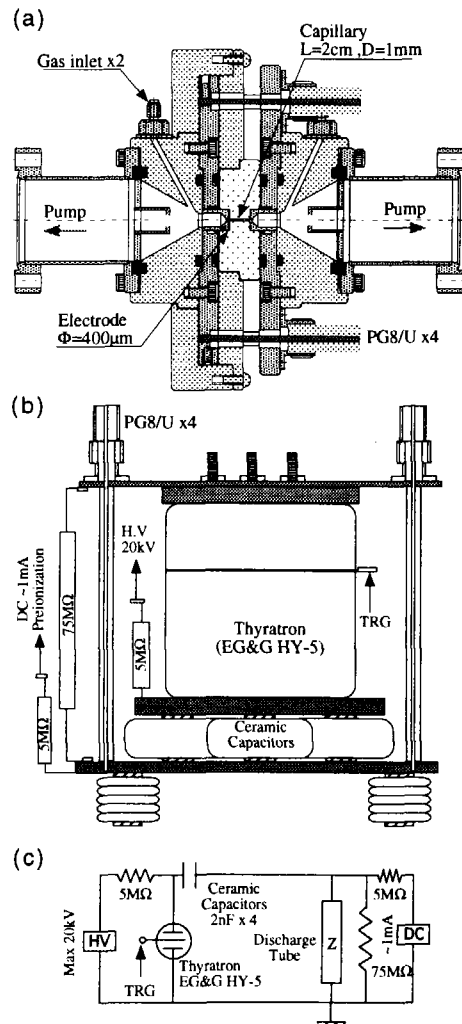


図1 (a) 放電管装置図 (b) 電源装置図 (c) 放電装置回路図

3. 実験

3.1 装置

プラズマ光導波路実験に用いた高速 Z ピンチ放電管装置と駆動用パルス電源および装置回路図を図 1(a)、(b)、(c)にそれぞれ示す。放電管には直径 5cm 長さ 2cm のセラミクス製ロッドの中心軸に沿って内径 1 ミリの穴をあけたキャピラリー(細管)を用いた。キャピラリーの両端に内径 400 μ m の穴を持つモリブデン製電極を同軸状に配置した。キャピラリー内部は差動排気によってヘリウムガスを 0.5-5 torr に維持した。高速 Z 放電駆動用のパルス電源は容量 8nF (2nF \times 4 個)のセラミクスコンデンサーとサイラトロン(EG&G HY-5) を同軸状に接続して構成し、4 本の同軸ケーブル(RG8/U)を用いてパルス電源と負荷の放電管を軸対称に接続した。一様にヘリウムガスを予備電離させるために、直流放電回路(DC)を用いて約 1mA の直流電流を放電前にガス中に流した。コンデンサーは最大 20kV(蓄積エネルギー 1.6J)まで充電された。これらの装置により、Z ピンチは立ち上がり 15ns、ピーク値 4.8kA パルス幅 70ns(FWHM)の再現性の良い電流パルスで駆動された。

3.2 高強度超短パルスレーザーのガイディング実験

典型的なプラズマ光導波路実験の配置を図 2 に示す。図中の円の内部には放電管中に光導波路が形成される時刻の典型的な電子密度分布を示す。図 2 に示すとおり、 $F^\#=12$ の軸はずしパラボラミラーを用いてチタンサファイアレーザー($\lambda=790\text{nm}$ 2.2TW 90fs) を直径 40 μ m でキャピラリー入口の中心軸上に集光した。(集光強度 $>1 \times 10^{17}$ W/cm 2) 前面にプラズマの発光を遮断するためのバンドパスフィルター($\Delta\lambda=10\text{nm}$)を取りつけた CCD カメラを軸上に配置し、レーザープロファイルを観測した。チタンサファイアレーザーパルスと Z ピンチとの同期を確認するためにフォトダイオードの信号と放電電流を同時にモニターした。プラズマチャンネル中のレーザーパルスのエネルギー透過率をフォトダイオードとパワーメーターを用いて計測した。パラボラミラーに入射する直前で得られるフォトダイオードの信号をパワーメーターで絶対値校正した。この値を元にチャンネル出口でのフォトダイオードの信号との比較から透過エネルギーを算出した。

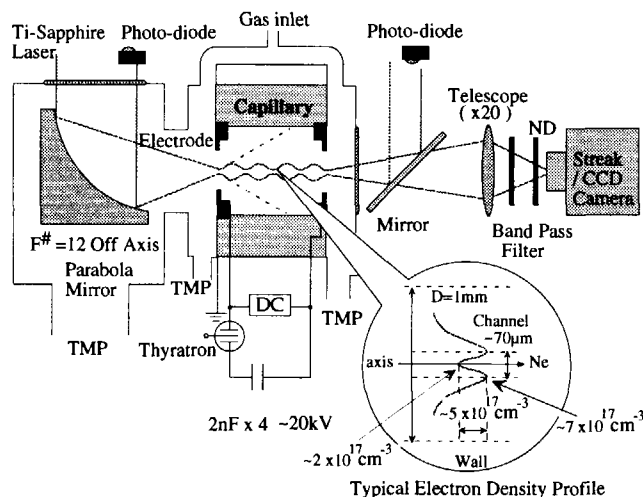


図 2 プラズマ光導波路実験概略図

3.3 実験結果

図 3 に放電管出口のチタン-サファイアレーザー($\lambda=790\text{nm}$ 2.2TW 90fs 集光径 40 μ m 集光強度 $>1 \times 10^{17}$ W/cm 2)プロファイルの典型的な CCD 写真: (a) プラズマチャンネル(初期ガス圧 0.9Torr 時刻 $t=8.5\text{ns}$)通過後、(b) 中性ガス通過後と、(c)それぞれの強度プロファイルを示す。(a)、(c) に示すとおり、時刻 $t=8.5\text{ns}$ に中心軸部分に直径 40 μ m の明るいスポットが観測された。レーザーパルスのエネルギー透過率はチャンネル中をガイドされる場合に 30%から 64%に増加した。Z ピンチを駆動せずに中性ガス中を通過させた場合(b)及び $t=8.5\text{ns}$ 以外の時刻にプラズマ中を通過させた場合には明るいスポットは観測されなかった。実験結果は光導波路の形成される時刻 $t=8.5\text{ns}$ にレーザーがチャンネル中をガイドされていることを明確に示している。ガイドされたチャンネル長は 2cm で、これはチタンサファイアレーザーの光学系で決まるレーリ長 1.6mm の約 12.5 倍に相当する。

4. まとめ

我々は、チャンネルガイドレーザー航跡場加速の要素技術の一つとして、高速Zピンチ放電の収縮プロセスで形成される凹型電子密度分布を用いたプラズマ光導波路を提案した。ピーク電流 4.8kA、立ち上がり 15ns で駆動された高速 Z ピンチプラズマは再現良く導波路を形成した。形成されたプラズマ光導波路の直径は $70\mu\text{m}$ であった。電子密度は、MHD(電磁流体)シミュレーションより中心軸上で $2.0 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 、チャンネルの端で $7.0 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ と推定される。さらに、この新しい方式のプラズマ光導波路を用いて高強度超短パルスレーザー ($\lambda = 790\text{nm}$ 2.2TW 90fs 集光直径 $40\mu\text{m}$ 集光強度 $>1 \times 10^{17}\text{W/cm}^2$) のガイド実験を行った。レーザーは真空中の回折距離の 12.5 倍に相当する 2cm にわたって安定にガイドされ、高速Zピンチ放電によって安定な光導波路を形成できることが実験的に初めて示された。

高速Zピンチを用いた光導波路形成の方式は、より長くより高い密度のチャンネルヘスケーリングできるという大きな利点を持つ。プラズマの最終的なパラメータとその空間分布は放電パラメータの選び方によって制御可能である。したがって、適当な放電パラメータを選択することによって、ガイドされるレーザーにとって最適なチャンネル深さ、幅、形を持つプラズマ光導波路を広い密度領域に渡って生成することが可能である。本実験のプラズマの密度領域は $10^{16}\text{--}10^{18}\text{cm}^{-3}$ で収縮速度は 10^7cm/s 程度である。プラズマチャンネルの安定性が保証されるならば、より高速のプラズマの収縮は、さらに強い衝撃波を駆動することができる。したがってより大きな密度と密度勾配を持つ長い光導波路が形成でき、より高強度のレーザーガイディングが可能である。

参考文献

- (1) K. Nakajima, Phys. Plasmas. **3**, 2169 (1996)
- (2) H. Dewa, H. Ahn, H. Harano, M. Kando, K. Kinoshita, S. Kondo, H. Kotaki, K. Nakajima, H. Nakanishi, A. Ogata, F. Sakai, M. Uesaka, T. Ueda, T. Watanabe, K. Yoshii, Nucl. Instr. and Meth. **410**, 357 (1998)
- (3) K. Krushelnick, A. Ting, C. I. Moore, H. R. Burris, E. Esarey, P. Sprangle, and M. Baine, Phys. Rev. Lett. **78**, 4047 (1997)
- (4) P. Sprangle, E. Esarey, J. Krall, and G. Joyce, Phys. Rev. Lett. **69**, 2200 (1992)
- (5) C. G. Durfee III and H. M. Milchberg, Phys. Rev. Lett. **71**, 2409 (1993)
- (6) Y. Ehrlich, C. Cohen, A. Zigler, J. Krall, P. Sprangle, and E. Esarey, Phys. Rev. Lett. **77**, 4186 (1996)
- (7) T. Hosokai, M. Kando, H. Dewa, H. Kotaki, S. Kondo, K. Horioka, and K. Nakajima Opt. Lett. **25**, 10 (2000)
- (8) C. H. Moreno, M. C. Marconi, V. N. Shlyaptsev, B. R. Benware, C. D. Macchietto, J. L. A. Chilla, J. J. Rocca, and A. L. Osterheld, Phys. Rev. A **58**, 15092 (1998)
- (9) K. Yamakawa, M. Aoyama, S. Matsuoka, T. Kase, Y. Akahane, and H. Takuma, Opt. Lett. **23**, 1468 (1998)

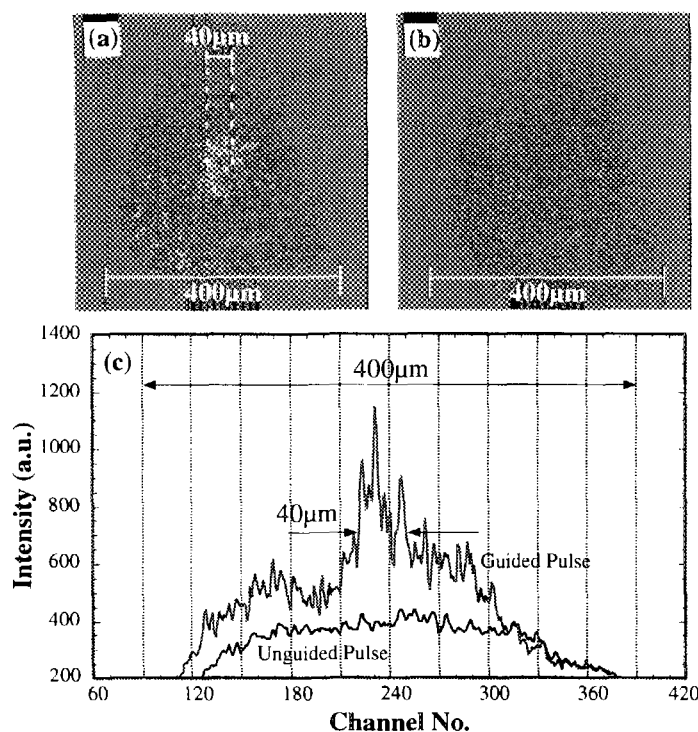


図 3 放電管出口におけるチタンサファイアレーザープロファイルの典型的な CCD 写真: (a) プラズマチャンネル(初期ガス圧 0.9Torr $t=8.5\text{ns}$)通過後 (b) 中性ガス通過後 (c) それぞれの強度プロファイル