

ナノ秒プリパルス制御のための高強度フェムト秒レーザーと薄膜フィルターの相互作用研究

木下健一^{A)}、細貝知直^{B)}、アレクセイ・ジドコフ^{A)}、大久保猛^{B)}、上坂充^{B)}

^{A)} 放射線医学総合研究所

〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1

^{B)} 東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設

〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22

概要

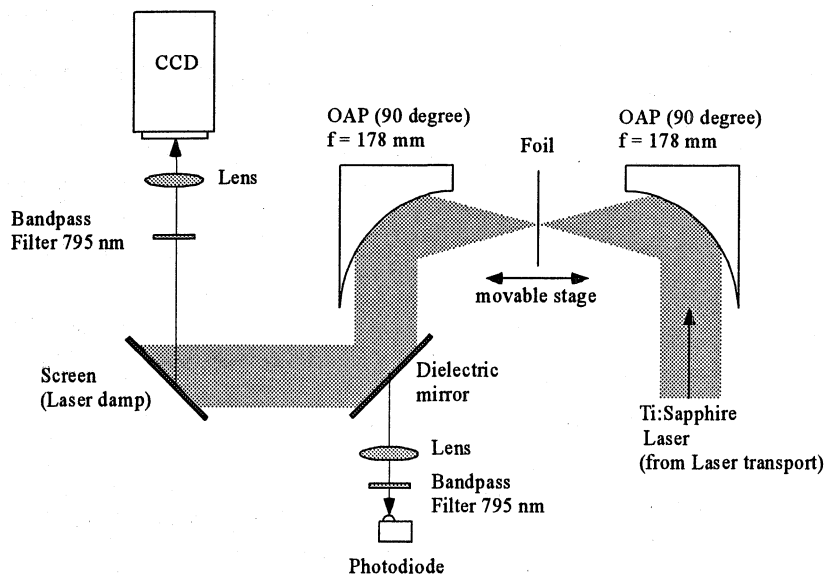
レーザー生成プラズマにおけるマイクロメートル領域でのプラズマの動きの時間スケールはサブナノ秒からナノ秒のオーダーである。従ってプリプラズマの挙動はナノ秒プリパルスに強く影響される。高強度超短パルスレーザーによるX線発生、イオン発生、電子発生を最適化するためにはプリパルスの制御が必要である。現在ナノ秒レーザーコントラストは 10^6 程度であり、コントラストのさらなる向上が望まれる。ナノ秒レーザーコントラストを改善するためにフェムト秒高強度レーザーと薄膜との相互作用の研究を行った。薄膜上に生成された膨張プラズマの時間フィルター効果によってナノ秒パルスは1/7程度に減少した。フェムト秒ダブルパルスを用いた実験では第一パルスは1/10以下に抑制され、第二パルスはほぼ減衰せずに透過した。

1 序論

超短パルス超高強度レーザーはX線発生[1][2]、イオン発生[3][4]、電子発生[5][6]、中性子発生[7]等の高エネルギー粒子発生に使用される。超短パルスレーザーには数ナノ秒持続するプリパルスが伴っている。プリプラズマはこのナノ秒プリパルスによって生成される。このプリプラズマ

の条件がメインパルスとの相互作用に大きく影響する。典型的なナノ秒レーザーコントラストは 10^6 である。もしメインパルスの集光強度が 10^{19} W/cm²であるとする、プリパルスの強度は 10^{13} W/cm²となる。これは多くの場合強すぎる強度であり、標的の事前破壊や大きく拡散したプリプラズマなど最適でない条件をもたらす。プリパルスの制御にはポッケルセル、プラズマミラー、非線形相互作用などいくつか考えられる。ここでは高強度フェムト秒レーザーと薄膜との相互作用を調べる事でそのプリパルス制御への適用可能性を検討する。

薄膜フィルター法の概要は以下の通りである。テラワットレーザーの相互作用時の強度は 10^{18} W/cm² ~ 10^{19} W/cm²を超える。レーザーコントラストが 10^6 とすればこれは 10^{12} ~ 10^{13} W/cm²のプリパルスレベルをもたらす。このプリパルスは標的にプラズマを生成するのに十分な強度であり、生成されたプラズマはさらにこのプリパルスによって加熱される。初期プラズマ密度は臨界密度を超えているためレーザーはプラズマ中を伝播できない。その後プラズマの膨張によって密度が臨界密度より下がる。メインパルスがこの膨張後にプラズマに到達すれば、それはプラズマを透過する事ができる。このようにレーザーパルスが薄膜を通過する事で、メインパルスの消耗を抑えてプリパルスを低減する事ができると期待される。初期プラズマの大きさが十分小さければナノ秒時間領域での3次元的



急膨張が起きると考えられる。この技法は、X線発生、イオン発生、電子発生、中性子発生など様々なレーザープラズマ応用実験のプリプラズマ条件を最適化するのに役立つと期待される。

2 実験

この実験で使用されるレーザーはチャープパルス増幅に基づいたテラワットレーザーである。そのシステムはオシレーター、ストレッチャー、再生増幅器、マルチパス増幅器、圧縮器から較正される。詳細は他の文献を参照のこと。中心波長 790 nm、これは臨界密度 $1.7 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ に対応する。最大エネルギー 600 mJ。圧縮後のパルス幅 50 fs。ナノ秒領域でのレーザーコントラストは 2×10^6 。実験体系は以下の通りである。2つの軸外し放物面鏡 (OAP) を焦点を共有するように対向して設置する。軸外し角は 90° 、焦点距離は 178 mm である。レーザーは第一の OAP によって標的に集光される。集光点を通過したレーザー光は第二の OAP によって平行化され測定部に導かれる。薄膜標的は垂直入射の角度で焦点近傍に設置される。標的面を更新するために標的は自動ステージによって標的面方向にスライドする。集光部は約 $1 \times 10^{-4} \text{ Torr}$ の真空中に置かれ

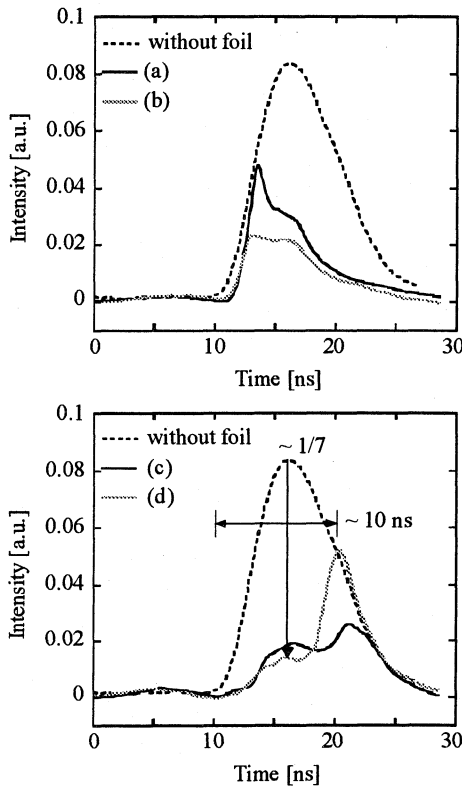


Fig. 2: Time dependence of laser transmittance through foil. The distance between the target and the focal point is 450 μm for (a), 250 μm for (b), 50 μm for (c), and 0 μm for (d). The estimated laser intensity is $1.4 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ for (a), $4.5 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ for (b), $5.5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ for (c), and $1.0 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ for (d). The target material is polyvinylidene chloride with the thickness of 10 μm . The dashed line in the figure is the signal without foil. The solid line is the signal with foil.

る。薄膜を透過したレーザー強度はフォトダイオードによって測定される。フォトダイオードはレーザー光を減衰させるための誘電体多層膜ミラーの背後に設置される。レーザー光を集めるためのレンズが誘電体ミラーとフォトダイオードの間に設置される。プラズマ光を遮断するために中心波長 795 nm、バンド幅 10 nm のバンドパスフィルターがフォトダイオードの前に設置される。誘電体ミラーに反射されたレーザーはレーザー止めの白板上に投影される。白板上に映った横方向レーザー分布は CCD カメラで測定される。実験体系図を fig.1 に示す。

まずナノ秒パルスの薄膜標的に対する影響を調べた。シードパルスがない場合、再生増幅器はナノ秒パルスを生成する。それらナノ秒パルスを標的に集光する。Fig.2 は薄膜透過強度の時間変化である。標的と集光点との距離は (a) 450 μm 、(b) 250 μm 、(c) 50 μm 、(d) 0 μm である。集光強度の見積りは (a) $1.4 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 、(b) $4.5 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 、(c) $5.5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 、(d) $1.0 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ である。(d) における集光強度はフェムト秒高強度レーザーを集光した際のプリパルスレベルに対応する。標的の材質は厚さ 10 μm のポリ塩化ビニリデンである。破線は薄膜がない場合の透過強度である。実線は薄膜がある場合である。ナノ秒パルスのパルス幅は 8 ns である。Fig.2 の (a) および (b) からプラズマ生成に必要なレーザー強度を読み取る事ができる。標的はプラズマが生成される前はレーザーに対して透明である。従って、レーザー強度が低いパルスの前部は標的を透過している。レーザー強度がプラズマを作るのに十分な強度に達した時点で標的は不透明になりレーザー透過率が下がる。その強度は約 $8 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$ と見積もられる。Fig.2 の (c) と (d) ではパルスの前部に透過率の抑制が見られる。プラズマは数ナノ秒の間不透明であった後、膨張によって低密度化が起り、パルスの後部が薄膜を透過する。透過率の回復はレーザーの入射から約 10 ns 後である。これにより、高強度レーザープリパルスに対応するナノ秒レーザー照射によって、ナノ秒時間領域でプラズマの生成、拡散、低密度化およびそれによるレーザー透過が起きる事が確認された。

次にフェムト秒パルスに対するプリパルス抑制の効果を調べるために、フェムト秒ダブルパルスを用いた測定を行った。Fig.3 はダブルパルスによるフォトダイオードの波

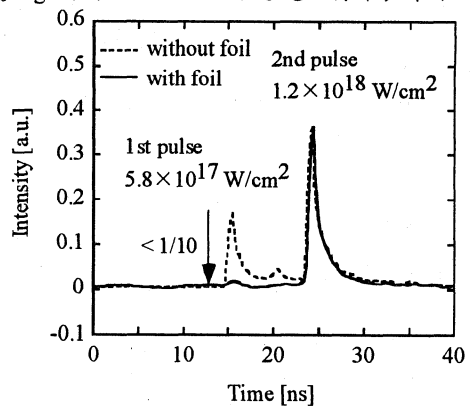


Fig. 3: Time dependence of laser transmittance through foil with a femtosecond double pulse. The target is polypropylene with the thickness of 4 μm .

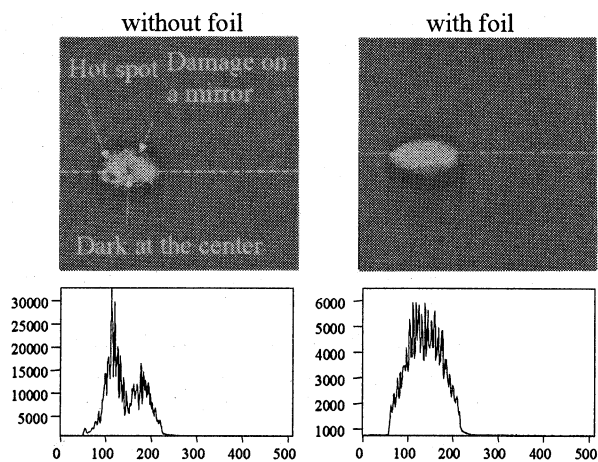


Fig. 4: A change of the transverse laser profiles in case of a nanosecond pulse. The left figures are without foil. The right figures are with foil.

形である。破線は薄膜がない場合、実線は薄膜がある場合である。集光点における強度は第一パルスが 1×10^{18} W/cm²、第二パルスが 2×10^{18} W/cm² である。標的の材質は厚さ 4 μm のポリプロピレンである。第一パルスと第二パルスの時間間隔は約 8 ns である。薄膜透過によって第一パルスは 1/10 以下に減少している。第一パルス到達時にはプラズマ密度が臨界密度以上であり、そのプラズマによってレーザーが遮断されたためと考えられる。第二パルスはほぼ減衰せずに透過している。従って、10 ns 程度の拡散時間であっても薄膜プラズマ透過時におけるフェムト秒レーザーの消耗は大きな問題とはならないと考えられる。

薄膜透過によって横方向レーザー分布が影響を受ける事が考えられる。Fig.4 にナノ秒パルスにおける横方向レーザー分布の変化を示す。白板位置で観測される薄膜なしでの横方向レーザー分布はレーザー輸送光学系におけるミラーの損傷などの影響でホットスポットや窪みを持った分布となっている (Fig.4 左上および左下)。薄膜プラズマ透過後のナノ秒パルスの空間分布は初期分布と比べて滑らかで、よりガウス分布に近い形状となる。これは焦点位置におけるプラズマ透過が空間フィルターの役目を果たしているためと考えられる。焦点位置に置かれた微小ピンホールはレーザー分布の高次成分を遮断し遠方での分布をガウス分布に近づける働きを持つ。Fig.4 の結果は薄膜プラズマがレーザー透過時に微小ピンホールとなっている可能性を示唆する。

3 まとめ

高強度超短パルスレーザーによる X 線発生、イオン発生、電子発生等を最適化するためにはナノ秒プリパルスの制御が必要である。そのために我々は薄膜フィルターによるレーザーコントラスト向上について研究を行い、薄膜標的上のナノ秒レーザーパルスの集光とプラズマ生成、レーザー透過、フェムト秒パルスとの相互作用について実験的に調べた。初期高密度プラズマによるナノ秒パルスの遮断と膨張低密度化によるパルス後部の透過が確認された。フェムト秒パルスが薄膜プラズマを透過可能であることを

確認した。薄膜プラズマの空間フィルター効果によってナノ秒パルスの横方向レーザー分布が変化する事を確認した。今後、空間分布やスペクトル変化等、メインパルスと薄膜プラズマとの相互作用のさらなる調査を行う予定である。

参考文献

- [1] J. D. Kmetec, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 68, 1527 (1992).
- [2] A. Rousse, *et al.*, Phys. Rev. E 50, 2200 (1994).
- [3] M. Hegelich, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 89, 085002 (2002).
- [4] I. Spencer, *et al.*, Phys. Rev. E 67, 046402 (2003).
- [5] V. Malka, *et al.*, Science 298, 1596 (2002).
- [6] T. Hosokai, *et al.*, Phys. Rev. E 67, 036407 (2003).
- [7] T. Ditmire, *et al.*, Nature 398, 489 (1999).