

X線レーザーラボ (X-Ray Laser Lab.)

研究項目：X線レーザーの新励起技術の研究
研究期間：平成9年度～13年度

1. 研究の背景

計測、加工、通信などの技術の微細化・高速化のために、コヒーレント光源であるレーザー発振のとめどなき短波長化が求められるが、その極限としてのX線レーザーは、その技術的困難さ故に「夢」のレーザーである。この夢の実現を目指して1970年代から地道な研究が行われていたが、特にこの10数年の研究は世界的に活発であって、数十nmから10nm近辺の極端紫外域においては飽和増幅が認められるまでに至っている。当所においても、それ以前の研究成果をふまえた特別研究「軟X線レーザーの発振・増幅技術の研究」(平成2年度～7年度)が行われ、大出力ガラスレーザーシステムおよび電子ビーム励起KrFレーザーシステムを励起光源とした研究で、18nmX線と8nmX線の級数増幅に成功している。

波長的には未だ真の「X線」との間にギャップはあるものの大きな成功を収めてきたX線レーザー研究であるが、殆ど全ての実験は、世界で数箇所しかない巨大レーザーシステムを励起源として行われて来た。今後は、計測、加工等への応用に供するために、小型化および高繰り返し化のための、高効率励起技術の開発が最重要課題である。

2. 経過と現状

2.1 爆発励起型

X線レーザー増幅を可能にする高温プラズマ中の反転分布を高効率で形成するには、プラズマ生成の高効率化と、反転分布生成の高効率化などが必要であり、これを可能にする方式として、当所では、極薄膜ターゲットを極短パルスで励起する「爆発励起型」(Fig.1)を考案した。

従来の励起法では、固体ターゲットの最表面の厚さ数十nmがレーザー光を吸収して、高温化され、膨張し

て、透明になり、次の数十nm厚さの表層が - - - , ということを繰り返すアブレーション型のプラズマ生成が行われている。このアブレーション型では、X線レーザーの媒質である超高温プラズマは、低温の固体に接触しているため熱伝導により温度が低下し、プラズマ加熱効率が低くなる。この熱伝導損失をなくするために着想されたのが極薄膜ターゲットの使用である。極薄膜の膨張が開始されると、熱エネルギーが運動エネルギーに変換されて温度が低下し、また、透明になってレーザー光を吸収しなくなるので、慣性により極薄膜が静止している間に加熱を完了させる「爆発型」の加熱を行うために、レーザーは数ps以下の極短パルスを使用する。

固体ターゲットを用いたアブレーション型励起の場合は、不要に多量のマスがプラズマ化されるので、断熱膨張冷却で反転分布を形成する再結合方式において求められる急激な膨張が妨げられるとともに、オパシティが高くなってプラズマからの輻射が抑制されて反転分布の破壊が生じる。また、固体密度ター

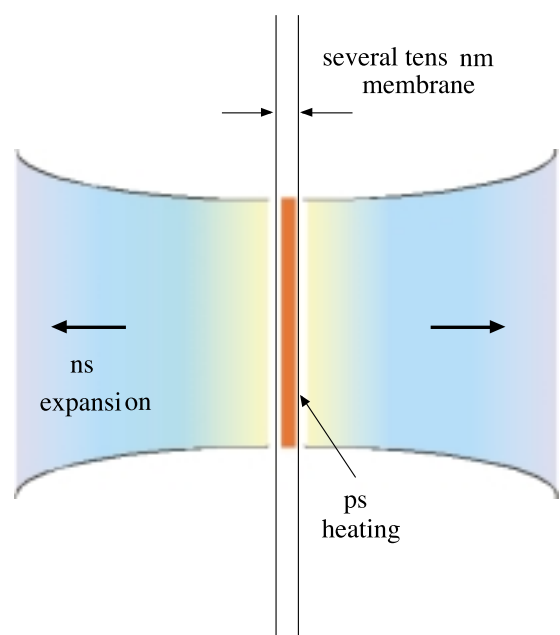


Fig.1 Concept of exploding type pumping

ゲットと膨張プラズマが接触しているため、大きな密度勾配が生じてX線が屈折されて長尺増幅が妨げられる。「爆発型」では、これらの問題が全て解決される。

「爆発型」の実現には、理論で得られる最適設計通りの極薄膜の作成が可能であるか、照射パワー、パルス幅のレーザーが実現できるか、など多くの新しい技術課題もある。プラズマ加熱効率が高く、オパシティの抑制、長尺の増幅も期待できる最有望な方式である「爆発型」X線レーザーの実現を目指して、理論設計、プラズマ諸特性の評価、励起レーザー技術開発など、総合的な研究開発を進めてきた。

2.2 加熱効率

薄膜を用いることで加熱効率が向上できることの実証実験を行った。100nm薄膜に10psレーザーの照射を行ったところ、X線スペクトルおよびチャージコレクター信号から、プラズマ加熱およびイオン化が、極薄膜ターゲットの場合は平板ターゲットの場合の2倍程度に効果的に行われることが確認できた。

2.3 理論設計

流体コード計算を行い、3psパルスで30nmの厚さの窒化シリコン薄膜を 10^{14} W/cm²の強度で励起すれば、10-50/cmの大きな利得の13nmX線レーザーが得られるという結果を得た。また、X線レーザーの大きな目標である「水の窓(波長2.4nm-4.3nm)」領域への短波長化の実現可能性を探ったところ、厚さ80nmの窒化シリコン薄膜を、0.3psのパルスで 10^{16} W/cm²の照射を行えば2.4nmX線レーザーも実現できることが分かった。

2.4 フェムト秒レーザーシステム

爆発型励起に求められる、パルス幅数psからサブpsでJオーダーのエネルギーのレーザーパルスを得るため、フロントエンドにフェムト秒レーザーを導入した。Ti:Sレーザーを745nmで運転し、その3倍高調波を種パルスとし、電子ビーム励起KrFレーザーシステムASHURAで増幅し、2J程度のパルスエネルギーを得た。ピコ秒程度の紫外光としては、世界最大エネルギーである。

2.5 プレパルスによる薄膜の破壊ダイナミクスの観測

薄膜の透過率を観測することで、固体が雪崩的電離

でプラズマ化に至るダイナミクスの可視化に、初めて成功した。 10^8 W/cm²の微弱光励起下でも、10ns程度で極薄膜がプラズマ化する(Fig.2)という知見から、主パルスによる照射の前に極薄膜が蒸発しないために、フロントエンドのTi:Sレーザーのプレパルスレベルを 10^6 以下に改善するとともに、KrFレーザー増幅器から発生する増幅自然放出光(ASE)を抑制する手法の開発を行った。

Fig.3に示すように、X線レーザー増幅が期待される発光線H α は、プレパルスが十分に抑制できた場合にはイオン化が進んで大きな強度が観測できたが、抑制がそれほどでもない場合はイオン化が進まず極めて微

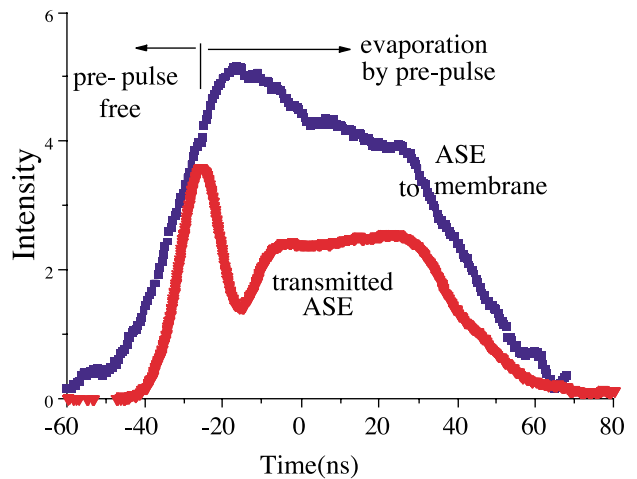


Fig.2 Dynamical change of transmission of a prepulse through a thin membrane. (Visualization of transition of a solid to a plasma)

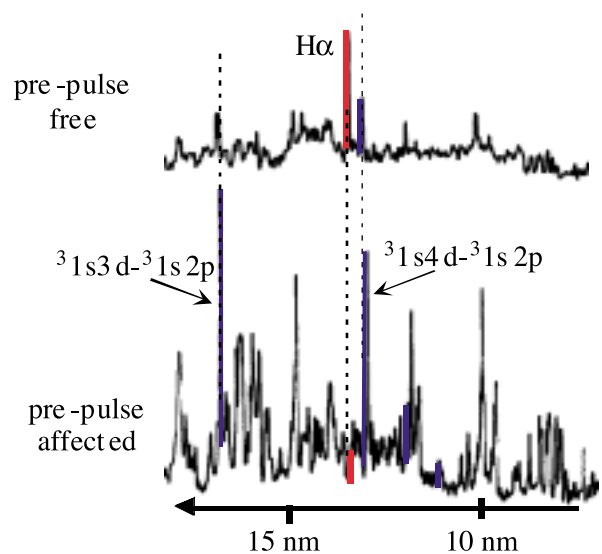


Fig.3 X-ray spectra from a SiN membrane target

弱であった。また、サテライト線の強度比から、プレパルス抑制時に $10^{22}/\text{cm}^3$ の超高密度でのイオン化が実現できる、ことが確認できた。

2.6 X線増幅

X線増幅を観測するため、厚さ30nmのSiN薄膜に、6psパルスを $5 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ の強度で長さを変えた線状集光を行った。X線スペクトル強度のプラズマ長依存性から(Fig.4)利得長積は約1.5と大きくないが、窒素イオンのバルマー α 線(13.4-nm)の級数的増大が認められた。

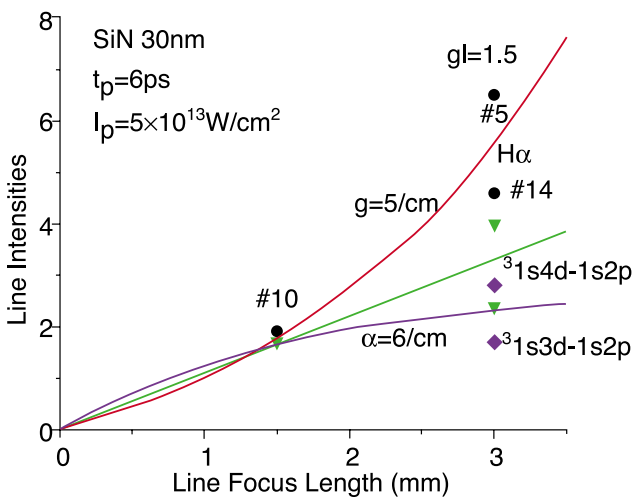


Fig.4 Exponential growth of 13.4nm Ha line

3. 波及効果

極薄膜ターゲットのプラズマ加熱効率を証明した我々の実験の報告を受け、他の研究機関でのX線レーザー研究でも、極薄膜ターゲットの使用が検討されている。

必要最小限のマスプラズマ化する、という爆発型の着想の流れから、我々は「キャビティ閉じこめ型」プラズマも考案した。超短パルスレーザーによるアブレーション作用を利用して固体壁から必要最小限のマス剥ぎ取り、固体壁から十分に離れた空間でプラズマ化する方式であり、固体からの飛散物の極微化とX線への変換効率の増大が可能である。EUVリソグラフィ用の有力な光源として期待され、その実用化のための研究が、競争特研で開始されている。

4. 今後の展開

より顕著な増幅を観測するには、線状集光長および照射パワー密度の増大が必要である。そのためには、照射パルスレーザーのエネルギーの増大が必要であり、高強度短パルスビームの伝搬などの研究と同時に、プレパルスASEの微弱化のために、フロントエンドの増強を行う予定である。また照射レーザーのサブピコ秒化によってより超強化を図るため、紫外域でのチャーピング増幅技術の開発も行いたい。

さらに、爆発型励起の研究で得られたプラズマ制御の知見及び開発された照射レーザーシステムを活かして、X線レーザーの高繰返し化およびテーブルトップ化が可能な新たな方式を模索したい。

光を情報エネルギーのメディアとする汎用フォトンクス技術を目指す光技術領域の中で、3本柱の一つである未踏光発生利用技術の重要課題の一つとして、上記研究を実施したい。

当該研究担当者等

ラボ構成員(総数6名)

職員(4名) 富江敏尚* 三浦永祐 屋代英彦 松嶋 功
(エネルギー部)

職員以外(2名) 錦織健太郎 陸培祥(STAフェロー)

*ラボリーダー