



4.6 X線レーザーにおけるプラズマ媒質の数値シミュレーションによる研究 Computational Study on Plasma Medium of X-Ray Laser

大西直文¹⁾, 錦野将元²⁾

¹⁾ 東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻

〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01

²⁾ 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

Naofumi OHNISHI¹⁾, Masaharu NISHIKINO²⁾

¹⁾ Department of Aerospace Engineering, Tohoku University

6-6-01 Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

²⁾ Advanced Photon Research Center, Kansai Research Establishment,

Japan Atomic Energy Research Institute

8-1 Umemidai Kizu-cho, Souraku-gun, Kyoto 619-0215, Japan

A plasma medium for x-ray lasers by means of transient collisional excitation has been investigated with a two-dimensional radiation hydrodynamics code. The propagating x-ray laser is refracted in the medium due to the gradient of electron number density, which depends on the pumping laser pulse. The numerical results suggest low-density islands that can collimate the laser beam are formed behind a blast wave.

Keywords: X-ray laser, Numerical simulation

1 はじめに

波長が 10 nm のオーダーとなる X 線レーザーは、生物観察や半導体リソグラフィ応用、高密度プラズマ計測などを目的として勢力的に研究されている。その中でも、小さいエネルギーで X 線レーザーを生成することができるため、照射レーザーをダブルパルスにした過渡衝突励起方式による研究が注目されている。¹⁾ さらに近年、過渡衝突励起方式に基づきながら、2つのターゲットを用いたダブルターゲット方式により高コヒーレント X 線レーザーが得られている。^{2,3)}

しかしこれらの実験では、照射レーザーの条件によっては得られた X 線レーザーの空間強度分布が広がったり、あるいは分裂するという現象も見られている。通常、ターゲットに照射されるレーザーは線集光されるため、プラズマはターゲット表面から半円柱状に膨張していくと考えられるが、このような空間強度分布の偏在化はプラズマの膨張が必ずしも半円柱状にはなっていないことを示唆し、非一様な電子密度分布によって X 線レーザーが複雑な屈折を受けたことが予想される。

X 線レーザーを増幅するプラズマ媒質の状態を知ることは、将来、高利得化を図る上でも非常に重要なことである。本研究では、2次元の輻射流体計算によってプラズマ媒質の密度、温度分布を調べることで、X 線レーザーの利得領域へどのような影響を及ぼすかを考察する。そして、将来的には利得計算を行い、最適な照射レーザーの条件を調べることを目的としている。

2 計算の概要

Ag の Ni 様イオンを用いた衝突励起型 X 線レーザーでは、プラズマ媒質の電子数密度が $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、電子温度が 500 eV 程度のところに利得領域が存在する。¹ したがって、比較的高温、高密度プラズマに適した数値計算法が必要になると考えられる。本研究では、筆者らが慣性核融合プラズマ用に開発した 2 次元輻射流体コード RAICHO⁴ を用いて計算を行った。

計算条件としては図 1 のように第 2 ターゲットを想定した固体密度の Ag に集光幅 $20 \mu\text{m}$ 、波長 $1.06 \mu\text{m}$ のレーザーを照射する。このターゲットは奥行き方向に十分長いとして 2 次元計算を行う。計算領域は図の上半分 (図の破線内部) の領域である。

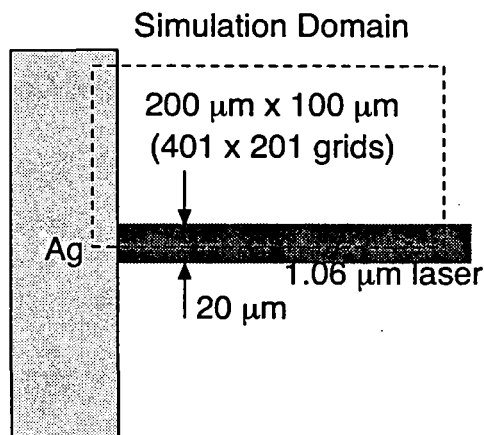


図 1 第 2 ターゲットの計算条件

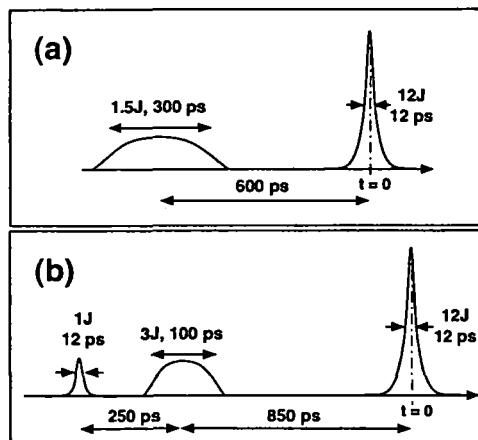


図 2 レーザーのパルス形状 ((a) ピコ秒プレパルスなし, (b) ピコ秒プレパルスあり)

レーザーの時間的変化は図 2 に示すような 2 つのパルスを考え、それらが生成するプラズマ媒質がどのように異なってくるかを調べた。1 つは (a) 1.5 J、半値全幅 300 ps のプレパルスに 12 J、12 ps のメインパルスを照射する場合、もう 1 つは (b) 1 J、12 ps と 3 J、100 ps の 2 つプレパルスと 12 J、12 ps のメインパルスを照射する場合である。今後、(a) を用いた計算をピコ秒プレパルスを付けない場合、(b) はピコ秒プレパルスを付けた場合と表現する。レーザーエネルギーとその半値全幅、およびタイミングは図に示す通りで、パルス形状は全てガウシアンである。

3 計算結果および考察

2 次元計算に先立ち、これらのパルスによってどのような密度、温度分布が得られるかを 1 次元計算によって確かめた。図 3、4 は 1 次元計算によるメインパルス照射後 30 ps の、ピコ秒プレパルスを付けない場合と付けた場合それぞれの電子数密度と温度分布を表している。どちらの場合もターゲット表面から離れた位置に密度の不連続面が見取れる。これは、プレパルスでターゲット表面近傍に生成されたプラズマにメインパルスで短時間にエネルギーが注入された結果、プラスト波が形成され、それがレーザー入射方向に向かって伝播している様子である。

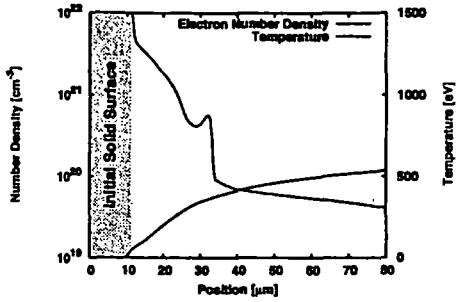


図3 メインパルス照射後 30 ps における電子数密度と温度の一次元分布 (ピコ秒プレパルスなし)

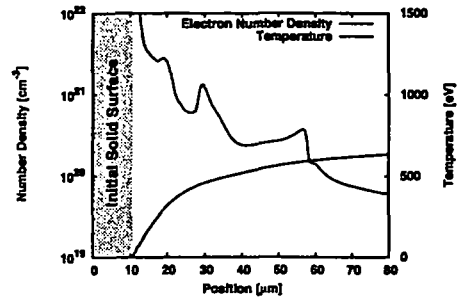


図4 メインパルス照射後 30 ps における電子数密度と温度の一次元分布 (ピコ秒プレパルスあり)

ピコ秒プレパルスを付けた場合 (図 4) は、付けない場合 (図 3) に比べてメインパルス以前に形成されたプラズマが広く分布しているため、広がった低密度領域でエネルギーが吸収され、プラスト波がよりレーザー入射側で形成されるだけでなく、ターゲット側へ伝搬している波面も 30 μm 付近に確認することができる。

一般に、プラスト波の進行に伴い背後の密度は徐々に低下していくため、どちらの場合もプラスト波背後に少し密度が窪んだ領域を形成している。また、レーザーが増幅される利得領域はおおよそ電子数密度が $5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ で、温度が 500 eV 程度の領域とされているため、この部分が利得領域になる可能性がある。

次に、2次元の計算結果を示す。図 5 はメインパルス照射後 30 ps における電子数密度分布である。ピコ秒プレパルスがある場合もない場合も、ターゲット表面近くからレーザー入射側に向かってプラスト波が扇状に伝播している様子がわかる。1次元の計算結果と同じように、ピコ秒プレパルスを付けない場合の図 5-(a) は、付けた場合の図 5-(b) に比べて、同じ時刻ではプラスト波がそれほど進行していない。ピコ秒プレパルスを照射した場合は、プラスト波の伝播がより低密度側から始まり、さらに図中 30 μm 付近に高密度側への伝搬も見られる。また、この場合流れ場はより複雑になり、密度勾配の大きい場所がいくつも存在する。

本計算が対象としている第 2 ターゲットは、第 1 ターゲットで発振された X 線レーザーを増幅するために用意されている。したがって、入射してきたシード X 線が第 2 ターゲットで生成されたプラズマ媒質によって屈折しないためにも、密度勾配の少ない様なプラズマ媒質が要求される。ただし、図 3, 4 を比較するとわかるように、2次元計算では密度構造が複雑になってしまったピコ秒プレパルスを付けた場合のほうが、500 eV という利得領域の温度の条件には適しているため、必ずしも利得で損をするとは言いきれない。

ここで注目すべきは、プラスト波後方には低密度領域が形成されるが、これが比較的平坦になっているということである。実験では、第 2 ターゲットのプラズマ媒質を生成するタイミングを調整することで、プラズマの密度勾配による屈折の影響が抑えられ結果、ビーム全体が高い干渉性を持つフルコヒーレント X 線レーザーを得られている。³ このとき、利得領域はプラズマの密度勾配が比較的緩やかな領域にあったと考えられている。2次元計算の結果から予想されることは、そのような X 線レーザーが屈折の影響を受けない増幅に適した領域が、プラスト波後方に形成されたのではないかとということである。

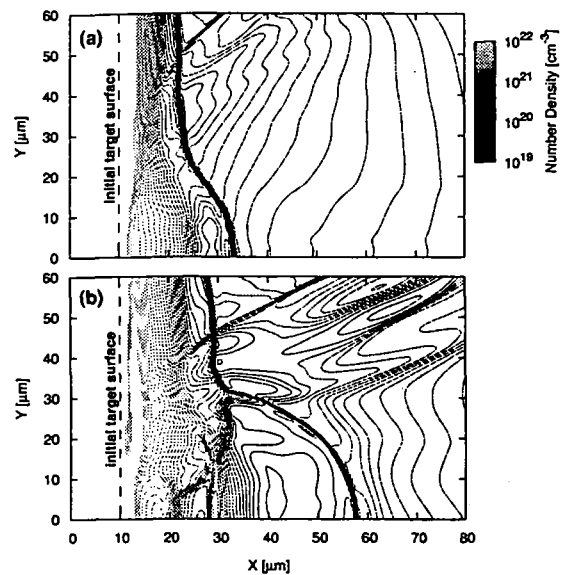


図5 メインパルス照射後 30 ps の電子数密度分布 ((a) ピコ秒プレパルスなし, (b) ピコ秒プレパルスあり)

4 まとめ

2次元輻射流体コードを用いて、過渡衝突励起型 X 線レーザーのプラズマ媒質について解析を行った。2種類のパルスについて計算を行い、プラズマ媒質の形成について比較を行った。その結果、どちらの場合もメインパルス照射後にプラスト波が伝搬した。プラスト波後方には、比較的平坦な低密度領域が形成され、そこが利得領域になる可能性がある。ピコ秒プレパルスを付けた場合は、付けない場合に比べて低密度側でプラスト波が形成され、さらに高密度側への伝搬が見られるなど、密度構造が複雑になった。

密度勾配が入射 X 線レーザーの屈折に関わるため、密度構造が複雑でない方がプラズマ媒質には適していると考えられるが、最適化を図る上では実際に利得計算を行なわなければならない。そのために、電子・イオンの熱非平衡性、入射 X 線レーザーの密度勾配による3次元的な屈折、時間依存原子過程を評価できるような計算に取り組んでいく必要がある。

参考文献

- [1] Kawachi, T., et al., "Gain saturation of nickel-like silver and tin x-ray lasers by use of a tabletop pumping laser system," Phys. Rev. A, 66 (2002), 033815.
- [2] Tanaka, M., et al., "X-ray laser beam with diffraction-limited divergence generated with two gain media," Opt. Lett., 28 (2003), pp.1680-1682.
- [3] Nishikino, M., et al., "Demonstration of a soft-x-ray laser at 13.9 nm with full spatial coherence," Phys. Rev. A, 68 (2003), 61802.
- [4] Ohnishi, N., et al., "Radiation effects on hydrodynamic perturbation growth due to non-uniform laser irradiation," J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., 71 (2001), pp.551-560.