

小特集:レーザー核融合技術

## 2. レーザー技術

### 2.2 KrF レーザー

大和田野芳郎, 奥田 功, 松嶋 功, 屋代英彦, 松本裕治  
(電子技術総合研究所)  
(1994年10月25日受理)

#### Laser Technologies KrF Laser

OWADANO Yoshiro, OKUDA Isao, MATSUSHIMA Isao,  
YASHIRO Hidehiko and MATSUMOTO Yuji  
*Electrotechnical Laboratory, Tsukuba 305, Japan.*

(Received 25 October 1994)

#### Abstract

Krypton-fluoride (KrF) laser is one of the promising driver for inertial confinement fusion because of its short wavelength, broad band width, high efficiency and capability of high repetition-rate operation.

A high gain double-pass amplifier can yield a high, heavily saturated output intensity (5 to 6 times saturation intensity,  $> 10\text{MW}/\text{cm}^2$ ) with nearly maximum efficiency ( $> 10\%$ ) and high stage gain ( $> 50$ ) at the same time. The high gain can be achieved by cylindrical electron-beam pumping configuration without external magnetic field.

Angular pulse multiplexing enables efficient pulse compression and amplification of beams with broad spectral width. The broad band width is required for irradiation smoothing methods, BRP (broad-band Random Phase Irradiation) or ISI (Induced Spatial Incoherence).

Multi-kJ KrF laser, Super-ASHURA (Electrotechnical Laboratory, 8kJ), NIKE (at Naval Research Laboratory, 3kJ) and TITANIA (Rutherford Appleton Laboratory, 2kJ) are being developed and close to completion.

#### Keywords:

KrF laser, high-power, inertial confinement fusion, driver, electron beam, pulse multiplexing.

## 1 KrFレーザーの特徴

KrF レーザーは、クリプトンとフッ素の混合ガスを動作媒質とするレーザーで、1) 媒質自身の効率が高い、2) レーザーガスの循環冷却による高繰り返し動作が可能、3) 波長が248nm と短くターゲットの効率良い爆縮に適している、4) 波長幅が広く (2nm) 照射均一化や超短パルスの増幅にも適している、5) 大型化が容易で媒質の増幅率も高く増幅器の段数が少なくシステムを構成できる、など種々の利点を有し、慣性核融合炉用ドライバーの有力候補として開発が進められている。

KrF レーザーのシステム構成を Fig. 1 に示す。この中の主要な構成要素である増幅器の動作と構造、多重パルス光学系及び、照射平滑化法について概説した後、現在の開発状況を紹介します。

## 2 KrFレーザー媒質の動作

KrF レーザーの増幅器では、1~数気圧の混合ガス中に、大電流の電子ビームを打ち込んで励起する。混合ガスの組成比、励起密度、レーザーパワー密度等に対するレーザー動作の各種パラメータは詳しく調べられており [1]、最適の条件を組み合わせれば、数ナノ秒以上のパルス幅に対して10%以上の内部効率 (出力レーザーエネルギー

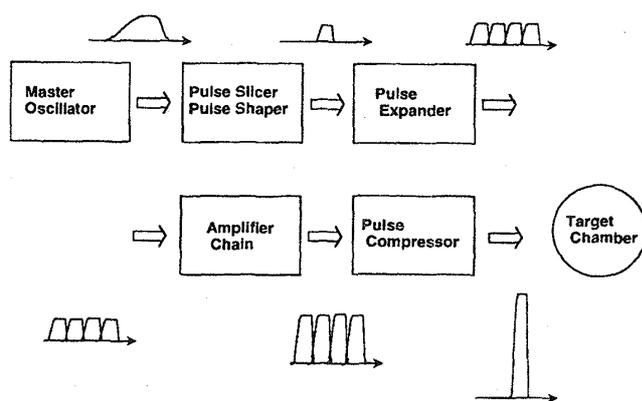


Fig. 1 Schematic of a KrF laser system with angular pulse multiplexing. In a high-power KrF laser, angularly coded pulse train is formed to match the laser pulse width to gain duration of amplifiers. After amplification, delays between pulses are removed so that every pulse arrives on target simultaneously.

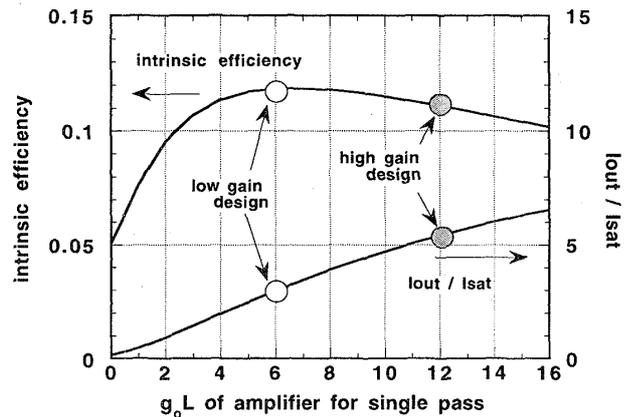


Fig. 2 Intrinsic efficiency and output intensity versus single-pass gain length product of double-pass KrF laser amplifier. Input intensity and upper level formation efficiency are fixed to be  $0.1 I_s$  and 25% respectively. Compared with low gain (efficiency optimum) design, high gain design gives over 2 times higher output intensity with only a slight decrease in intrinsic efficiency.

／ガスに注入されたエネルギー)の達成が可能である。

Fig. 2 に往復増幅配位における出力レーザー強度 ( $I_{out}$ ) と内部効率の増幅器の初期利得長積 ( $g_0L$ ) に対する依存性示す (入力強度  $I_{in}$  は飽和強度の0.1倍と一定、飽和強度  $I_s$  は混合ガスの組成によるが  $1.5 \sim 2.5 \text{ MW/cm}^2$ )。KrF レーザーの媒質は自己吸収係数が高く動作強度には最適値 (飽和強度  $I_s$  の2.2倍程度、Fig. 2 ではこれに対応する  $g_0L$  は6) があるが、 $g_0L = 10 \sim 12$  の大きな値に対しても、内部効率もほとんど低下せず10%以上が維持でき、出力強度が飽和強度の5~6倍、増幅器1台当たりの増幅率も50~60倍と高く取れる。この高利得領域で増幅器を動作させることが最も実用に適している [2]。

また、KrF レーザーでは100フェムト秒以下の超短パルスの増幅にも適しており [3]、飽和エネルギー密度約  $2 \text{ mJ/cm}^2$  の数倍程度までの飽和増幅が可能である。単一のパルスを増幅する場合には、ノイズ光とのコントラストを確保するため増幅器の利得長積を低く抑える必要があるが、利得回復時間 (約2ns) 程度の間隔のパルス列を増幅する場合には、上記のような高利得動作が可能で、エネルギー取り出し効率も良い [4]。

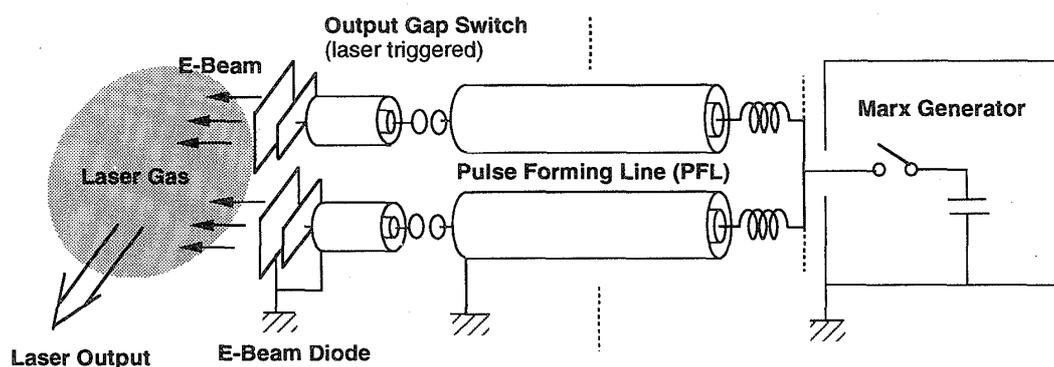


Fig. 3 Configuration of an electron-beam pumped KrF laser amplifier. Initially stored energy in the Marx generator is transferred to water-filled pulse forming lines (PFLs). When the output gap switches are closed simultaneously, short voltage pulses are transferred to electron-beam cathode. Electron-beams are injected into laser gas through anode foil(s).

### 3 電子ビーム励起型増幅器

電子ビーム励起方式は、大体積のレーザーガスの効率の良い励起に適しており、大出力の KrF レーザー増幅器に用いられる。

Fig. 3 に電子ビーム励起型増幅器の構成を示す。マルクス発生器は複数のパルス成型線路 (Pulse Forming Line) を充電し (充電時間約  $1\mu\text{s}$ , 電圧  $1\sim 2\text{MV}$ )、この充電が完了した時点で出力ギャップスイッチ ( $\text{SF}_6$  ガス充填のギャップスイッチ) を閉じると、短い矩形電圧波 (パルス幅約  $100\text{ns}$ , 電圧  $0.5\sim 1\text{MV}$ ) が電子ビーム発生ダイオードに転送される。ダイオード陰極に負の電圧が印加されると、電界放出によって電子ビーム (ダイオード当たり約  $100\text{kA}$ , 電流密度約  $100\text{A}/\text{cm}^2$ ) が引き出され陽極薄膜、圧力保持膜 (いずれも厚さ数十ミクロンの金属薄膜, チタンなどが用いられる) を通してガス中に打ち込まれる。

複数の電子ビーム間の同期をとるために、出力スイッチのトリガーにはレーザートリガー方式が用いられる。KrF レーザー光をトリガーに用いると、 $20\text{mJ}$  程度の低いエネルギーで、 $1.5\text{MV}$  までの耐電圧のスイッチをタイミングのばらつき  $5\text{ns}$  程度で閉じることができる。

電子ビームの配位には、外部磁界をかけて対向する2方向からビームを打ち込む配位 [5], または、外部磁界を用いず多方向から円筒状に打ち込

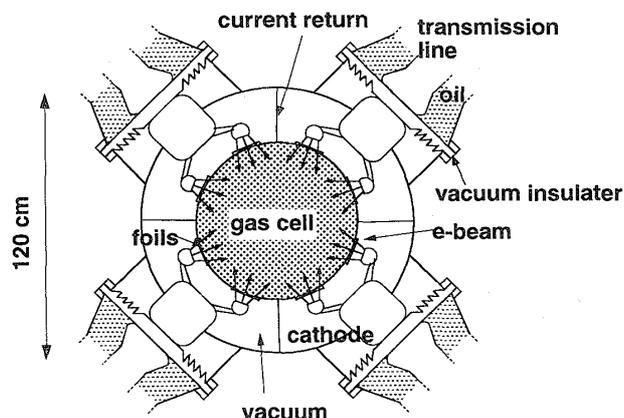


Fig. 4 Cross section of a cylindrically pumped amplifier, main amplifier of the Super-ASHURA. A  $61\text{ cm}$  diameter gas volume is pumped from 8 directions.

む配位 [6] がとられるが、後者の方が、外部磁界を必要とせず空間的に一様で高い励起密度が得られるため前述の高利得動作に適している。Fig. 4 に円筒状励起配位の例として、後述の Super-ASHURA の主増幅器の断面図を示す。真空絶縁隔壁 (直径  $60\text{cm}$ ) や電圧パルス転送線路 (耐圧  $750\text{kV}$ , 直径  $40\text{cm}$ ) の小型化によりこのような配置が可能になった。

電子ビームのガスへの注入効率 (ガス中に注入されたエネルギー/初期蓄積エネルギー) は、現在の小型装置ではガスの阻止能が小さいため  $30\sim 40\%$  と低く全体の効率を低下させているが、増幅器の口径が増大するに従いこの注入効率は  $80\%$  近くまで上昇し、出力メガジュール級の増幅

器の総合効率(レーザー出力エネルギー/電源への入力エネルギー)は7~10%程度まで改善可能である。また、将来の繰り返し動作に関しては、すでに小型ながら100Hzで繰り返し動作する固体スイッチング素子を利用した高電圧電源(200kV, 10kA)が開発されており、ガスの循環冷却と組み合わせた繰り返し動作の技術も見通しがついてきている。

増幅器の入出力用窓には、高品質の合成石英が使用可能で、単体で1m程度のものが既に製作されている。ただし、レーザー強度が約1GW/cm<sup>2</sup>を越えると、石英の2光子吸収が無視できない大きさになるため[7]、短パルス増幅の場合には、窓厚を数mmと極端に薄くしたり、フッ化カルシウムの様な2光子吸収係数の小さな材料を用いる必要が生じる。

#### 4 多重パルス増幅

KrF レーザーは、上準位寿命が大気圧付近で1.5~2nsと短く非蓄積型であるため、増幅器の動作時間(0.1~1μs)と同じパルス幅のレーザー光によって効率良くエネルギーを取り出した後、必要なパルス幅に圧縮する必要がある。誘導ラマン散乱などの非線形効果を用いたパルス圧縮システム[8]も提案されているが、効率と波長幅に制限があり、現在、原理的に単純でほとんど損失が無視できる多重パルス増幅法[9]が有望と考えられている。

多重パルス増幅法によるパルス圧縮では、まず、前置段で成型された単一パルスを、部分反射鏡などで多数複製し、パルス間に適当な遅延時間を挿入することにより増幅器の動作時間(0.1~1μs)と同じ長さのパルス列に変換する。このパルス列を増幅器系列で増幅した後、パルス相互の遅延時間を除去し時間的に重ね合わせることによって、もとのパルス幅に圧縮し、標的を照射する(Fig. 1参照)。この方法は信頼性が高く、パルス圧縮に関する効率は90%以上が実証されている。多数のビームを扱うことになるが、既に50ビーム程度の高速度位置合わせシステムが開発され稼働している。

光学素子の耐力は最終ビーム径とコストを左右する重要な要素であるが、現在既に高反射率鏡の耐力は、レーザー照射による簡単なコンディショニングを許せば20J/cm<sup>2</sup>(パルス幅15nsに対して)以上に、また、無反射コーティングの耐力も基板自身の耐力に近い10J/cm<sup>2</sup>に達しており、増幅後は小さなビーム径での伝搬が可能になっている。

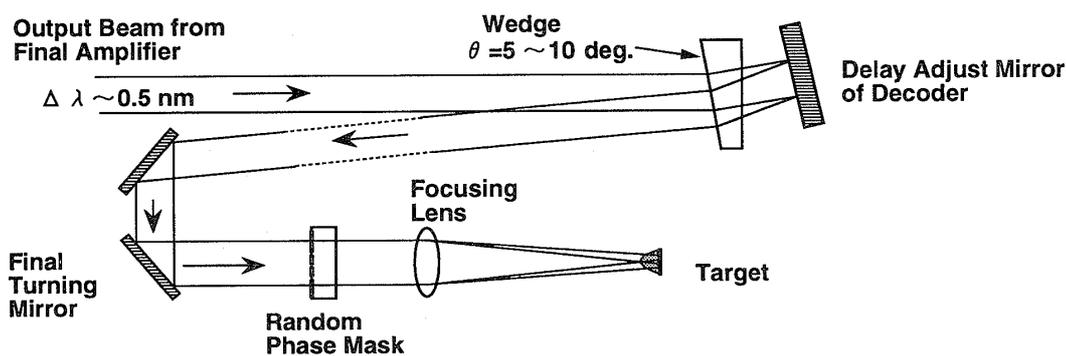
強度の高い紫外レーザー光は、長距離伝搬中に通過媒質の非線形屈折率によって空間的強度分布の不均一性が強調され、誘導ラマン散乱を励起し、エネルギーの散逸や集光特性の劣化を引き起こしやすい。しかしながら最近、Xeガスが大きな負の非線形屈折率を有することが発見され[10]、短いXeセルを光学系に挿入することで、空気等の非線形屈折率によるビームの劣化は補償できる見通しがついた。

#### 5 照射強度分布の平滑化

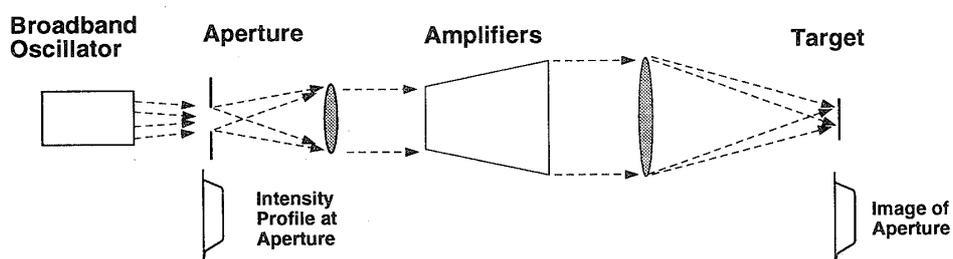
前述の様に、KrF レーザーは増幅波長幅が最大2nm近くとれるため、これを利用した照射強度の平滑化の方法が考案されている。Fig. 5にBroadband Random Phase法[11]と、Induced Spatial Incoherence (ISI)法[12]の2種類の平滑化方式を示す。

BRP法は、波長幅の広いレーザー光を位相拡散板を用いて集光しても現れる多数の微小スパイクを、増幅器系列の後(又は途中)に挿入した波長分散素子で1方向に分散し、ターゲット上で平滑化する方法である。この方法では、光学系は簡単であるが、一方向にしか平滑化できないために、これに垂直な方向の不均一性が残る欠点があり、2次元の平滑化が検討されている。

一方ISI法は、広帯域の発振器で発生した干渉性が低く空間的に様なレーザーで円形開口を照射し、この像を増幅器系列を通して忠実にターゲット上まで転送していく方法である。この方法は、高精度の像転送のために高価な光学系を必要とし、集光特性に劣るが、非常に様な強度分布が達成できる利点を持っている。



(a) Layout of Broad-band Random Phase Irradiation



(b) Layout of Induced Spatial Incoherence Irradiation

Fig. 5 Schematic of irradiation smoothing methods. (a) Broad-band random phase (BRP) method, (b) Induced spatial incoherence (ISI) Method. In BRP, spiky profile produce by random phase plate is one-dimensionally smoothed by a thin dispersing wedge in the beam line. In ISI, a smooth beam profile produced at the beginning is carefully relayed to target.

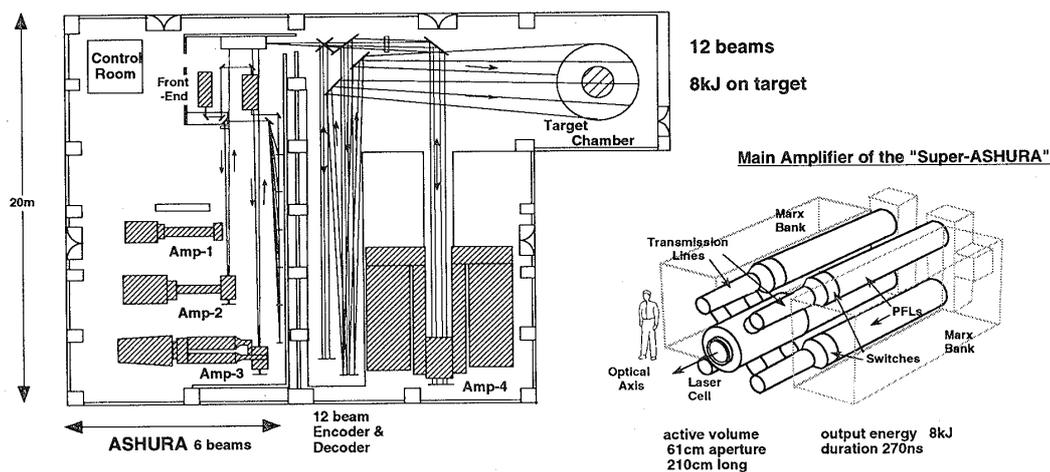


Fig. 6 Layout of the Super-ASHURA KrF laser and its main amplifier. The Super-ASHURA aims at 8kJ output energy with 12 beams. Its main amplifier has 61 cm aperture and 210 cm gain length.

## 6 KrFレーザーの開発状況

現在, 照射実験用に稼働中の最大の KrF レーザーは Fig. 6 に示す電子技術総合研究所の「ASHURA」であるが, 同システムでは6ビームの多重増幅によって最大660J の出力エネルギー(パルス幅15ns), 増幅器の総合効率2%達成され[13], 平面ターゲット照射実験に用いられている上, 10ps の短パルス多重増幅でも1パルスあたり4J (0.4TW) の出力が得られており[14], X線レーザーの研究に用いられている. 同システムは, 12ビーム, 最大出力エネルギー8kJ を目標とする「Super-ASHURA」に増力中で[15], Fig. 6 に示す主増幅器(口径60cm, 増幅長2m)は円筒状の励起配位で, すでに一部稼働を開始しており, 大幅な励起効率の改善が確認されている. 照射の均一化には前述のBRP法が用いられる予定である.

米国 Naval Research Laboratory では, 前述の ISI 法による超均一照射(不均一性2%以下)を目標とする NIKE システム(56ビーム, 3kJ)を開発中で[10,16], 中間段までではあるが不均一性1%以下の平滑ビームの伝搬を確認しており, 最終段増幅器(口径60cm×60cm, 2方向励起配位)も間もなく稼働を開始する段階にある.

また, 英国 Rutherford Appleton 研究所では, 稼働中の Sprite システム(長パルス最大出力200J)を増力中で[17], その主増幅器 TITANIA(口径40cm, 円筒状励起配位, 最大出力2kJ)の動作試験が行われている. 同システムは, 前方ラマン増幅による短パルスのパワー増倍と高い集光特性を特徴としており, 現有のシステムで $10^{18}$ W/cm<sup>2</sup>(パルス幅12ps)という超高パワー密度を達成している[18].

## 7 まとめ

KrF レーザーの動作と開発の現状を概説した. 現在数キロジュール以上のシステムが各国で完成しつつあり, これを用いた照射実験が近い将来開始されようとしている. KrF レーザーは, 短波長, 均一照射, 短パルス増幅による高集光強度の達成が可能などの利点の他, 将来の核融合用ドラ

イバーとして, 高効率, 繰り返し動作が容易, コストが低いなどの高いポテンシャルを持っている. 今後の発展が大いに期待される.

## 参考文献

- [1] H. Nishioka *et al.*, Short-Wavelength Lasers and Their Applications (Springer-Verlag, Berlin,1988) p.208.
- [2] Y. Owadano *et al.*, *Proc. 7th International Conf. Emerging Nuclear Energy Systems* (World Scientific Publishing Co. Singapore,1994) p.141.
- [3] S. Watanabe *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.*, **B6**, 1870 (1989).
- [4] 大和田野芳郎他:電気学会研究会資料 OQD-91-4 (電気学会, 1991).
- [5] R.A. Rososha *et al.*, *Fusion Technology* **11**, 576 (1987).
- [6] C. Edwards *et al.* *Excimer Lasers* (American Institute of Physics, New York,1983) p.59.
- [7] T. Tomie *et al.* *Appl. Phys. Lett.* **55**, 4 (1989).
- [8] M.J. Shaw *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.*, **B3**, 1466 (1986).
- [9] J.A. Hanlon and J.MacLeod, *Fusion Technology* **11**, 634(1987).
- [10] S. Bodner *et al.* *Proc. 15th Int. Conf. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research* (Sep. 1994, Sevilla, Spain) B-2-II-6.
- [11] I. Matsushima *et al.*, *Opt. Communications* **84**, 175 (1991).
- [12] R.H. Lehmborg and J.Goldhar, *Fusion Technology* **11**, 532 (1987).
- [13] Y. Owadano *et al.*, *Laser and Particle Beams* **7**, 383 (1989).
- [14] 奥田功他:電気学会論文誌 C **111** (8), 301 (1991).
- [15] Y. Owadano *et al.*, *Proc. 15th Int. Conf. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research* (Sep. 1994, Sevilla, Spain) B-P-7.
- [16] S. Bodner *et al.*, *Proc. 12th Int. Conf. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research* (IAEA, Vienna,1990) 3, p.81.
- [17] M.J. Shaw *et al.*, *Laser and Particle Beams* **11**, 331 (1993).
- [18] M.J. Shaw *et al.*, *Opt. Lett.* **18**,1320 (1993).