過渡的衝突励起方式による X 線レーザー開発

永島圭介, 河内哲哉, 加道雅孝, 田中桃子
長谷川登, 助川綱太, 難波慎一, TANG Hua-Jing
大道博行, 加藤義章

(日本原子力研究所関西研究所光量子科学研究センター)

Development of X-Ray Laser by Transient Collisional Excitation

NAGASHIMA Keisuke, KAWACHI Tetsuya, KADO Masataka, TANAKA Momoko,
HASEGAWA Noboru, SUKEGAWA Kota, NANBA Shinichi, TANG Hua-Jing,
DAIDO Hiroyuki and KATO Yoshiaki

*Advanced Photon Research Center, Kansai Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute,
Kyoto 619-0215, Japan*

(Received 11 January 2002)

Abstract

Compact x-ray lasers are being developed by transient collisional excitation method using a CPA (chirped pulse amplification) laser system as a pumping driver. The pumping laser is focused with a line shape and is irradiated on solid metal targets (Ti, Ag and Sn). The x-ray lasers were obtained at wavelengths of 32.6 nm (Ne-like Ti), 13.9 nm (Ni-like Ag) and 11.9 nm (Ni-like Sn). Further experiments will be planned using seeding light amplification for generating highly coherent x-ray lasers.

Keywords:

x-ray laser, transient collisional excitation, chirped pulse amplification

1. 序論

SPring-8 に代表される大型放射光装置による短波長 X 線光源が、物性研究から地球科学、生命科学、医療等の極めて広範囲の分野で利用されているように、高輝度の X 線光源は多くの応用研究分野で切望されている。特に、小型コンパクトで、パルスあたりのフォトン数が極めて多く、時間幅が短く、かつ、高いコヒーレンスを有する高性能な短波長光源が期待されており、X 線レーザーは、軟 X 線領域におけるこの高性能光源を実現するものである。高輝度の X 線レーザー装置は、表面物性研

author's e-mail: nagasima@aprms.apr.jaeri.go.jp

究、原子過程研究、リソグラフィ応用におけるナノスケール構造の製作と検査、生体細胞の観察、X 線領域での非線形光学といった広範囲の応用分野に利用されることが期待される。

今までの X 線レーザー研究の中で様々な励起方式が試みられてきたが、現状では電子衝突励起方式が最も安定に高い出力を得ることができる[1]。レーザー波長は、水の窓領域を含む広い範囲で発振に成功しており[2]、また、ナノ秒からピコ秒までのパルス幅が得られている[3]。こうした結果を反映して、最近の X 線レーザー研究

の方向は、電子衝突励起方式を中心としてレーザー品質の向上とその利用に焦点が置かれている。

2. X線レーザーの励起方式

X線レーザーの基本原理は、通常のレーザーと同様に物質中のエネルギー準位間で反転分布を生成し、誘導放射により光増幅するものである。ただし、大きなエネルギー差の準位間で反転分布を作るために、多くの場合、レーザー媒質として多価に電離したプラズマを用いることが異なる点である。Fig. 1に、エネルギー準位と励起方式の簡単なモデルを示した。基底状態から反転分布状態を作る励起方法として、主に電子衝突励起、再結合励起、内殻電離励起が考えられている。電子衝突励起では、レーザー発振する光のエネルギーに比べて励起エネルギーが比較的大きいため、高い電子温度のプラズマを生成する必要がある（ただし、高い増幅係数を得るためには、発振線のスペクトル幅が狭い方が良いので、一般的に低いイオン温度が望まれる）。通常の再結合励起では、三体再結合による高い励起準位への再結合と衝突脱励起が反転分布生成の主要な過程となるため、低い電子温度のプラズマが必要となる。荷電交換による再結合励起では、レーザー上準位への選択的な再結合の可能性がある、高い増幅係数が期待される。一方、内殻電離励起によるX線レーザー発振は、短波長化に有利と考えられているが、まだ成功していない。最近では、比較的小規模で高出力の極短パルスレーザーが開発されており、これを用いて短パルス高輝度X線源を生成して光電離過程による励起を行う方式が期待される[4]。

最近のX線レーザー研究の中では、電子衝突励起方式の進展が注目される。この方式では、ネオン様イオンやニッケル様イオンのような閉殻構造のイオンを用いる。ニッケル様イオンの場合を考えると、基底状態では3d準位までが満たされており(3d¹⁰)、衝突励起により3d94p, 3d94d, 3d94f等の励起状態が作られる。この中で、3d94pおよび3d94fから基底状態へは許容遷移であり、ピコ秒程度の時間で輻射遷移が起こる。これに対し、3d94dから基底状態へは禁制遷移であり輻射遷移確率は極めて小さいため、衝突励起、脱励起により3d94pおよび3d94f等の状態を経由して基底状態へ緩和する。したがって、励起状態間での衝突励起、脱励起の確率が極端に大きくならないような適切なプラズマ温度、密度の条件に対して4p-4d間で反転分布が生成される。こうして得られる反転分布は、励起レーザーが照射されプラズマ条件が維持される限り継続するので、準定常状態である。

Fig. 1 Energy levels of several excitation schemes.

この電子衝突励起方式では、プラズマの生成法としてレーザー励起によるものと放電励起によるものがある。放電励起方式では、40 nm以上の長波長領域ではあるが、高繰り返しかつ高安定なレーザー出力を得ている[5]。一方、レーザー励起方式での重要な進展は、ダブルパルスを用いた過渡励起方式である[3]。この方法は、最初に比較的に長いパルスでレーザー媒質として最適なプラズマを生成し、第二パルスとして超短パルスを用いて高温に加熱し、過渡的に高い反転分布密度を作るものである。この方法により、それまでは100 J以上必要だった励起エネルギーが、数J程度まで低減することが可能となった。ニッケル様のPdイオンを用いた実験では、それぞれ4-5 Jのダブルパルスを用いて飽和増幅が達成されている[6]。

高出力レーザー光を励起源として用いた場合のX線レーザー発生の典型例をFig. 2に示す。励起レーザー光を線状に集光してターゲットに照射し、ターゲット面に沿ってX線レーザー媒質となる線状の多価イオンプラズマを生成する。多くの場合、反転分布密度はプラズマのイオン密度とともに増加するため、励起レーザーの臨界

Fig. 2 X-ray laser from solid target irradiated by high power laser. The pumping laser is focused with a line shape on the target and generates highly ionized plasmas.

密度近傍で高い増幅領域が形成される。この場合、プラズマ密度はターゲット面から離れるにつれて減少するため、屈折率はターゲット面から離れる方向に増加する分布を持つ。したがって、ターゲット面に沿って増幅されるX線レーザー光は、この面から離れる方向へ屈折される。この影響を抑えるためには、増幅領域での密度勾配の小さいプラズマを生成する必要がある。さらに、高密度プラズマ中では、輻射輸送等の複雑な原子過程に加えて、非線形現象や流体的な不安定性が発生するため、最適なレーザー照射条件、および、プラズマパラメータの選択が極めて重要である。

3. 過渡励起方式のX線レーザー実験装置

日本原子力研究所の光量子科学研究センターでは、X線レーザーの高度化と本格的な応用研究の展開をめざして、過渡的衝突励起方式を主要方式としたX線レーザー専用の実験装置を整備し、1999(平成11)年から実験を開始している。本装置は、Ti:sapphireとNd:glassをレーザー媒質として用いた高出力ピコ秒CPAレーザーシステム、Ti:sapphireをレーザー媒質として用いフェムト秒とサブピコ秒のパルスが得られるハイブリッドCPAレーザーシステム、さらに、真空パルス圧縮器、線集光光学系、ターゲット装置等を含む真空システムから構成される。過渡励起X線レーザーの実験は、主に、高出力ピコ秒レーザーシステムを用いて行っている。Fig. 3に、過渡励起方式の励起用レーザーパルス生成法を示す。まず、発振器から得られた超短パルス光をストレッチャーと呼ばれるパルス拡張器で引き延ばし、時間的に波長が変化する色分散パルスを生成する。この色分散パルスのパルス幅は、最終的に増幅したレーザー強度が媒質中での非線形効果の影響を受けない程度まで長くする必要がある。次に、パルスを2つに分けて時間差を付け、一方のパルスは最終的なパルス幅分の追加の引き延ばしを行う。この2つのパルスを同軸にした後、増幅器で所定の

Fig. 3 Generation of the pumping laser pulse for transient collisional excitation.

エネルギーまで増幅し、パルス圧縮器(コンプレッサー)へ導く。最終的に、得られるパルス波形は、プラズマ生成のための比較的長いパルス(~ 1 ns)と短時間に励起するための高強度超短パルス(~ 1 ps)となる。パルス制御器によって、2つのパルスの時間間隔や強度比等のレーザー照射条件の最適化を行うことができる。

Fig. 4に、高出力ピコ秒レーザーシステムの実際の配置を示す(本システムの詳細については文献[7])。Ti:sapphireをレーザー媒質としたモードロック発振器(Spectra-Physics社製Tsunami)から得られるパルスは、中心波長 1,053 nm、パルス幅 50 fs、パルスあたりのエネルギー約 1 nJである。このパルスをグループ数1,740本の回折格子を用いて 250 ps/nmの割合で引き延ばす。次に、Ti:sapphireをレーザー媒質とした再生増幅器(Spectra-Physics社製TSA-10)により増幅する。この増幅器からの出力パルスは、パルス幅 1.5 ns(スペクトル幅 6 nm)、パルスあたりのエネルギー 4 mJである。さらに、

Fig. 4 Layout of the high power picosecond CPA laser system. Two amplified pulses (A and B) are sent to the pulse compressors in Fig. 6.

Fig. 5 Layout of the femtosecond/sub-picosecond hybrid CPA laser system. The sub-picosecond pulse (C) is used to generate a seeding pulse for x-ray amplification.

上述したパルス制御を行った後、Nd:glass をレーザー媒質とした多段のロッド型増幅器を用いて増幅し、パルス幅 0.75 ns (スペクトル幅 3 nm)、エネルギー 20 J の出力パルスを得ている。ロッド型増幅器は、ガラスロッドの直径によって 3 種類あり、直径 9.5 mm のもの 2 台 (RA 9.5)、直径 25 mm のもの 1 台 (RA 25)、直径 50 mm のもの 3 台 (RA 50) を使用している (RA 9.5 の 1 台と RA 25 はダブルパス増幅している)。増幅後の最終的な出力ビーム径は 130 mm まで拡大している。

一方、フェムト秒とサブピコ秒のパルスが得られるハイブリッドレーザーシステムの配置を Fig. 5 に示す。フェムト秒のレーザーシステムは BMI 社製 ALPHA 10/B である。サブピコ秒のシステムは、高次高調波生成のための波長可変レーザーシステムであり、高次高調波のコヒーレントなシード光を X 線レーザー媒質で増幅するために開発したものであり、詳細は後述する。フェムト秒、および、サブピコ秒のシステムは再生増幅器と多重パス増幅器から成る増幅部分を共用していることが特徴である。サブピコ秒のコンプレッサーは大気中である

Fig. 6 Layout of the vacuum system for x-ray laser experiment. The two pulses (A and B) are compressed temporally and focused on the target to generate x-ray laser media.

が、フェムト秒のコンプレッサーはレーザー強度が高いために真空中に配置している。フェムト秒パルスの出力は、中心波長 800 nm、パルス幅 50 fs、エネルギー 150 mJ である。また、サブピコ秒パルスの出力は、中心波長 800 ± 20 nm、パルス幅 0.5 - 1 ps、エネルギー約 100 mJ である。

真空システムは、真空パルス圧縮器、線集光光学系、ターゲット装置から構成されている (Fig. 6)。パルス圧縮器では、対応するストレッチャーと同じグループ数の回折格子ペアを用いており、高出力ピコ秒レーザーからの最終的な出力は、パルス幅約 1 ps、エネルギー 14 J である。このレーザー光を放物面鏡と球面鏡の組み合わせで線状に集光し [8]、ターゲットへ照射している。ターゲット上での集光線幅は約 20 μ m で、線長は 6 mm であり、照射強度は最大で 1×10^{16} W/cm² まで得られる。増幅された X 線レーザー光は、Fig. 6 のターゲットチャンバーの右方向へ出てくる。過渡励起の場合、誘導増幅の持続時間は数 ~ 10 ps 程度であるため、X 線レーザー光が増幅媒質を通過する時間より短くなる。したがって、ターゲット面を同時に照射した場合は、レーザー光が増幅領域を伝搬する前に増幅が起こらなくなってしまうことになる。このため、レーザー光の伝搬と増幅媒質の生成のタイミングを同期させる進行波励起を用いている。ここでは、階段状のミラーを用いて X 線の増幅方向へ光速の時間差をつけてターゲットを照射している。

4. 実験結果

実際の X 線レーザー実験で用いた主なターゲット材は、チタン（原子番号22）、銀（原子番号47）、スズ（原子番号50）である。チタンの場合は、ネオン様イオンを、銀およびスズの場合は、ニッケル様イオンを用いて反転分布を生成する。それぞれの発振波長は、チタンが 32.6 nm、銀が 13.9 nm、スズが 11.9 nm である。銀を用いた場合の X 線レーザー光の例を Fig. 7 に示す。これは、斜入射分光器を用いて分光した光を X 線フィルムで撮影したものである。バックグラウンドの信号レベルに対して 13.9 nm のところの光だけが強くなっていることがわかる。X 線レーザー光は誘導増幅されるので、媒質長に対して指数関数的に変化する。Fig. 8 は、銀レーザーの場合にターゲット長を横軸にして、X 線レーザー光の相対強度をプロットしたものである。レーザー照射の条件は、

Fig. 7 Spectroscopic photograph of the silver x-ray laser, of which wavelength is 13.9 nm. Here the spectrum is shown in the horizontal direction.

Fig. 8 Dependence of the silver x-ray laser intensity on target length without traveling wave pumping.

入射エネルギーが 12 ± 2 J で、プラズマ生成用の第 1 パルスのパルス幅が 600 ps、励起用の第 2 パルスのパルス幅が 1.5 ps、2 つのパルス間隔が 600 ps で、パルスのエネルギー比は 1 : 3 である。この場合、進行波励起は行っていない。ターゲット長が 0.4 cm 以下の範囲では指数関数的に増加しており、この傾きから評価した増幅係数は 24 cm^{-1} である。通常、X 線強度がある値（飽和強度）より高くなると増幅によって反転分布量が減少するため、指数関数的な増加は起こらなくなる。この領域を飽和増幅と呼び、X 線強度は媒質長に比例して増加する。ターゲット長が 0.4 cm 以上の領域では、X 線強度が飽和しているように見えるが、増幅係数と媒質長の積は 9.6 であり（この場合の媒質長は X 線レーザー強度が飽和している点での長さである）、この値からは X 線レーザーが飽和強度に達しているとは考えられない（一般に、飽和増幅に達する増幅係数と媒質長の積は 15 程度の値である [9]）。この原因としては、X 線レーザーの伝搬する時間と増幅媒質の持続時間との関係が考えられる。前述したように、6 mm のプラズマ媒質中を光が伝搬するのに 20 ps かかるが、過渡励起で得られる高い増幅係数の持続時間は 10 ps 程度なので、途中までしか増幅されていないと考えられる。

Fig. 9 は、ほぼ同じレーザー照射条件で、進行波励起を行った場合である。Fig. 8 の場合と同様に、ターゲット長に対して、指数関数的に増加した後、飽和しているのが

Fig. 9 Dependence of the silver x-ray laser intensity on target length with traveling wave pumping.

観測される．この場合の増幅係数は 35 cm^{-1} で、増幅係数と媒質長の積は 13.5 と評価される．この値から、飽和している領域ではほぼ飽和強度に達していると考えられる[9]．

得られた X 線レーザーのビーム特性について、ビームの強度パターンを X 線 CCD カメラで測定した．まず、X 線レーザー媒質から 1 m 程度離れた位置でのビームパターンから発散角を評価した．X 線強度が飽和している場合、ターゲット面に直交する方向の発散角は 4 mrad、ターゲット面に平行な方向の発散角は 7 mrad であった．X 線レーザー媒質の形状は、長さ 6 mm、幅 $50 \mu\text{m}$ 程度なので、アスペクト比(媒質長/媒質径)は 120 となり、この逆数が発散角になると考えれば 8 mrad で、ほぼ測定値と一致する．

さらに、直入射の X 線ミラーを用いて 10 倍の拡大集光系をつくり、X 線レーザー媒質の出口位置での X 線像を観測した．Fig. 10 は、この強度パターンの典型例である(進行波励起なしで、X 線強度が飽和している場合)．白い縦線はターゲット表面位置である．X 線強度のピークはターゲット表面から約 $50 \mu\text{m}$ に位置しており、強度分布の半値幅はターゲット面に直交する方向が $25 \mu\text{m}$ 、平行な方向が $60 \mu\text{m}$ である．強度分布の形状は全体的に弓なりに曲がっていて、内部(強度のピーク近傍)には細かい構造が見られる．全体的な形状については、励起レーザーの照射条件が同じであれば、ほぼ同様の形状が得られており、X 線レーザーの増幅媒質の空間分布と密度分布による屈折効果の結果と考えられる．一方、内部構造については、ショットごとにより変化することが観測されており、微視的な媒質分布がショット毎に変化していることを明示している．レーザー媒質としては、増幅する光の波面を乱さないような均質なものが望ましく、増幅媒質分布が時間的、空間的に揺らいでいるとすれば問題である．他の実験結果[10]においては、媒質長を長くしても予想どおりにコヒーレンスが高くないという結果も出ており、プラズマ媒質のミクロ構造の影響は未解決の課題である．

5. X 線レーザーの高度化

放射光 X 線源に代表される他の高輝度 X 線源と比較した場合の X 線レーザーの特長として、高コヒーレンス、超短パルス、パルスあたりの光子数が多いといったことがあげられる．X 線レーザーの研究開発では、より短波長をめざすと同時にこうした特長を生かしていくことが重要である．過渡励起方式の場合、波長 10

Fig. 10 Near-field pattern of the x-ray laser intensity. The solid line shows the target surface position and the horizontal direction is normal to the target surface. The pumping laser pulse is irradiated from the left-hand side and the x-ray laser propagates in the direction normal to the figure.

Fig. 11 Geometry of x-ray laser medium and beam divergence. The symbols are the medium length, l , the medium diameter, d , the beam divergence, ϕ , the distance from the medium, L and the beam diameter, D .

nm 領域の X 線レーザーでは、10ピコ秒程度のパルス幅が得られ、飽和強度は概そ 10^{11} W/cm^2 である．したがって、パルスあたりの飽和フルエンスは 1 J/cm^2 程度、光子数で言えば $10^{17} \text{ photons/cm}^2$ である．

X 線レーザーの特長として、最も重要なものはコヒーレンスである．一般的には、X 線レーザーの指向性を上げて空間コヒーレンスを良くするために、レーザー媒質のアスペクト比を大きくすることが望まれる．Fig. 11 には、増幅媒質とレーザー光の発散角の幾何形状を示した．本実験で得られた X 線レーザー媒質の場合、媒質長は $l=6 \text{ mm}$ 、媒質幅は $d=30 - 60 \mu\text{m}$ であり、アスペクト比は 100 - 200、幾何形状から決まるビーム発散角は 5 - 10 mrad である．レーザー波長が λ の場合、光源からの距離 L におけるコヒーレント長は $L\lambda/d$ で評価されるので、上記の波長 13.9 nm の銀レーザーの場合、光源から

1 m 離れた位置でのコヒーレント長は 0.2 - 0.4 mm となる。1 m 離れた位置でのビーム径は、5 mm 程度であるから、このレーザー光は部分コヒーレント光である。この場合、コヒーレント長をビーム径より長くするためには、 $\lambda/d > d/l$ の関係を満足する必要がある。

通常のレーザーの場合、高い反射率のミラーを用いた共振器から得られる光は、空間的に高いコヒーレンスを有することができる。X 線レーザーにおいても、X 線用の多層膜ミラーを用いて共振器をつくることは可能であるが、過渡励起方式の場合のように増幅の持続時間が短い媒質の場合は本質的に困難である。むしろ、レーザー媒質を 1 パスするだけで飽和強度まで増幅できる程に増幅係数が大きいことを利用して、コヒーレンスの高いシード光を X 線レーザー媒質で増幅することが有利である。この場合はシード光の生成法が問題であるが、2 つの方法を考えている。第 1 の方法は、1 つの X 線レーザーを発振させて、この光を空間フィルタでモード選択してからもう 1 つの X 線レーザーで増幅するものである。第 2 の方法は、X 線レーザーの発振波長に合わせて高次高調波を生成して、この光を X 線レーザーで増幅するものである。いずれの場合も、空間的、時間的な結合を綿密に図ることが不可欠であり、高度な同期技術が必要である。

まず始めに、X 線レーザー光自身をシード光として用いる方式について、最も簡単な配置を Fig. 12 に示す。この場合、まったく同じ励起レーザーの照射条件とターゲット材を用いてダブルターゲット照射を行う。ただし、2 段目のターゲットについては、照射のタイミングを光速分だけ遅らせること、および、2 段目の増幅媒質単体からの自然増幅光とのコントラスト比を高くするために増幅率を適当な値にする（媒質長を制限する）必要がある。この場合のビーム発散角およびコヒーレンス長については、 $L\lambda/d > d$ を満足すれば、2 段目の増幅媒質へ入るビームをフルコヒーレント光（コヒーレンス長 > ビーム径）にすることができる。波長 14 nm の X 線の場合、媒質径を $d = 50 \mu\text{m}$ 、媒質長を $l = 6 \text{ mm}$ 、ターゲット間距離を L とすれば、この条件は $L \geq 20 \text{ cm}$ となる。1 段目の増幅媒質の出口位置での X 線強度に比べて、2 段目の増幅媒質の入口での強度は l^2/L^2 倍に低下するので、最終的に飽和強度の X 線を得るためには、2 段目の増幅率を L^2/l^2 程度にするのが適当である。上記の値を用いれば、適当な増幅率は 10^3 である。X 線レーザー光自身をシード光として用いる場合の最大の利点は、シード光と増幅媒質の波長が合致している点である。また、1 つの

Fig. 12 Amplification of seeding light by pumping double targets. The symbols are the medium length, l , the medium diameter, d and the distance between two media, L .

Fig. 13 Amplification of seeding light using higher harmonics. The wavelength of higher harmonic light is adjusted to that of the x-ray laser using the wavelength tunable laser.

Fig. 14 Oscillator and pulse stretcher of the wavelength tunable Ti:sapphire laser, which is a pulse length of sub-picosecond.

励起レーザー光を分離して用いればよいので、時間的な同期についても容易である。

もう 1 つのシード光生成法である高次高調波の場合の配置を Fig. 13 に示す。この場合は、高次高調波生成用のレーザーと X 線増幅媒質生成用レーザーは別のものを用いる必要がある。このため時間的な同期を得るためには、2 つのレーザーを発振器の段階で同期させる必要がある。また、波長については、中心波長および波長幅のマッチングをとる必要がある。この高次高調波のシード光増幅実験のため、波長可変のサブピコ秒 Ti:sapphire レーザーシステムを開発した。Fig. 14 は、このシステムの発振器およびストレッチャー部を示したものである。発振器は、プリズムペアを用いた標準的なモード同期超

短パルス発振器であるが、共振器内の空間的に色分散させた位置に可動式スリットをいれ、中心波長および波長の制御を行っている。発振器からの光はグループ数 2,000 本の回折格子で 100 ps/nm でストレッチしている。可動式スリットによる中心波長の選択に対応して、回折格子の角度を調整する。また、スペクトル形状を制御するために、ストレッチャー内の色分散させた位置に 1 次元の吸収フィルタを入れ、スペクトルフィルタとしている。ここから得られた光は、前述したフェムト秒システムの増幅器を用いて増幅し、ストレッチャーで使用しているのと同じグループ数 2,000 本の回折格子ペアを用いたコンプレッサーでパルス圧縮する。得られたパルスは、中心波長 780 ~ 820 nm の領域で可変で、波長幅 2 nm、パルス幅 0.5 ~ 1 ps、エネルギー約 100 mJ である。このパルスを用いた高次高調波生成実験では、アルゴンガスを用いた場合の 25 次光として、ビーム発散角 2 mrad、スペクトル幅 0.05 nm 以下(この値は使用した分光器の波長分解能による)の光が得られている。今後、X 線増幅媒質として、波長 32.6 nm のネオン様チタン(高調波は基本波長 810 nm の 25 次光)、および、波長 13.9 nm のニッケル様銀(高調波は基本波長 797 nm の 57 次光)を用いた高調波の増幅実験を計画している。

X 線レーザーの実用化に向けては、小型化、高繰り返し化、高効率化、高安定化等の多くの課題を解決する必要がある。現在、過渡励起方式の実験で使用されているレーザー装置のほとんどは、フラッシュランプで励起するロッド型ガラスレーザー増幅器を用いたものであり、繰り返しは数分から数十分に 1 回で、電気から X 線レーザーへのエネルギー変換効率は 10^{-9} 程度である。また、出力安定性も極めて低い状況である。これらの問題に対しては、励起用ドライバとしてレーザーダイオードによる直接励起型の高出力超短パルスレーザーを開発するのが有効であり、Nd:glass をレーザー媒質として用いた場合、10 Hz 程度まで繰り返し化することが可能である[11]。さらに、熱伝導度、および、飽和フルエンスが高い Yb:YAG や Yb:YLF のようなレーザー媒質を用いて

100 - 1,000 Hz まで高繰り返し化することも期待される。

6. 結 論

X 線レーザー研究が開始されてから 20 年以上になるが、まだに実用段階には至っていない。これは、従来の実験設備の多くが大規模なレーザー装置を用いたものであり、また、定常的に利用できる安定な X 線レーザー光源が実現されていないことによると考えられる。一方で、放射光による高品質の X 線源は、比較的装置規模が大きいにもかかわらず、基礎科学の研究から医療等まで極めて広範囲の分野で実用段階にある。したがって、実用的な X 線レーザーが実現されれば、実験室規模でフレキシブルな X 線利用の展開が可能になるとともに、その特長である高コヒーレンス、極短パルス、超高輝度等を生かした新しい応用分野も期待される。このため、比較的小型装置で安定に高い出力を得ることができる過渡的衝突励起方式による X 線レーザーの開発を進めており、10 nm 領域での発振に成功するとともに、高コヒーレント化をめざした研究を展開している。

謝 辞

本研究を行うにあたって、多大な協力および有益な議論をいただいた大阪大学レーザー核融合研究センターの児玉了祐、金辺 忠、北村寿男氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] D.L. Matthews *et al.*, Phys. Rev. Lett. 54, 110 (1985).
- [2] B.J. MacGowan *et al.*, Phys. Rev. Lett. 65, 420 (1990).
- [3] P.V. Nickles *et al.*, Phys. Rev. Lett. 78, 2748 (1997).
- [4] H.C. Kapteyn, Appl. Opt. 31, 4931 (1992).
- [5] J.J. Rocca *et al.*, Phys. Rev. Lett. 73, 2192 (1994).
- [6] J. Dunn *et al.*, Phys. Rev. Lett. 80, 2825 (1998).
- [7] T. Kawachi *et al.*, *to be published in* Appl. Opt.
- [8] I.N. Ross *et al.*, Appl. Opt. 26, 1584 (1987).
- [9] R.C. Elton, *X-RAY LASERS*, (Academic Press, 1990).
- [10] J.E. Trebes *et al.*, Phys. Rev. Lett. 68, 588 (1992).
- [11] K. Nagashima *et al.*, JAERI-Conf 2000-006, 133 (2000).