高繰り返しレーザープラズマ光源用ターゲット開発と実用化の歩み ーXeクライオジェニックターゲット供給法の展開ー

望月 孝晏, 井上 隆博

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 (〒678-1205 兵庫県赤穂郡上郡町光都3-1-2)

Brief History of Targets for High-Rep-Rate Laser-Plasma X-Ray Source - Focused on Approaches Using Xe Cryogenic Targets -

Takayasu MOCHIZUKI and Takahiro INOUE

Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo,
3-1-2, Kouto, Kamigori, Ako-gun, Hyogo 678-1205

(Received August 10, 2004)

Historical review of high-rep-rate laser-plasma x-ray source is presented with being focused on approaches using Xe cryogenic targets and related issues. Recent achievements on EUV output power in international competitions and collaborations by research groups are summarized.

Key Words: Laser-plasma x-ray source, Xenon, Cryogenic target, Mass limited target, Debris free

1. はじめに

レーザープラズマ光が研究され始めて既に30年近くになろうとしている。それはレーザーのピークパワーの向上とともに実現可能になった高温高密度プラズマから発光する。レーザープラズマ光源はシンクロトロン光源に比べ小型であるという利点があるため、X線顕微鏡¹⁾、分光の光源、近接露光リソグラフィ(X線リソグラフィ)の光源²⁾として研究されてきた。レーザープラズマX線の応用については早くも1974年にMallozziらにより、医療応用が提案された^{3,4)}。Nagelらの仕事は光リソグラフィへの応用(Pulsed x-ray lithography)を実証したパイオニアの仕事として有名である⁵⁻⁷⁾。これら当時の研究状況はNRL Memorandum Reportに詳しく採録されている⁸⁾。彼らの研究はその後のレーザープラズマX線応用研究活動の始まり前夜と言ってよいだろう。最近の最も明確な応用は極端紫外光リソグラフィ(EUVL)用光源である。

本解説論文ではレーザープラズマの物理とX線発生についての解説は優れた教科書^{9,10)}や本特集の他論文に譲り¹¹⁾、高出力でレーザープラズマX線源を実用的な光源とするために必要な、もしくは必要と考えられるが故に生まれたターゲットについて公にされた主な特許(アイデア)並びに文献を中心に時系列的に振り返り、現在までに開発研究で到達した方式への展開を概観する。特に、ターゲットの高速供給が可能であり、デブリの影響が少ないキセノン(Xe)ターゲットに焦点を絞り、その関連技術

を中心に話を展開する。当然、必要なEUV光が効率よく発光してくれることが必要条件であるが、上記の高速供給性やデブリ問題フリーであることなどは連続運転を前提条件とする実用的高出力EUV光源にとって極めて重要な因子である。供給速度はレーザー光入力と連動してEUV出力上限を物理的に決定する要因となる。また、発光効率が例えば2倍異なってもレーザー入力をそれに比例して調整するのはコストの問題であるが、デブリの光学素子への堆積または損傷は致命的であろう。余程、効率よい堆積除去法又は防止法が発見されない限り実用にならない恐れがある。それ故、姫路工業大学(現・兵庫県立大学)ではXeクライオジェニックターゲットに的を絞って研究を行ってきた。勿論、文献の全てを網羅することは出来ないので脱落を覚悟でそれらの内、先行性と実用性に比較的大きな影響を与えたものを独断と偏見の誇りを覚悟で紹介する。『古きを温ねて新しきを知る』の諺にあるように、流れを見て、新しい展開が発想できれば幸いである。最後に現在、国際的な競争となっている光源開発の成果として、各研究グループが現実を得られた変換効率と発光強度の現況を示し、今後予想される動向と中心課題を紹介する。

2. Xeクライオジェニックターゲットに関わる 発明・研究の経緯

ターゲット技術の展開は大きく分けて、70年代から80

年代中頃までの創世記・古典の時代(第1期), 80年代中頃から2000年代初頭までの探索の時代(第2期), それから今日に至るまでの実用化集中の時代(第3期), に分けられるであろう。

2.1 第1期; 創世記・古典の時代

前述の米国内における先駆的活動があったが, 日本でも少数ではあったがアイデア上で開発活動があった。岩松らは, かなり早期に, X線発生源において周辺装置表面および主としてX線窓に付着しX線の劣化を発生させず, 容易にガス化あるいはガス化後の排出を可能とするターゲット物体材料としてアルゴン, クリプトン, キセノン, 等の不活性元素, 並びに水, アンモニア, 炭酸ガスの結晶固体を用いることを提案した¹²⁾。しかし, 集光点へのターゲット供給方法について具体的方法は提示されなかった。またForsythらは, 「Long life x-ray source target」として, 円筒ドラム方式とテープターゲット方式の二つの方式を提案した¹³⁾。さらに彼らはテープ上にキャビティーを持つ場合にはより強いX線がでることを主張した¹⁴⁾。

これらの古典的X線発生装置のうち, 円筒ドラム方式においては, Fig. 1に示すように真空チャンバー内に金属ターゲット回転体を配置し, この表面にレーザー光を集光する。ターゲットを回転・平行移動することによって常に新しい面が集光点に供給される。問題は, 金属蒸気の蒸着, 次に金属ターゲット回転体の交換である。一番目の問題を解決する方法として考え出されたアイデアのひとつは, 薄膜金属ターゲットの使用により, プラズマ化してX線発生に参加することのできるターゲット材料の量を限度としてターゲットの質量を制限するものである¹⁵⁾。そのためのターゲットはFig. 2に示すように基板に小穴を開け, そこにポリイミドまたはSi-Nの薄膜をはり, その上の部分だけに付けられた金属ターゲット箔は質量が極めて少量であるため, レーザー照射することによって発生するデブリの量を最小にする特性がある。質量制限ターゲット「Mass limited target」と呼ばれる。他の方法としては, 蒸着後にチャンバー内へ反応ガスを導入し, 高周波(RF)でプラズマ化することにより蒸着粒子をガス化して排出する方法¹⁶⁾や, 或いは, ターゲット物質として

Fig. 1 X-ray lithography system having a first type of movable target mechanism.¹⁴⁾

Fig. 2 Cross section view of an improved mass limited target adapted for a commercial long life target.¹⁵⁾

雰囲気ガスとの化合・分解等によってガス化する物質を用いる方法¹²⁾などが日本にてアイデアとして提案された。しかし, これらはいずれも操作が煩雑で装置の連続運転を不可能にするものであった。米国にてHampsher Instruments, Inc. がレーザープラズマX線源を用いたX線リソグラフィステッパーの製品化を目指して創業され, 活発な開発行為がなされたが創業者の悲劇的死によってその活動を停止したのはこの時代から次の第2期の始まる頃であった。

ここで忘れてはならないのが, 第1期の始まりと同時期に行われていた谷本によるクライオジェニックペレットターゲット生成の研究である¹⁷⁾。彼は, 磁場閉じ込め核融合用燃料ペレットとして, ピエゾ素子に駆動されたノズルより低温液化燃料を射出して, 直径約100 μm の液滴を生成し, これが固化したペレットを静電加速して, 閉じ込め磁場中に打ち込み, レーザーパルスをこれに照射してプラズマ化することを試みた。目的が全く異なるが, 本方式の概念は, 後日のEUV光源用液滴ターゲットの方式とすでに本質的に同じであった。

2.2 第2期; 模索の時代

野田ら¹⁸⁾は, ターゲットとして液体金属の液滴を用い, レーザーパルスに同期して供給する例として水銀を提案した。液体金属を使うことによってターゲットを回収リサイクルさせることができたとした。Fig. 3に示すような装置で100°C以下の融点の金属として水銀以外にガリウム, インジウム, セシウム, カリウムが想定された。佐藤らは, プラズマの拡散を防ぎ, X線発生効率を向上するためにターゲットを磁場中に置いて発生したプラズマを局在化する方法を提案した¹⁹⁾。また, 判保らも液体金属を用いてこれを真空中に滴下し, 液体金属の液滴をターゲットとする方法を提案した²⁰⁾。これら液体金属ターゲットは基本的に高速供給の点では適しているが, 飛散したデブリの付着, 化合物の形成を防止するものではない。

望月らは発光スペクトルのターゲット原子番号依存性を実験的に調べ²¹⁾, Xeガスを冷却して液体又は固体とした希ガスクライオジェニックターゲットが発光波長, 強度の点だけでなく, ターゲット物質として実用上適していることを提示した。ターゲットの連続供給移送手段と

Fig. 3 Schematic sectional diagram of apparatus for the production of X-rays.¹⁸⁾

して極低温の無端回転ベルトを用い、レーザー光の加熱により気化する化学的に安定な液体又は固体状の希ガスクライオジェニックターゲット物質をベルトの所定点に導く手段とを有することにより、ターゲット物質を所定点から集光点まで移送する方法を提示した²²⁾。さらに、Fig. 4に示すように回転ベルトを用いずにターゲット物質移送路としてパイプ体を移送管として用いることを実施例として上げ、そのパイプ体の先端部は、絞り込まれた部分とその最先端のフレア状部分とからなるノズル形状を持ち、押し出された液状ターゲット物質をレーザー照射する構成を示した。押し出されたターゲット物質が表面張力により液滴形状となれば液滴間が断熱されるため、次の同期レーザー照射を受けるべき液状ターゲットが照射される前に加熱・気化されるのを低減出来ることを指摘した。

岩松らは耐熱性ノズルからの液滴または粘性吐出体を連続的にターゲットとして供給するアイデアを提案した²³⁾。液滴としては水以外のアルコール等他の液滴であってもよく、更には、液滴中には粉体を混入させたものであってもよいとした。

1990年代になると、ターゲットを供給する手段として、ターゲットを気相または液相による流体状態で用意し、これを真空のチャンバー内に向けてノズルから噴出

Fig. 4 Partial view of a laser plasma X-ray device.²²⁾

させて、その噴出したジェット流にパルスレーザービームを集光照射させる方法が研究開始された。この方法では、ターゲット材を比較的容易に連続供給できるため、高繰返しパルスのレーザービームの照射による平均出力の大きい光源が実現できると期待された。

ここで噴出流として超音速ガスジェット流がまず研究された。ガス噴流の発生は技術的に容易であるが、この噴出流はガス流であるため、ノズルの上流におけるターゲット分子数密度は固体密度と比較して二桁以上低い。そのため、Fig. 5に示すように、パル的に高圧ガスをノズル上流に印加するガスバフ型超音速ガスジェット流をターゲットとする技術が精力的に研究された^{24,25)}。しかし、ガス流の広がり角度がほぼ30度と大きいため、ノズルの噴射口から離れたレーザービーム集光照射点ではターゲット密度が大幅に低下するだけでなく、集光点周辺の大きな体積に比較的低密度の中性ターゲット物質が広がり(数10 mm)、集光点で発生したEUV光がこの広がったターゲット物質により吸収されて減衰するため、その結果として、高輝度で高変換効率を確保することが困難であった。そこで、ターゲット流と同心環状の透明ガス(EUVに対して透明なヘリウムガスなど)流壁で閉じこめるダブルノズル法が考案され、レーザー集光点におけるターゲット物質の密度の向上と吸収の低減が試みられた²⁶⁾。一方、レーザー集光照射点をガス流出口のノズル先端数mmに近づけて、より高密度のプラズマを生成することが試みられた。しかし、この状態では、プラズマ粒子または散乱レーザー光がノズル先端の金属表面を損傷し、その結果、ノズル材料の微粒子の蒸散が起こることが明らかとなった²⁷⁾。

レーザープラズマ光源は、1990年頃までは近接露光X線リソグラフィーに応用することが目標とされていたが、光マスクなど光源以外での困難な問題のために進展せず、1990年代に入るとEUVL用光源の候補として実用化研究が米国を中心に密かに、しかし強力に進められるようになった。

さらに1996年頃より米国ではEUV LLCがEUVL実用化の開発を本格的に始めた。Xeは13 nm波長帯の定番発光体と報告されていたが、詳しい発光スペクトル形状は発表さ

Fig. 5 Schematic view of an electromagnetic valve to create gas puff.²⁵⁾

れていなかった。そこで、1996年後半より姫路工業大学では固体Xeクライオジェニックターゲットの発光スペクトルを透過型回折格子分光器により観測し、Fig. 6に示すような発光スペクトルの詳細形状を報告した²⁸⁾。ここで発光強度ピークの波長は10.8 nmであることが明らかになった。当時、我が国でEUVL用光源の実用化を目指してXeクライオジェニックターゲットを研究していたのは姫路工業大学のみであった。この頃、11 nmでの高反射率ミラーとしてはMo/Be多層膜ミラーが研究されていたが²⁹⁾、より簡便に安定に製作することができるMo/Si多層膜ミラーが本命と定められた。こうして、Xeの発光ピークである11 nmとMo/Si多層膜ミラーの中心波長13 nmとのミスマッチはその後の課題として今日に至っている。

米国では固体Xeクライオジェニックターゲットを低温基板に凝縮形成して研究に用いていたが100 μm 位の厚さのXe層はレーザーのワンショットで広い面積(直径約5 mm)が剥離するため使えないとの結論を下し³⁰⁾、Xe液滴(固体微粒子)ターゲットの発生装置の開発が試みられた³¹⁾。しかし、当時は液滴が安定に生成できず、レーザーのショットごとのデータが分散し、実用化は困難と思われた。そこで、ガスジェット流方式が真剣に検討された。前述の超音速ガスジェット流の問題を解決するため、ガス状ターゲットをノズル上流で冷却し、かつ分子数密度を高めて液化寸前の状態にしてノズルから噴出させ、分子クラスター流を生成して、Fig. 7に示すようにこれをターゲットとすることが考案され³²⁾、実験された³³⁾。すなわち、分子クラスターを噴出流とすることにより、ノズル出口からの噴出流の広がり角度をより小さくし、かつクラスター化により噴出流の密度を上げるものである。しかし、レーザービーム集光照射点をノズル先端から10 mm位置に設定した場合、この位置では噴出流が噴霧状態となっており、実際には集光点近傍におけるターゲットの平均分子数密度とその分布は超音速ガスジェットと比べて飛躍的な改善がされたとは言いがたい。また、ナノ秒のレーザー照射に対して分子クラス

Fig. 6 Observed spectra from cryogenic targets. (a) in an x-ray spectrum from a mixture target of Xe and CO_2 which was used to determine the spectral position of Xe line emission (b) is an x-ray spectrum from Xe target at a laser intensity of $1 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$. Spectral lines from oxygen ions are identified as shown in the figure.²⁸⁾

Fig. 7 The basic concept of molecular cluster target formation.³³⁾

ターは平均分子数密度でしか物理的意味はない。

一方、上述した超音速ガスジェット流に比べ、液滴ターゲットでは、レーザー集光照射点で材料として最少量の液体密度のターゲット材を保証している。Hertzらは固体ターゲットからのデブリ量を減らす為に液滴ターゲットの使用を主張し、圧電効果によって1 MHz程度に振動させた小さなノズルを通して加圧液体を圧送することによって形成される液体噴流から液滴を発生させる方法をエタノールを用いて研究した³⁴⁾。液滴発生技術はプリンター用インクジェットとして1980年代にはよく知られていたものである^{35,36)}。同様の技術を用いたレーザープラズマ光源の研究が行われた³⁷⁻³⁹⁾。しかし、当時の技術では、得られた液滴の直径は10 μm 程度に限られ、100 μm 程度の液滴の生成は不安定な液滴軌道を伴うため、当時としてはレーザーを正確にあてるのが困難であるとの結論を持った。

2.3 第3期；高出力発光用高速ターゲット供給法実用化研究の時代

Hertzらは、Fig. 8に示すように、(ノズルを通して液体ターゲットを圧力の作用で圧送することによって液体噴流を発生させ)、レーザービームをノズルと液滴形成点との間の噴流の空間的に連続した部分に集光させることを特徴とする方法と装置を提示した⁴⁰⁾。噴流の直径は10～数十 μm で速度が10～30 m/sの安定した微視的な液体噴流が実現されるが、液滴形成点までの距離は液体の流体力学的性質(レイノルズ数など)、ノズル径、流速によって決まる。低粘度の液体については乱流が発生すると安定した噴流が得られないが表面張力の低い液体については、液滴形成点の位置をノズルから十分離すことができる。プラズマ化されないターゲット物質は気化してポンプの負荷となるため、機械式チョッパーまたは電気偏向手段によって半連続的すなわちパルス状の液体噴流を発生させることが考えられるが液滴とは異なり、半連続的噴流の空間的に連続した部分は、長さが直径よりかなり大きくなる。

固体Xeクライオジェニックターゲットの発光スペクトル強度の結果²⁸⁾を踏まえ、望月らは、Fig. 9に示すような液体窒素温度に冷却されたドラム形回転体表面に300～500 μm 厚さのXeクライオジェニックターゲット層を成長

Fig. 8 Schematic view of an invention apparatus for generating X-ray or EUV radiation by generating a plasma in a thin jet of liquid before this is broken up into droplets.⁴⁰⁾

させ、回転と回転軸方向への並進運動によって連続して新鮮な固体キセノン表面をレーザー集光点に供給する高速ターゲット供給方式を開発した⁴¹⁾。レーザーパルスの集光点近傍は100 μm 厚さの固体Xeクライオジェニックターゲット層の場合と異なり、300 μm 以上の厚さでは、半径100~150 μm のクレターが局所的に生成されるのみであった。ドラムの周囲はX線が発生する点周囲を除いて固定壁で覆っており、その内部だけ高密度のXeガスで満たしてあるので、プラズマ生成によって生じるクレター穴はガス分子の付着によって回転中に埋められ、修復される。したがって、第1期で紹介した単純な金属のドラムターゲットとは異なり、希ガスターゲットはガスとして供給されながら、固体クライオジェニックターゲットへの連続照射が可能である。ここでは基板であるドラムは単なるターゲット物質(Xe)の移送体である。固体Xeクライオジェニックターゲットを用い、Nd:YAGスラブレザー光により320 Hzの繰返し速度でX線の発生が試みられた⁴²⁾。このとき100 Wのレーザー光入力に対し、EUV発光強度(@13.5 nm)は1 W/2 %BW/2 πsr 弱程度と見積もられた。

ターゲット供給の新方式はこの時期になると提案されつくした感じではあるが、EUVL用光源としては所謂中間集光点(光源の周囲の集光光学系のあとの集光点)にて2%バンド幅で115 W(発光点で230 W/2 πsr)という大出力が必要であることが定められた。このように膨大なEUV光出力を得るには発光スペクトルの中心波長が13.5 nm近傍にある錫(Sn)をターゲットとすべきという意見がある。ここで特筆すべきは松井らのグループのアイデアである。

Fig. 9 Schematic view of cryogenic rotating drum target.⁴¹⁾

彼らはデブリの発生を低減し、EUV変換効率を高める効果を期待して、ポリスチレンなどの有機物に金などの金属をコートした微粒子や酸化錫の微粒子とX線透過率の高いガスとで構成した微粒子混合ガスジェットターゲットにレーザーを照射してX線を得る方法を発明した⁴³⁾。実験的にはSn単体のスペクトルに比べ狭帯化を観測した⁴⁴⁾。彼らの提案した方法が、そのままXeクライオジェニックターゲットに応用できるものではないが、発光ターゲット材料の初期密度を制御する上でユニークである。但し、Snを酸化物として混合した場合の発光スペクトルについてはO'Sullivanらの報告が先行していた⁴⁵⁾。デブリ発生の低減と変換効率の高さを期待して、松井らのようにSn微粒子を不活性キャリアーガス流を利用して集光点に運ぶ方式が再び研究されている⁴⁶⁾。しかし、Fig. 10に示すように、まったく同一のレーザー照射条件(レーザー波長1064 nm, パルスエネルギー0.5 J, パルス幅25 ns, 集光スポットサイズ100 $\mu\text{m}\phi$)で得られた固体XeとSnターゲットの発光スペクトルを比較すると、13.5 nmでの強度比は少なくとも同じ観測方向ではXe:Sn = 1:1.6~2.0であり、今のところ決定的な差とは考えられない。透過型回折格子分光器では左右対称に+1次と-1次の回折光が現れる⁴⁷⁾。より正しくは各ターゲットに対する最適レーザー照射条件で比較すべきであるが、Snはプラズマ化しても凝縮しやすく、デブリによる損傷やSnの蒸着がXeに比べ、極めて重大な課題であろう。

一方、Xeクライオジェニックターゲットの連続高速供給は液体ジェット流が安定して実験に供されるようになって来た^{48,49)}。しかし、ジェット流の直径は40 μm 以下に限られており、今後、EUV変換効率(CE)を増大するためにより大きな直径を必要とする場合にはジェット流体安定性が問題になる可能性がある。また、発生ガス負荷の低減および排気・回収が課題として浮上してきている。即ち、Xeクライオジェニックターゲットでは、供給の方式によらず一般にプラズマ光により照射された周辺ターゲット物質が蒸散することと、発生したターゲットガスの吸収による実効的X線変換効率の低下の問題がクローズアップされてきた。そこで、前述した超音速ガスジェット流に比べ、液滴ターゲットはレーザー集光照射点で材料として最少量の液体密度のターゲット材を保証しているため上記の問題の低減には理想的といえる。しかし高繰返しレーザー照射に対応した液滴ターゲットの加速と軌道の安定性、並びに正確なタイミングとが必要である。

上述された高速ターゲット供給方式の最適化は今や、Xeターゲット形状・状態に焦点を当てた、EUV変換効率向上の道を探る研究とインタラクティブにやるべき状況になりつつある。これらは周辺の工学的要素技術の開発に並行して推進する必要がある。例えば、最適なイオン電荷状態を持つEUV発光プラズマを生成するために、レーザーパルス幅・エネルギーの最適化、またはパルス波形の最適化(パルスシェーピング)が有用であろう^{50,51)}。プレパルスの使用もパルスシェーピングの極限としてやはり有用であろう。これらのレーザーパルス最適

Fig. 10 X-ray spectra of Xe and Sn target observed by using a transmission grating spectrometer at a $1 \mu\text{m}$ laser intensity of $1 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$.

化による変換効率向上の方法論はどのターゲットについても共通して成り立つことであろう。但し、XeとSnとではその最適レーザー条件が異なることは言うまでもない⁵²⁾。

3. 高出力化への開発競争最前線

実用的EUVL用光源に要求されるEUV@13.5 nm光出力は、発光点で $230 \text{ W/2 \%BW/2 } \pi\text{sr}$ という途轍もないパワー領域である。極めてチャレンジングな目標である。まだまだ、頂上アタックの道が決まったとは言い難い。未知領域に踏み込んで道を探るにはまず少なくとも5 kW以上の高出力レーザーを用いた実験が必要であろう。Fig. 11は現在までの年次で、各国の企業研究グループが到達したEUV変換効率と発光出力の値を示す⁵³⁾。但し、JMAR社のデータはSnをターゲットとしている。レーザープラズマEUV光源における最大出力は、TRW社の2.5 kW (5 kHz) レーザーを用いた時の $22 \text{ W/2 } \pi\text{sr}$ である。しかしTRW社は、この競争のトップランナーの地位にいたにもかかわらず会社の買収に伴う方針転換により離脱したが、その足跡まではあとのグループにとって安心な道を提示したと考えてよいだろう。

レーザープラズマ方式の場合、レーザー入力も課題である。レーザー光→EUV変換効率を1~2%として13~25 kWの出力をもったレーザーが必要である。したがって、レーザーの発生効率を10%とすると150~300 kWの電気入力が必要となる。この電気入力の数字は半端な数字ではない。それでもレーザー技術者はレーザーパワーの最終ゴールの実現には楽観的である。そのもとはマルチビーム方式で解決できるからの期待であろう⁵⁴⁾。それに対し、最終レーザーパワーの実現化以前に、他の問題としてデブリによる集光ミラーの損傷などの解決見通しを得ることの方が技術的には心配され始めている。しかしながら、全コストに占めるレーザーコストの割合が大きいため、最後はコストの点で許されるレーザー構成が決定される可能性がある。そろそろ光源全体のコストを真剣に考えていく段階にきている。低コストで、要求されたエタングジュ以下の高輝度のEUV光源を実現するには、

Fig. 11 Current achievement of laser-produced plasma EUV source using Xe target. (a) EUV conversion efficiency, and (b) in-band EUV power of source. CEO: Cutting Edge Optronics, EUVA: Extreme Ultraviolet Lithography System Development Association, LASTI/HIT: Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry/Himeji Institute of Technology.

レーザービームの集光照射点内でEUV光変換効率ができる限り高いことが望ましい。一方、高いEUV光変換効率を得るためには生成されるプラズマが適度の密度、温度と体積を持つ必要がある。

EUV光源研究としては上記のような変換効率向上の道を探索する模索研究と、高繰り返し高出力レーザーを照射してとにかく発光平均出力向上の階段を登っていく工学的要素技術の開発研究とが並行して進められている^{55,56)}。前者は大学・研究所で進めることが可能であるが、後者はこれから10 kWクラスの大出力レーザー設備が前提となり、それなくして今や開発競争のメンバー会員にはなれないレベルになっている。前者の成果はシステムコスト低減のために最終的には最も重要であろう。一方、後者の努力により高出力EUV発光の環境を一步一步実現し、光源への第1ミラー等の損傷などの実用上重要な課題解決の実証を進める必要があらう。

参考文献

- 1) J. A. Trail, and R. L. Byer: *Proc. SPIE in Applications of Thin-Film Multilayered Structures to Figured X-Ray Optics*, Vol. 563, (1985) p. 90.
- 2) 望月孝晏: 応用物理⁵⁶ (1987) 565.
- 3) P. J. Mallozzi, H. M. Epstein, R. G. Jung, D. C. Applebaum, B. P. Fairand, and W. J. Gallagher: U. S. Patent 4058486 (Nov. 15, 1977).
- 4) P. J. Mallozzi, H. M. Epstein, R. G. Jung, D. C. Applebaum, B. P. Fairand, W. J. Gallagher, R. L. Uecker, and M. C. Muckerheide: *J. Appl. Phys.* **45** (1974) 1891.
- 5) D. J. Nagel, M. C. Peckerar, R. R. Whitlock, J. R. Greig, and R. E.

- Pechacek: Electron. Lett. **14** (1978) 781.
- 6) D. J. Nagel, J. M. McMahon, R. R. Whitlock, J. R. Greig, R. E. Pechacek, and M. C. Peckerar: Jpn. J. Appl. Phys. **17** (1978) 472.
 - 7) D. J. Nagel, and M. C. Peckerar: U. S. Patent 4184078 (Jan. 15, 1980).
 - 8) NRL Memorandum Report **5731**, ed. by P. R. Whitlock (Aug. 24, 1987).
 - 9) R. Kauffman: *X-ray Radiation from Laser Plasma*, ed. by M. N. Rosenbluth, and R. Z. Sagdeev, Handbook of Physics, Vol. 3, *Physics of Laser Plasma*, ed. by A. Rubenchik, and S. Witkowski, (Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, 1991) p. 111.
 - 10) J. C. E. Turch, and J. B. Dance: *X-Rays From Laser Plasmas* (John Wiley & Sons, Chichester, 1999).
 - 11) 西原 功修, 西村 博明: レーザー研究 **32** (2004).
 - 12) 岩松 誠一: 特開昭58-158842 (1982. 3. 16出願), S. Iwamatsu: U. S. Patent 4538291 (Aug. 27, 1985).
 - 13) J. M. Forsyth, and R. D. Frankel: U. S. Patent 4896341 (Jan. 23, 1990).
 - 14) J. M. Forsyth, and R. D. Frankel: U. S. Patent 4700371 (Oct. 13, 1987), R. D. Frankel, and J. Drumheller: U. S. Patent 4872189 (Oct. 3, 1989).
 - 15) R. D. Frankel, and J. Drumheller: U. S. Patent 4837793 (Jun. 6, 1989), H. Hirose: U. S. Patent 5151928 (Sep. 29, 1992).
 - 16) 岩松 誠一: 特開昭58-40757 (1981. 9. 3公開).
 - 17) M. Tanimoto: *Proc. of the 7th Symposium on Fusion Technology*, Grenoble (1972) p. 267.
 - 18) 野田 悦夫, 鈴木 節雄, 森宮 脩: 特開昭61-153935/153936 (1986. 7. 12公開), E. Noda, S. Suzuki, and O. Morimiya: U. S. Patent 4723262 (Feb. 2, 1988).
 - 19) 佐藤 信二, 小林 一郎, 岩本 雅: 特開昭63-304596 (1988. 12. 12公開).
 - 20) 伴保 隆, 杉島 賢次: 特開平1-109646 (1989. 4. 26公開).
 - 21) T. Mochizuki, T. Yabe, K. Okada, M. Hamada, N. Ikeda, S. Kiyokawa, and C. Yamanaka: Phys. Rev. A **33** (1986) 525.
 - 22) 望月 孝晏: 特開平1-6349 (1989. 1. 10公開).
 - 23) 岩松 誠一: 特開平2-267895 (1990. 11. 1公開).
 - 24) H. Fiedorowicz, A. Bartnik, R. Jarocki, M. Szczurek, and T. Wilhelm: Appl. Phys. B **67** (1998) 391.
 - 25) H. Fiedorowicz, A. Bartnik, M. Szczurek, H. Daido, N. Sakaya, V. Kmetik, Y. Kato, M. Suzuki, M. Matsumura, J. Tajima, T. Nakayama, and T. Wilhelm: Opt. Commun. **163** (1999) 103.
 - 26) H. Fiedorowicz, A. Bartnik, R. Jarocki, R. Rakowski, and M. Szczurek: Appl. Phys. B **70** (2000) 305.
 - 27) G. D. Kubiak, L. J. Bernardez, and K. Krenz: *Proc. SPIE on Emerging Lithographic Technologies II*, **3331** (1998) 81.
 - 28) A. Shimoura, S. Amano, S. Miyamoto, and T. Mochizuki: Appl. Phys. Lett. **72** (1998) 164.
 - 29) K. Skulina, C. Alford, R. Bionta, D. Makowiecki, E. M. Gullikson, R. Soufli, J. B. Kortright, and J. H. Underwood: *OSA Proc. on EUVL*, 1994, ed. F. Zernike, and D. T. Attwood, **23** (OSA, Washington, 1995) p. 52.
 - 30) G. D. Kubiak, K. W. Berger, S. J. Haney, P. D. Rockett, and J. A. Hunter: *OSA Proc. on Soft X-Ray Projection Lithography*, 18 (OSA, 1993) p. 127.
 - 31) G. D. Kubiak, K. D. Krenz, and K. W. Berger: *OSA Proc. on EUVL*, 1994, ed. by F. Zernike, and D. T. Attwood, **23** (OSA, Washington, 1995) p. 248.
 - 32) G. D. Kubiak, and M. C. Richardson: U. S. Patent 5577092 (Nov. 19, 1996).
 - 33) G. D. Kubiak, L. J. Bernardez, K. D. Krenz, D. J. O'Connell, R. Gutowski, and A. M. M. Todd: *OSA Trends in Optics and Photonics*, **4** (1996).
 - 34) L. Rymell, and H. Hertz: Opt. Commun. **103** (1993) 105.
 - 35) C. H. Hertz, S. Sholbanksvagen, and Sven-lage Shinenasen: U. S. Patent 3416153 (Dec. 10, 1968).
 - 36) J. Heinzl, and C. H. Hertz: Adv. Electron. Electron Phys. **65** (1985) 91.
 - 37) H. M. Hertz, L. Rymell, M. Berglund, and L. Malmqvist: Proc. SPIE in Applications of Laser Plasma Radiation II, **2523** (SPIE, Washington, 1995) 88.
 - 38) L. Rymell, M. Berglund, and H. M. Hertz: Appl. Phys. Lett. **66** (1995) 2625.
 - 39) M. Richardson, M. Kado, K. Gabel, and F. Jin: U. S. Patent 5459771 (Oct. 17, 1995).
 - 40) H. M. Hertz, L. Malmqvist, L. Rymell, and M. Berglund: 特願平 9-538003 (特表2000-509190), スウェーデン出願1996. 4. 25, H. M. Hertz, L. Malmqvist, L. Rymell, and M. Berglund: U. S. Patent 6002744 (Dec. 14, 1999).
 - 41) T. Mochizuki: U. S. Patent 6320937 (Nov. 20, 2001).
 - 42) T. Mochizuki: Proc. SPIE in High-Power Lasers in Energy Engineering, Vol. 3886 (SPIE, Washington, 2000) 316.
 - 43) 松井 哲也, 山田 喜美雄, 西 政嗣, 上野 学, 藤間 正博: 特開平10-221499 (1998. 8. 21公開) 粉川 信好, 松井 哲也, 西 正嗣: 特開平11-345698 (1999. 12. 14公開), T. Matsui, K. Yamada, M. Nishi, M. Ueno, and M. Tooma: U. S. Patent 5991360 (Nov. 23, 1999).
 - 44) T. Matsui, and N. Kogawa: Proc. SPIE in High-Power Lasers in Energy Engineering, **3886** (SPIE, Washington, 2000) 610.
 - 45) G. O'Sullivan, and R. Faulkner: Opt. Eng. **33** (1994) 3978.
 - 46) T. Tomie, T. Aota, J. Q. Lin, Y. Ueno, H. Yashiro, N. Kandaka, H. Moriwaki, G. Niimi, I. Matsushima, and K. Nishigori: Proc. SPIE, **5374** (2004) 383.
 - 47) K. Eidmann, M. Kühne, P. Müller, and G. D. Tsakiris: J. X-ray Sci. Tech. **2** (1990) 259.
 - 48) L. Espinoza (TRW/CEO): *EUVL source workshop* (International SEMATECH, Matsue, 2001).
 - 49) B. A. M. Hansson, L. Rymell, M. Berglund, O. Hemberg, E. Janin, J. Thoresen, S. Mosesson, J. Wallin, and H. M. Hertz: Proc. SPIE, **4668** (2002) 102.
 - 50) R. Kodama, T. Mochizuki, K. A. Tanaka, and C. Yamanaka: Appl. Phys. Lett. **50** (1987) 720.
 - 51) T. Mochizuki, A. Shimoura, K. Fukugaki, T. Inoue, S. Miyamoto, and S. Amano: *2nd International EUVL Symposium*, 7F, (International SEMATECH, Antwerp, 2003).
 - 52) 西村 博明他: プラズマ核融合研究 **80** (2004) 325.
 - 53) Papers after EUVL Symposiums and Workshops (2002~2004).
 - 54) I. P. Mercer, A. Comley, S. Davis-Ansted, M. Egan, S. Ellwi, P. Harrison, I. Henderson, M. Kelly, M. Mason, M. Middleton, I. Morris, D. Parsons-Karavassilis, T. Nowell, P. Raven, A. Russel, D. Klug, and A. Taylor: *Proc. SPIE in High-Power Laser Ablation 2002*, Vol. 4760 (2002) 4760.
 - 55) 文部科学省リーディング・プロジェクト: 「極端紫外(EUV)光源開発等の先進半導体製造技術の実用化」(2003~2008), 平成15年度研究成果報告書.
 - 56) 経済産業省: 「極端紫外線(EUV)露光技術」, 平成15年度研究成果報告書.

レーザーワード

クライオジェニックターゲット(cryogenic target)

気体を低温冷却して液化又は固化させたターゲット。キセノンクライオジェニックターゲットがレーザープラズマ極端紫外(LPP-EUV)光源用ターゲットとして注目されたのは、EUVリソグラフィに必要の13.5 nm光を効率よく発生し、X線光学素子等に付着せず、ダメージの原因となるデブリが軽減できるためである。またプラズマ化によって気化したターゲット材料は気体として回収され、再使用できるので連続高速供給が可能であり、高出力実用ターゲットとして適しているためでもある。キセ

ノンクライオジェニックターゲットの供給には固体状態と液体状態がある。前者は冷凍回転ドラム上に固化させて供給する技術が開発されており、後者は液化キセノン微小開口から真空中に噴出させて形成する数十m/sの高速ジェット流やドロップレット流として供給する。しかしながら後者は結局、表面からのターゲット蒸発により冷却され、レーザー集光点では固体クライオジェニックターゲットとなる。

(井上 隆博)