スズ貫通孔ターゲットを用いたレーザ生成プラズマ EUV (Extreme Ultraviolet) 光源*

—円錐および円筒型貫通孔内アブレーション過程と EUV 放射—

中野元博** 三田泰之*** 井上晴行** 押鐘 寧** 片岡俊彦**

EUV (Extreme Ultraviolet) Light Source by Laser Produced Plasma Using Tin Through-hole Targets
—EUV Emission and Ablation Process in Conical and Cylindrical Through-holes—

Motohiro NAKANO, Yasuyuki SANDA, Haruyuki INOUE, Yasushi OSHIKANE and Toshihiko KATAOKA

In a future system of EUV (extreme ultraviolet) lithography, a high power light source with 13.5nm wavelength is demanded for long operation life time under high repetition rate. Tin target has significant potential for high conversion efficiency. This paper presents a new method to develop a debris-free EUV light source by using tin targets with conical and cylindrical through-holes, which have advantages for increasing EUV emission and reducing debris in the direction of the through-hole exit. The strong EUV intensity from plasma produced by Q-switched Nd:YAG SHG (second harmonic generation) laser is measured with a detector, that consists of Mo/Si deposited photodiode, Zr filter and Au mirror. For commercial EUV light source, repetitive use of the target is required. The emission stability for repeated operation is evaluated using these through-hole targets. Also, the visible light emission from the confined plasma in the through-hole is observed using a high-speed camera, and then the laser ablation process is considered. Finally the feasibility of the tin target with cylindrical through-hole is discussed for development of commercial EUV lithography system.

Key words: EUV lithography, extreme ultraviolet source, laser produced plasma, tin, Nd:YAG laser, through-hole target

1. 緒 言

国際半導体技術ロードマップ¹⁾で DRAM の最小ハーフピッチ 32nm 以細 (22nm 等) の世代は、中心波長 13.5nm の極端紫外 (EUV: Extreme ultraviolet) 光を用いたリソグラフィ装置の利用が最も有望な技術として挙げられている²⁾³⁾。商用の EUV 光源には中間集光点で光パワー115W 以上の高輝度と 7~10kHz の高い繰り返しレートで 1 年間運転可能という長寿命が要求されている⁴⁾⁵⁾。商用の EUV 光源は、高温プラズマから放射される光を用いる装置となり、プラズマの生成・励起のために放電を用いる DPP (Discharge Produced Plasma) 方式とパルスレーザを用いる LPP (Laser Produced Plasma) 方式、さらには両方式の複合型の光源が提案され、研究されている^{2)~10)}。LPP 方式の EUV 光源開発は、当初、Xe ジェットにパルスレーザを照射してプラズマを生成し、利用する方法が主に研究されてきたが、中心波長 13.5nm、2% バンド幅の EUV 光パワーの不足が深刻な問題となり、量産時に要求されている中間集光点で 115W 以上のパワーを Xe ターゲットで実現することは困難な状況である^{11) 12)}。一方、Xe に比べてスズ(Sn)の発光スペクトルは、13.5nm に強いピークを示すことから、Sn ターゲットを用いて高強度の EUV 光源を実現するための実用化研究が進んでいる¹³⁾。しかし、固体の Sn 平板をターゲットに用いた場合、EUV 発光後に発生するデブリがリソグラフィ光学系を汚染する可能性が問題となり、質量を最小限にしたドロップレット^{14)~17)}や低密度の酸化スズ薄膜¹⁸⁾、あるいは、Li ターゲット¹⁹⁾の使用など、デブリを低減して高出力の EUV を生成するために多くの提案がなされている。

富江¹⁰⁾は、スズ固体ターゲットに凹面構造をもつ窪みを設けて窪みの内壁をプリパルスレーザによりアブレーションし、窪み内に気化したスズが凹面の中心で高密度化されるのを待って加熱用メインパルスレーザを照射することで高温プラズマから EUV の輻射を得る方式の米国特許²⁰⁾を 2000 年に取得したが実用化には至っていない。一方、中野は、円錐型の貫通孔を用いることでデブリフリーのレーザ生成 EUV 光源を実現する方式を提案し、円錐の中心軸に高温プラズマを生成させ、その底に加工した貫通孔から、レーザアブレーションでデブリが飛散する側とは反対の孔出口方向へ放射された EUV をリソグラフィ装置で利用する方法を研究した²¹⁾。その円錐型の貫通孔ターゲットを用いた繰り返し照射実験において、円錐の底に設けた貫通孔の直径が広がると EUV 出力が増大するという実験結果を得たことから、ストレートな円筒型の貫通孔ターゲットを用いたレーザ生成 EUV 光源の研究を開始した²²⁾。円筒型の貫通孔内壁へレーザを集光照射し、貫通孔内に閉じ込めたスズプラズマからの EUV 放射を計測した結果、円錐型の貫通孔に比べて高輝度な EUV の発生を確認できたので、ここに円錐型と円筒型の 2 つの貫通孔ターゲットからの EUV 放射特性とその実用化の可能性について検討した結果を報告する。

2. 貫通孔プラズマからの EUV 放射

2.1 円錐型貫通孔内における高温・高密度プラズマの生成

本研究では、13.5nm に強い発光スペクトルのピークを示すことが報告されているスズをターゲット材料とした。図 1 に円錐型の貫通孔ターゲットを用いたレーザ生成プラズマ光源の概略を示す。図 1(a)の第 1 段階で、固体円板ターゲットの円錐孔を、パルスレーザの集光照射位置に高速回転で移動する。図 1(b)の第 2 段階では、短い時間で立ち上がるレーザをレンズで集光さ

* 原稿受付 平成 20 年 9 月 22 日

** 正 会 員 大阪大学大学院工学研究科 (大阪府吹田市山田丘 2-1)

*** 学生会員 大阪大学大学院工学研究科

Fig.1 LPP (Laser Produced Plasma) light source using tin conical through-hole target: (a) rotation of conical through-hole to focal point, (b) laser ablation, (c) produced plasma, (d) EUV emission from hot plasma, (e) rotation to cold debris trap.

Fig.2 Tin conical through-hole target made by using Sn laser deposition to 45° cone with through-hole of 90μm diameter in an aluminum alloy plate: (a) aluminum alloy plate with 36 through-holes, (b) laser deposition of thin Sn foil transferred to the surface of the conical hole.

Fig.3 Digital microscope images of tin conical through-hole: (a) before Sn laser deposition to 45° cone with through-hole of 90μm diameter in an aluminum alloy plate, (b) after laser deposition of thin Sn foil transferred to the surface of the conical through-hole.

せ、ビームが拡大する位置でターゲットへ照射し、パルスの立ち上がり初期に円錐孔表面層のスズ分子をアブレーションさせて、中心軸に向かう円錐状プラズマのブルームを形成する。図1(c)のレーザ照射ピーク時直前の第3段階、円錐の中心軸付近において衝突したプラズマが高密度のジェットを生成し、円錐型貫通孔の中心軸前方へ長く伸びる。図1(d)の第4段階では、照射ピーク時直後のパルスレーザによって中心軸付近の高密度ジェットが高温のプラズマに励起され、より短い波長のEUVを含む光を放射する。この長く伸びた高温・高密度プラズマからのEUVが中心軸方向に積算されて高輝度となり、貫通孔出口を通してEUVを取り出し、さらに低温トラップ内への高速回転移動による遮蔽効果でデブリフリーEUV光源の実現が期待できる。すなわち、図1(e)のパルス照射が終わった第5段階で、レーザによる励起状態から基底状態へ遷移するプラズマが、真空中で断熱膨張することにより冷却され、デブリが生成される。デブリは、主に円錐孔入口のレーザ照射側へ飛翔することから、固体円板ターゲットを高速回転してトラップ内へ移動すると、デブリを遮蔽できる。このターゲットの高速回転により、次の円錐型貫通孔がレーザ集光位置に移動し、第1段階へ戻る。このような手法により、高い繰り返しレート下で高輝度のEUVをパルス発生させ、同時にターゲットを冷却し、さらに、スズを用いたEUV光源で特に問題となるデブリの飛散を高速回転と低温トラップの併用により制御すれば、リンググラフィ用光学系への汚染を防止できる。

2.2 円錐型貫通孔ターゲットの作成

ターゲット基板は、図2(a)上側の写真に示す厚み1.2mmのAl合金円板に、図2(a)下側の1/2分割した断面を含む見取り図で示すとおり、頂角45°で裏面に直径90μmの貫通孔を全周周上

に36個加工して製作した。次に、図2(b)に示すとおり、Al合金板の円錐孔入口側表面を蓋するように厚さ50μmのSn膜をスライドガラスにより保持してパルスレーザを照射し、円錐孔壁面にSn膜をデポジションさせた。

図3のレーザデポジション前後のデジタル顕微鏡(キーエンス製)による3次元観察結果からAl板厚の約半分(直径約0.5mm)の円錐内壁面にSn膜がほぼ一様に付着できていることが分かる。このスズターゲット構造によるレーザ生成プラズマからのEUV放射特性データを、以後に述べるターゲットを回転させない基礎実験で評価した。

2.3 レーザ生成プラズマから放射される光の計測方法

図4にレーザ生成プラズマ実験装置の概略を示す。スズ円錐型貫通孔ターゲットは、真空チャンバーの中心にレーザ光軸に対し3°傾けて設置した。プラズマ励起用レーザには、Nd:YAGの2倍高調波(Continuum製 Surelite III: パルス時間半値幅4nsのガウシアン波形、波長532nm、エネルギー180mJ/pulse)を用いた。出射したレーザはビームエキスパンダで直径22mmに広げられ、45°入射で波長532nmを選択的に反射する多層膜ミラーによりチャンバー内の固定焦点レンズ(f50mm)へ導かれてターゲット直前で80μmのスポット径に集光される。そして、図1(b)に示すように、集光後に拡大するレーザ光を直径200μmの円錐孔壁面に照射した。この円錐型貫通孔壁面への集光照射により図1(d)のように孔出口から放射されるEUV強度は、真空チャンバー中のレーザ入射方向と反対の孔出口側(図4中の角度 $\theta=180^\circ$)に設置したEUV検出器で評価した。また、実験において照射されたレーザのパルス波形と強度は、真空チャンバーの光学窓での反射光をGHz帯域の応答を有するPINフォトダイオード(浜松ホトニクス製S5973-02)で電圧信号に変換して、高速デジタルオシ

Fig.4 Setup for measuring laser-produced Sn plasma in through-hole.

Fig.5 Setup of EUV detector for 12.2~15.8 nm wavelength.

Fig.6 Reflectivity of Au mirror (55% for EUV at incident angle of 75degree).

Fig.7 Time record of EUV photodiode output for repeated 180mJ/pulse laser shots using conical through-hole target

Fig.8 Repetition property of EUV emission for conical through-hole target for laser energy 180mJ/pulse

Fig.9 Optical microscope images of conical through-hole exit: (a) before shot, (b) after shots.

ロスコープ(テクトロニクス製 TDS2024)により記録した。

一方、円錐孔内壁面からアブレーションしたプラズマを観測するため、図4の真空チャンバ前方に設置された波長 532nm 選択反射ミラーを透過する可視域の発光が、レーザ入射側から高速カメラ(Ultra-NAC FS501/NMS)によりストリーク撮影された。

図5に EUV 検出器の構造を示す。パルスレーザで励起された高温・高密度プラズマからは、X 線から可視光まで広範囲な波長の光が放射される。波長 13.5nm 近傍を計測するために用いた EUV 検出器は、図中に示すように、①Si ウェハの平滑な表面に Au をスパッタ蒸着して形成した平面ミラー、②Zr フィルタ (Lebow 製)、③EUV 検出用 Si フォトダイオード (IRD: International Radiation Detectors 製) から構成される。

図6に上記①の Au ミラーへの入射角度に対する S 偏光の反射率(R_s)と P 偏光の反射率(R_p)を、波長 13.5nm に対する屈折率

$n=0.889$ と吸収係数 $k=0.0554$ 、および、波長 1.95nm の軟 X 線に対する $n=0.99665$ と $k=0.00268$ の光学定数から算出した結果を示す²³⁾²⁴⁾。レーザプラズマからの放射光に対し、75° 入射の R_s と R_p の平均値から 55% の EUV が可視光とともに図5の①Au ミラーで反射される。一方、X 線は、図6で R_s と R_p が重なって表示されているように、75° 入射では反射されずに透過・吸収される。次に膜厚 150 nm の②Zr フィルタは、波長 13.5nm の EUV に対して 60% の透過率があり、可視光をカットするために使用している²⁵⁾。EUV 検出用の③Mo/Si (350/500nm) 膜付 Si フォトダイオード (IRD: SXUV HS5 -Mo/Si) は、波長 12.2~15.8 nm に対して感度を持つ²⁶⁾。EUV が検出用 Si フォトダイオードに入射すると光電子が生じ、素子に 50V の逆電圧を印加して引き出した光電流を 50Ω の抵抗で電圧信号に変換し、その出力をデジタルオシロスコープ(テクトロニクス製 TDS2024)で記録した。

2.4 円錐孔内レーザ生成プラズマからの EUV 計測結果

図 7 に静止した円錐型貫通孔ターゲットに 180mJ/pulse でレーザを 16 回繰り返し照射し、貫通孔の軸出口方向 (ターゲット後方: $\theta=180^\circ$) に放射された EUV による Mo/Si 膜付 Si フォトダイオード出力の記録波形を示す。図中の数字は照射回数であり、7 回目以後の照射に対する出力波形の変化は小さい。パルスの持続時間が励起レーザに比べて長いのは、光電子検出回路の時間遅れのためで、16 回の繰り返し照射に対して振幅は 6 回目まで増大しているが、類似した波形の時間応答を示すことが分かる。本実験で $\theta=180^\circ$ 方向へ貫通孔内プラズマから放射される単位立体角当たりの EUV 光子数は、Mo/Si 膜付 Si フォトダイオード内で発生する光電子数に比例するので、図 7 の出力波形の時間積分で評価できる。

図 8 は発生した EUV 強度に比例するフォトダイオード出力の時間積分をレーザ照射の繰り返し回数に対して整理した結果である。初期は照射回数が増す毎に EUV 強度が増加し、7 回目以降はほぼ一定となった。繰り返し照射実験後、ターゲット裏面から光学顕微鏡により貫通孔を確認したところ、円錐底部の貫通孔径が図 9(a) 実験前の 90 μm から図 9(b) に示したように 16 回照射後ほぼ 2 倍の直径に広がり、円錐孔へのレーザ照射直径に近くなっていた。

このように、円錐孔への繰り返し照射実験において、底部に設けた貫通孔の直径がレーザ照射径程度にまで広がると高い EUV 出力が安定して得られるという実験結果を得たことから、次に、最初からストレートな貫通孔ターゲットを用いて、円錐孔と同様、円筒型の貫通孔内へレーザを集光照射し、孔内に閉じ込められたプラズマからの EUV 放射を計測した。

2.5 円筒型貫通孔内におけるプラズマの生成方法

円筒型貫通孔ターゲットは、厚み 0.8mm のスズ板に市販の細径ドリル (直径 0.2mm) を用いてストレートな貫通孔を加工後、洗浄してレーザプラズマ生成実験に供した。円筒型貫通孔ターゲットを図 4 に示すように真空チャンパー中心に設置し、パルスレーザを短焦点レンズ (f35mm) で貫通孔入口面内において 80 μm のスポット径に集光させた。そして、集光後に拡大するレーザ光を直径 200 μm の円筒型貫通孔内壁に照射した。この孔内へのレーザ照射により生成する円筒状プラズマから放射される EUV 光を、貫通孔出口側 (角度 $\theta=180^\circ$) に設置した図 5 の検出器内の Mo/Si 膜付 Si フォトダイオードにより計測した。さらに、その可視発光の様子を高速度カメラにより観察・記録した。なお、円錐型貫通孔に対する実験で用いた固定焦点 (f50mm) より短焦点のレンズで円筒型貫通孔入口面内に集光させた理由は、円筒孔内壁面への入射角度をより大きくして、単位照射面積あたりのレーザ光強度を増大させるためである。これにより、パルスの立ち上がり初期からアブレーションを誘起させ、内壁に対してほぼ垂直に噴出する円筒状のプラズマをより長い時間、レーザで励起して、より大きな出力の EUV 発生が期待できる。

2.6 円筒状レーザ生成プラズマからの EUV 計測結果

図 10 に直径 0.2mm、長さ 0.8mm の円筒型貫通孔内壁へ 1 パルスのエネルギーが 180mJ のレーザを 15 回繰り返し照射した時に、貫通孔出口の軸方向 ($\theta=180^\circ$) へ放射された EUV を Mo/Si 膜付 Si フォトダイオードで計測した波形を示す。図中の数字は照射回数であり、2 回目以後の照射に対する出力波形は、ほぼ重なっている。繰り返し照射実験後、ターゲット表面から光学顕微鏡により貫通孔を確認したところ、レーザ照射側の円筒型貫通孔径は、実験前の直径 200 μm から図 10 中の写真に示したよう

Fig.10 Time record of EUV photodiode output for repeated 180mJ/pulse laser shots using cylindrical through-hole target and optical microscope image of cylindrical through-hole after shots

Fig.11 Repetition property of EUV emission for cylindrical through-hole target for laser energy 180mJ/pulse

Fig.12 Streak image of visible emission from laser-produced plasma in conical through-hole by high speed camera: (a) 1st shot, (b) 5th shot.

Fig.13 Streak image of visible emission from laser-produced plasma in cylindrical through-hole by high speed camera: (a) 1st shot, (b) 5th shot.

にほとんど拡がっていない。

図 11 は、図 10 の EUV 強度に比例するフォトダイオード出力の時間積分を照射回数に対してプロットした結果である。図 8 の円錐型貫通孔で 7 回目以降に計測されたほぼ一定の EUV 強度に対して、照射 1 回目に約 9 倍の高輝度な EUV 出力が得られ、2 回目以後の照射では約 6 倍の高出力を安定して示した。

3. 貫通孔を用いた EUV 光源の検討

3.1 円錐と円筒型貫通孔内プラズマの可視発光観察

図 12 と図 13 は、円錐型と円筒型の貫通孔ターゲットを用いたレーザ生成プラズマ実験で観察された可視発光のストリーク撮影結果である。図 4 の真空チャンパー前方に設置された波長 532nm(緑色)近傍のみ選択的に反射する多層膜ミラーを透過した可視光は、長焦点の望遠レンズ($f300\text{mm}$)を用いて高速度カメラ(Ultra-NAC FS501/NMS)のスリット面に集光される。図 12 の円錐型貫通孔ターゲットの実験では 6.0 倍、図 13 の円筒型貫通孔に対しては 8.57 倍で結像しており、ストリーク撮影モードで緑色を除く可視発光の時間走引像を記録した。

図 12(a)は、円錐型の貫通孔ターゲットを用いた 1 回目のレーザ照射で生成したプラズマからの可視発光のストリーク撮影結果である。図 12(a)の最初に現れた細い発光は、図 1(c)と(d)で示したレーザ照射直後の円錐中心軸に収束したプラズマからの発光が観察されたと考えられる。続いてレーザ照射強度がピークに達した時間から、円錐孔壁面にデポジションした膜表面のスズが、アブレーションして、約 0.5mm の高温領域で可視発光が計測された。この可視発光は、プラズマが真空中に断熱膨張して冷えるまで、約 40ns の間、記録された。

一方、図 12(b)は、円錐型貫通孔への 4 回の繰り返し照射で孔径が大きくなったターゲットに対して、プラズマの可視発光をストリーク撮影した結果である。円錐底部の貫通孔が約 2 倍とレーザ照射径程度に拡がった結果、底部の貫通孔内壁から孔の中心軸に向かってアブレーションしたプラズマがレーザ照射後 4ns で孔中心に到達し、その後プラズマが冷えるまで可視発光が記録されたと考えられる。

図 13(a)は、ストレートな円筒型の貫通孔ターゲットを用いた 1 回目のレーザ照射で生成したスズプラズマからの可視発光を孔入口前方からストリーク撮影した結果である。図 12(b)で示した円錐底部の貫通孔が拡大した 5 回目の観測結果と図 13(a)の初期のプラズマ発光が類似していることから、円筒型の貫通孔内壁面からアブレーションしたスズ分子は、励起レーザのパルス半値幅 4ns の飛行時間で、孔中心にまで到達せず、中空の円筒状プラズマを形成して EUV を含む広い波長域で発光していると考えられる。パルスレーザによる励起が終了した後のスズ分子は、中心軸で衝突することにより、再度、温度が上昇し、約 30ns の間、可視発光が記録された。

図 13(b)は、円筒型貫通孔への 4 回の繰り返し照射によるアブレーションで孔内部の表面形状がわずかに変化したターゲットに対して、プラズマの可視発光をストリーク撮影した結果である。図 13(a)に比べて、レーザ照射直後の貫通孔内壁面近傍での可視発光は見られるが、その後の中心軸近傍での発光が暗く、1 回目と比較して 5 回目の照射で生成したスズプラズマの温度がレーザ照射後に上昇していないことが分かる。これは、貫通孔形状が初期の円筒型から繰り返しレーザ照射により歪み、内壁表面にほぼ垂直にアブレーションするスズ分子が、中心軸付近で衝突する確率が減少して、1 回目の照射時のような温度上昇を

引き起こさないことが原因と考えられる。

3.2 円錐と円筒型貫通孔内プラズマに関する考察

図 12(a)から、円錐型貫通孔への 1 回目の照射に対しては底部の貫通孔径が $90\mu\text{m}$ と小さく、円錐孔内壁からアブレーションしたスズ分子が中心軸で早期に衝突して前方に吹き出し、中心軸付近で密度が高くなったと考えられる。その結果、後方の円錐底部プラズマは、レーザが前方で吸収されて到達しないために高温に励起されず、さらに、前方で放射された EUV が円錐底部の冷たいプラズマで吸収され、図 8 の 1 回目の結果のように EUV 強度が低く計測されたと考えられる。

次に、円錐型貫通孔への繰り返し照射で底部の貫通孔径が大きくなると、励起レーザのガウシアン分布外側の強度の低い領域に位置する円錐孔壁面にデポジションさせた Sn 膜の表面分子と拡がった貫通孔内壁の Al 基板表面分子のアブレーションにより噴出する速度が共に低下するので、レーザ照射ピーク時に中心軸付近に集まるプラズマが低密度となり、前方でのレーザ吸収が減少する。従って、後方までレーザが透過して孔出口に近いプラズマが高温に励起され、計測される EUV 強度が図 8 の 6 回目まで増大したと考えられる。そして、図 12(b)に示すように底部の貫通孔内壁からアブレーションした分子がレーザパルスの半値幅に相当する 4ns で孔中心軸に到達していることから、励起レーザのピーク強度時には筒状のプラズマが生成し、中央が未だ真空であるために放射された EUV が吸収を受けず、中心軸方向に積算されて、貫通孔出口後方で計測される EUV 強度が増大したものと考えられる。

一方、ストレートな円筒型の貫通孔ターゲットに対して記録された図 13(a)のストリーク像が図 12(b)の結果とよく似た発光を示したことから、励起レーザのピーク強度時に中央が未だ真空の円筒状プラズマが円筒型貫通孔内に生成し、さらに、貫通孔が軸方向に 0.8mm と長いためにプラズマから放射された EUV の積算効果が増して、図 11 の高輝度な EUV 出力データが得られたと考えられる。ただし、円筒型貫通孔は、レーザ照射によるアブレーションで孔内壁がわずかに歪んだ形状に変化するため、図 11 に示すように繰り返し照射の 2 回目で出力が低下したと考えられる。そして、2 回目以後の EUV 強度がほぼ一定となった実験結果は、アブレーションしたスズ分子の多くが対向する孔壁面に再付着して、その後の繰り返しレーザ照射による貫通孔形状の変化が少なくなり、出力が安定したと考えれば説明できる。

本研究で提案した円錐と円筒型の貫通孔ターゲットの利点は、孔形状によりプラズマの発生を空間的に制御でき、さらにデブリの飛散し難い孔出口後方へ放射される EUV を利用することで、高輝度でクリーンな EUV 光源を実現できることにある。パルスレーザの集光照射により円錐状プラズマを生成した結果、円錐孔ターゲットの貫通孔出口後方へ放射される EUV 強度は、レーザの繰り返し照射とともに 6 回目まで増大する効果が認められた。EUV 強度が増大したターゲットの円錐が加工されて円筒型に変化していたことから、最初からストレートな円筒型の貫通孔を持つターゲットを用いて円筒状プラズマを生成させ、放射される極端紫外光の特性を評価する実験を試みた。その結果、高い EUV 出力が得られ、さらに繰り返しレーザを照射しても強度が低下しないことが確認でき、円筒型貫通孔ターゲットの有用性が示された。

以上に記したように、デブリフリーのレーザプラズマ EUV 光源の開発を目的として、円筒型貫通孔ターゲットへのパルス

レーザ集光照射で生成するプラズマからのEUVをデブリに汚染されない孔出口後方から取り出し、リソグラフィ光源として利用する新方式を提案した。そして、図1で示したのと同様に、円板の円周上に多数の貫通孔を加工したターゲットを回転させ、貫通孔の焦点位置通過に同期させてパルスレーザを集光照射すれば、高い繰り返しレートでの使用が可能となり、さらに図1(e)に示した低温トラップ内へ高速回転移動することでEUVリソグラフィ光学系へデブリを進入させないクリーンなEUV光源が実現できると考えられる。

4. 結 言

本研究では、新しい方式のEUV光源として、スズ貫通孔ターゲットへのパルスレーザ集光照射で生成するプラズマからのEUVをデブリに汚染されない貫通孔出口後方から取り出し、リソグラフィ光源として利用する手法を提案した。円錐型と円筒型の2種類の貫通孔に対して、レーザ生成プラズマから放射されるEUV強度を計測・比較して、ストレートな円筒型の貫通孔形状が高輝度な光源の実現に適していることを明らかにした。2種類の貫通孔内で生成するレーザプラズマを孔入口前方から可視域の高速度カメラでストリーク撮影し、その時間・空間分解した発光計測結果より、孔内壁からのスズ分子のアブレーション過程を考察した。その結果、スズ膜をデポジションした円錐型の貫通孔では高輝度のEUV出力を安定して得る条件を整えられないが、スズ板にストレートな円筒型貫通孔を加工したターゲットでは、高いEUV出力が得られることを明らかにした。

今後、最適なスズ貫通孔ターゲットの構造とパルスレーザの集光照射条件について検討し、EUVリソグラフィ用の商用光源として実用化するための指標を得て行きたい。

謝 辞

本研究は、21世紀COEプログラム「原子論的生産技術の創出拠点」、日本学術振興会 科学研究費補助金 基盤研究(B) (課題番号 17360161)、および、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターとの共同研究による補助のもとで行われた。本実験の実施には大学院生であった吉川隆弥氏と大谷祐子氏の協力を、ターゲット作成には神戸製鋼所の協力を得た。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) ITRS: International Technology Roadmap for Semiconductors 2007 Edition Lithography, http://www.itrs.net/Links/2007ITRS/2007_Chapters/2007_Lithography.pdf, (2007) 26.
- 2) S. Wurm: Extreme Ultraviolet Lithography Development in the United States, *Jpn. J. Appl. Phys.* **46**, 9B, (2007) 6105

- 3) M. Imai: Lithography Technology since 45 nm Generation, *J. Jpn. Soc. Precis. Eng.*, **74**, 5, (2008) 441 (in Japanese).
- 4) M. Richardson et al.: Diagnostics for laser plasma EUV sources, *Proc. SPIE*, **5580** (2005) 434.
- 5) K. Kemp and S. Wurm: EUV lithography, *Comptes Rendus Physique*, **7** (2006) 875.
- 6) I. Song et al.: Performance of gas jet type Z-pinch plasma light source for EUV lithography, *Microelectronic Engineering*, **83**, 1, (2006) 710.
- 7) I.V. Fomenkov et al.: EUV discharge light source based on a dense plasma focus operated with positive and negative polarity, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37** (2004) 3266.
- 8) S. Katsuki et al.: Z-Pinch Discharge Plasma Based EUV Sources, *J. Plasma Fusion Res.*, **81**, 4, (2005) 231 (in Japanese).
- 9) E. Hotta: Discharge Produced Plasma Light Sources -Present Status of Discharge Produced Plasma Light Sources Development-, *J. Plasma Fusion Res.*, **79**, 3, (2003) 245 (in Japanese).
- 10) T. Tomie: Laser Produced Plasma Light Sources - Present Status of Laser Produced Plasma EUV Sources Development -, *J. Plasma Fusion Res.*, **79**, 3, (2003) 234 (in Japanese).
- 11) M. Segers et al.: Development of a laser-produced plasma source at 13.5 nm for the French extreme ultraviolet lithography test bench, *Microelectronic Engineering*, **61-62** (2002) 139.
- 12) H. Komori et al.: Laser-Produced Plasma Light Source Development for Extreme Ultraviolet Lithography, *Jpn. J. Applied Physics*, **43** (2004) 3707.
- 13) Y. Ueno et al.: Enhancement of extreme ultraviolet emission from a CO₂ laser-produced Sn plasma using a cavity target, *Appl. Phys. Lett.*, **91** (2007) 231501.
- 14) C. Keyser et al.: Dynamics of Mass-Limited Laser Plasma Targets as Sources for Extreme Ultraviolet Lithography, *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, 6B, (2002) 4070.
- 15) S. Fujioka et al.: Properties of ion debris emitted from laser-produced mass-limited tin plasmas for extreme ultraviolet light source applications, *Applied Physics Letters*, **87** (2005) 241503.
- 16) C. Pan et al.: SnO₂ target with controllable microstructure and thickness for generating extreme ultraviolet light, *J. Appl. Phys.*, **100**, 1, (2006) 016104.
- 17) M. Richardson et al.: Mass-limited debris-free laser-plasma EUV source, *Optics Communications*, **145**, 1 (1998) 109.
- 18) K. Nagai et al.: Angular distribution control of extreme ultraviolet radiation from laser-produced plasma by manipulating the nanostructure of low-density SnO₂ targets, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 9, (2006) 094102.
- 19) T. Higashiguchi et al.: Enhancement of extreme ultraviolet emission from a lithium plasma by use of dual laser pulses, *Appl. Phys. Lett.*, **88**(2006) 161502.
- 20) T. Tomie: Laser plasma light source and method of generating radiation using the same, U.S. Pat., 6275565, (2000).
- 21) M. Nakano et al.: Development of High Performance EUV Light Source by Laser Produced Plasma - Evaluation of EUV Emission Property for Repeated Operation -, JSPE Spring Meeting, (2007) 773 (in Japanese).
- 22) M. Nakano et al.: Development of High Performance EUV Light Source by Laser Produced Plasma - Evaluation of ablation process in Sn through hole -, JSPE Spring Meeting, (2008) 965 (in Japanese).
- 23) E.D. Palik ed.: Handbook of Optical Constants of Solids, Academic Press, Inc., San Diego, CA, (1985) 286.
- 24) M. Yanagihara et al.: Optical constants of very thin gold films in the soft x-ray region, *Applied Optics*, **30**, 19, (1991) 2807.
- 25) T. Harada and T. Hatano: Thin film filters for an EUV multilayer mirror optics with a laser produced plasma light source, *J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, **144-147** (2005) 1075.
- 26) IRD: SXUV Photodiodes, <http://www.ird-inc.com/sxuvwdd/sxuvwdd.htm>.