

レーザー生成錫プラズマ極端紫外光源の高出力・長寿命化技術

藤本, 准一

九州大学大学院システム情報科学府電気電子工学専攻博士後期課程

永井, 伸治

ギガフォトン株式会社

堀, 司

ギガフォトン株式会社

柳田, 達哉

ギガフォトン株式会社

他

<https://doi.org/10.15017/26514>

出版情報：九州大学大学院システム情報科学紀要. 17 (2), pp. 55-65, 2012-09-26. 九州大学大学院システム情報科学研究所

バージョン：

権利関係：

レーザー生成錫プラズマ極端紫外光源の高出力・長寿命化技術

藤本 准一*・永井 伸治**・堀 司**・柳田 達哉**・溝口 計**

High Power and Long Lifetime Technology for Laser Produced Tin Plasma Extreme Ultraviolet Light Source

Junichi FUJIMOTO, Shinji NAGAI, Tsukasa HORI, Tatsuya YANAGIDA
and Hakaru MIZOGUCHI

(Received July 26, 2012)

Abstract: Since 2002, we have been researching and developing a method for generating EUV light by irradiating a tin droplet with a laser beam. We believe the double pulse lasers irradiation scheme, in which the droplet is irradiated with a pre-pulse laser beam and a pulse CO₂ laser beam, and the debris mitigation by magnetic field are keys for industrial EUV light source system. In our experimental tool, we have investigated and optimized the droplet behavior and observed effect of the double pulse lasers irradiation scheme. The double-pulse method can improve conversion efficiency by 3.7 % by increasing ionization rate of the droplet (93 %). The pulse CO₂ laser energy absorption rate into the droplet is 68 % at optimized pre-pulse laser setting. Also the 98 % of ions were captured by our mitigation technique. Our scheme is also tested on the proto type of the industrial system. No ion signal was observed by Faraday cup on the collector mirror. It is expected our scheme will achieve high power and long time operation in industrial use.

Keywords: Extreme ultraviolet, EUV, Laser produced plasma, Tin, CO₂ laser, Lithography

1. はじめに

半導体製造の微細加工技術の主要部であるリソグラフィ工程では、縮小投影型露光装置の光源として解像度 180 nm 以降では KrF エキシマレーザー、100 nm 以降では ArF エキシマレーザーが使用されてきた。ArF エキシマレーザーは、続く 65 nm 以下の最先端量産ラインでの ArF 液浸リソグラフィや、32nm から 28 nm の量産のためのダブルパターンニング技術に使用されている。16 nm 以下の解像度を実現する次世代露光光源としては極端紫外 (Extreme Ultraviolet 以下 EUV) 光源が期待されている^{1,2)}。

EUV リソグラフィとは波長 13.5 nm の EUV 光を用いて、反射光学系(ミラー反射率 68 %程度)による縮小投影を利用した微細加工技術であり、20 nm 以下の解像力を実現できる。ただし EUV 光は気体によっても強く吸収されるため光路は高真空または希薄な高純度ガスの封入された容器内でしか伝播しない。さらに反射ミラーの反射率が

68%程度のため、たとえば標準的な 11 枚のミラー光学系で縮小投影を行うと元の光の 1.4 % しか露光面に届かない。

こうした事情も相俟って実用的スループット(>100 wafer per hour)を実現するには EUV 光源は 200 W ~ 500 W の出力が必要とされている^{3,4)}。この要求を満たす EUV 光源装置を開発するため、筆者らは、錫液滴にパルス炭酸レーザー光を照射して EUV 光を発生するレーザー生成錫プラズマ方式 (Pulse carbon dioxide laser produced tin plasma; CO₂-Sn-LPP) EUV (以下 LPP 方式 EUV)光源を考案し、光源の実用化に向けての開発を進めている^{5,6)}。

その際、最大の技術開発課題は、錫プラズマから EUV 光への生成効率の向上と、プラズマ生成時の錫の飛散による光源チャンパー内部の光学素子の汚染を防止して装置の長寿命化を実現することである。筆者らはこれらの課題に対して独自技術として以下の 4 つの主要技術を考案して、現在はその実証開発を行っている。すなわち、

- ① パルス炭酸ガスレーザーシステム(波長: 10.6 μm)と微少錫液滴(液滴径 約 20 μm)の組み合わせによる高効率な錫プラズマ生成および EUV 光の生成
- ② ダブルパルス照射によるパルス炭酸ガスレーザー光の錫への効率的な吸収と錫イオンの生成の促進
- ③ 磁場による錫イオンの捕捉と排出、必要最小量の錫液

平成 24 年 7 月 26 日受付

* 電気電子工学専攻博士後期課程

** ギガフォトン株式会社

滴の生成・供給

- ④ 小型パルス炭酸ガスレーザーと産業用として製品化された連続発振炭酸レーザーの組み合わせによる、増幅器としての高出力短パルス炭酸ガスレーザーシステムの開発

である。

本報告では、筆者らが開発している LPP 方式 EUV 光源の高出力化と長寿命化技術について、2 章では EUV 光源全体の構成と EUV 光生成に至る過程の各種計測装置について、3 章では、高効率化のポイントであるダブルパルス照射によって錫液滴形状を制御してレーザー光から EUV 光への変換効率向上させる技術について、4 章では光学素子の汚損を防いで長寿命化を図るために行っている磁場を用いた錫プラズマの飛散抑制技術について最新の研究成果を報告する。

2. EUV 光源の構成と各種計測システム

2.1 EUV 光源の構成と動作原理

開発中のリソグラフィー用 LPP 方式 EUV 光源(以下、実用装置)の全体構成イメージ図を Fig.1 に示す。

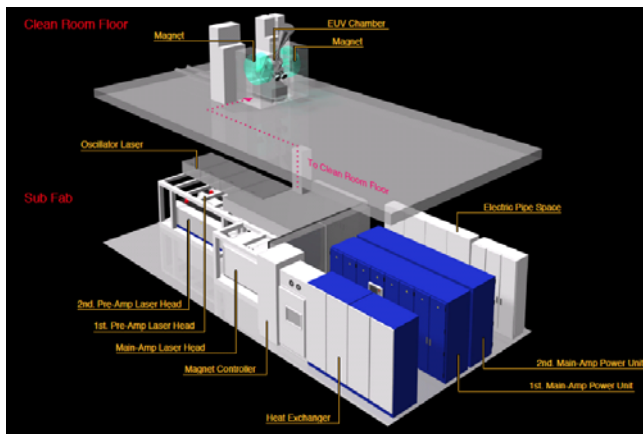


Fig.1 LPP-EUV light source system outlook.

また、構成の概念図を Fig.2 に示す。パルス炭酸ガスレーザーと EUV 光生成部はフロアを分けて設置することが可能な形に設計されており、露光光学系が置かれるクリーンルーム階には EUV 光発生用のチャンバーと磁石が配置される。EUV 光の減衰を防ぐため光伝送路は真空であり、かつ反射によるロス可能な限り防ぐため、露光装置と最短距離かつ最小反射回数で光学的に結合できるように設計されている。また、EUV 光生成部直下のスペース(通常は階下)にはプラズマ生成用のパルス炭酸ガスレーザーとともに、パルス炭酸ガスレーザーの入射に先だって錫液滴の形状を制御するためのプリパルスレーザー(Nd:YAG レー

ザー:波長 1.06 μm , またはファイバーレーザー:波長 1.03 μm , 以下プリパルスレーザー)およびその周辺機器が配置されている。プリパルスレーザーおよびパルス炭酸ガスレーザーの光は安全性の確保と光学素子の汚染防止のため窒素にてパージされた密封導光管を用いてプラズマ生成用チャンバーに導入される。EUV 光生成部は, Fig.2 に示すように、錫液滴発生装置により生成した錫液滴にパルス炭酸ガスレーザー光を集光照射して錫プラズマを生成し、錫イオンより発生した EUV 光を集光ミラーにより集光して、集光点付近にあるアパーチャーを通して露光装置であるスキャナー室に入射させる構造となっている。

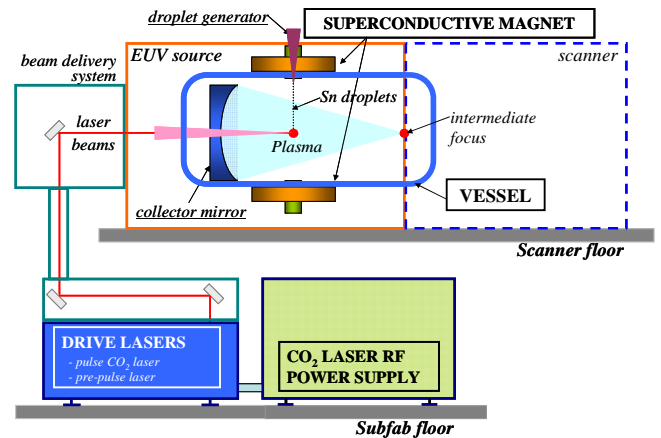


Fig.2 Typical layout of a LPP-EUV light source with magnetic field.

本研究で使用したパルス炭酸ガスレーザーについては既に報告しているが⁷⁾、以下に簡単に記述する。ナノ秒パルス発振機の出力を産業用連続発振レーザーを転用した増幅器で増幅する MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) 方式である。発振段のパルス光(繰り返し周波数 100 kHz, パルス幅 15 nsec)を、複数の炭酸ガスレーザー増幅器により増幅することにより最大約 7.6 kW の出力を得ている。

錫液滴は、錫液滴発生装置で錫を融点(231.93 $^{\circ}\text{C}$)以上に加熱・液化し、ノズルより微量な量の液化した錫を吐出することによって生成している。これまでの開発の成果から、現在では直径 30 μm , 吐出速度 60 m/sec の錫液滴を 300 kHz で安定に連続生成させることが可能となっている⁸⁾。

錫液滴にパルス炭酸ガスレーザーを照射しプラズマを生成する方式は筆者らのグループにより考案された技術である。九州大学岡田教授のグループの測定結果⁹⁾をきっかけに 2006 年から本格的に開発を実施している。その結果より高効率な点が着目されて、現在では世界の主流の方式となっている。特にパルス Nd:YAG レーザーとパルス炭酸ガスレーザーとを時間差を置いて錫液滴に照射するダブルパルス法の考案により錫プラズマのパラメータを探索したと

ころ高い変換効率 (>3 %) が初期の段階にて得られた。この結果はリーディングプロジェクトの大阪大学西原教授のグループの理論計算の結果¹⁰⁾と変換効率において良く一致している。

パルス炭酸ガスレーザーの集光径は約 300 μm 程度であるため、直径 20 ~ 60 μm 程度である錫液滴のままではレーザー径に対して錫液滴の直径が非常に小さいので、実際に錫に照射されるエネルギーが非常に少なくなる。そこで、錫液滴の直径に対応した集光径のプリパルスレーザー光を照射してあらかじめ錫を霧化し、その直径がパルス炭酸ガスレーザーの集光径程度に広がった時刻にパルス炭酸ガスレーザーを照射することにより効率よくプラズマ化する方式を用いた。動作の詳細については3章にて詳しく述べる。

プラズマから発生した EUV 光は集光ミラーで光源部から取り出す。EUV 集光ミラーは、錫プラズマ近傍に設置され、EUV 光を露光装置の照明光学系へ反射集光させる機能を持つ。錫プラズマから発生した高速錫イオンはミラー表面に蒸着されたモリブデン・シリコン (Mo/Si) 多層反射膜へ対してのスパッタリング損傷を発生させるため、独自の磁場を用いたイオン制御でその緩和を行っている¹¹⁾。プラズマ化された錫イオンは磁場によりトラップされて、集光ミラー等を汚損することなく EUV 光生成部から排気される。この動作を 100 kHz で繰り返す。なお、同時に低速イオン、一部プラズマ化されない中性錫原子や錫飛沫などが集光ミラーに付着するのを防ぎ除去するために容器内にはエッチングガスを満たしている¹²⁾。

同時に 100 kHz にて確実かつ高効率な EUV 光発生には、錫液滴に確実にレーザー光を照射する技術が非常に重要となる。なぜならば、液滴に正確にレーザーを照射できないと上記の方法は破綻するからである。筆者らは錫液滴の吐出方向、タイミングおよびレーザーの照射方向を常時監視して補正制御する方式を開発してその安定性を確保している。

2.2 各種計測装置の構成

筆者らは前述の錫プラズマの生成から EUV 発光および錫の飛散と磁場による錫飛沫の捕捉の効果を確認するために各種計測が可能な原理検証実験装置(以下 検証装置)を設計製作し、詳細な計測を実施した。Fig.3 に本装置の構成、Fig.4 その装置の外観の写真を示す。また、Table 1 に主な仕様を示す。基本的な構成は実用装置と同じである。唯一大きく異なる点は2つのドライバーレーザーの発振繰り返し周波数である。実用化装置は出力を得るために 100 kHz であるが、本装置は最大で 10 Hz としている。理由は装置の構成を簡便化してさまざまな現象を解明して実用化装置の設計へフィードバックするためである。

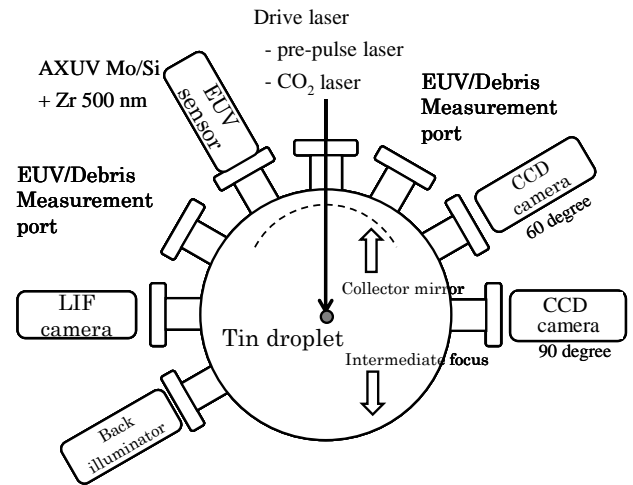
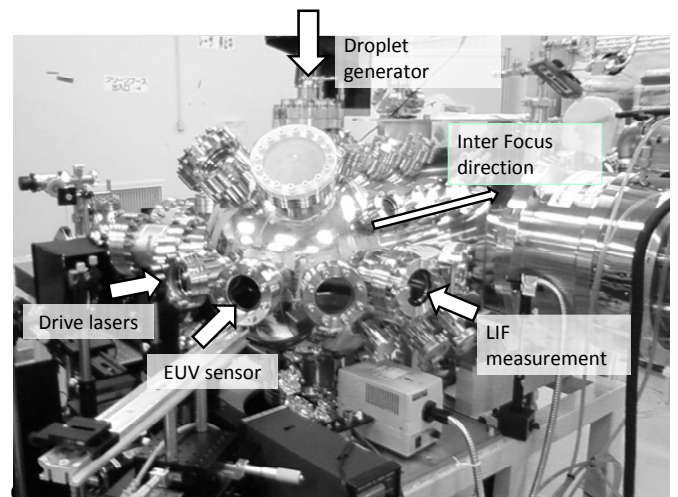


Fig.3 Diagram of small experimental tool.



Size of the System is about 2m width, 3m length and 2m in height.

Fig.4 Outlook of small experimental tool.

Table 1 Major performance comparison of industrial system (GL200) and small experimental tool.

			industrial system GL200E	small experimental tool
units				
pulse CO ₂ laser	maximum pulse energy	mJ	200	230
	maximum repetition rate	Hz	100 k	10
pre-pulse laser (Nd:YAG laser)	maximum pulse energy	mJ	3	9
	maximum repetition rate	Hz	100 k	10
Sn droplet diameter		μm	20 - 30	10 - 60
magnetic field around Sn plasma			applicable	applicable
purpose			industrial system	droplet & plasma optimization

繰り返し周波数を下げることにより、ドライバーレーザーは市販の装置の一部を改造して容易に使用することが可能

となる。プリパルスレーザーには Nd:YAG レーザーを用い、パルス炭酸ガスレーザーは市販の TEA レーザー増幅段として用いた MOPA 構成に改造して、レーザーパルス(エネルギー・時間幅)を実用装置と同等となるように調整した。また、この構成では熱負荷が非常に少なくなるために装置の冷却系統が大幅に簡略化することが可能となり、各種計測系の設置も容易となる。本装置は錫プラズマ生成位置の周囲に複数の計測ポートが設置されており、以下の現象の測定を実施した。

- ① 錫液滴の形状・位置(シャドウグラフ法)
- ② 錫中性粒子の空間分布(レーザー誘起蛍光法(Laser Induced Fluorescence 以下 LIF)¹³⁾)
- ③ EUV (13.5 nm, 2% バンド幅)パルスエネルギー量
- ④ パルス炭酸ガスレーザーおよびプリパルスレーザーエネルギー量
- ⑤ 錫イオン量(ファラデーカップ)

計測したい項目に合わせて各種計測器を装置の観測ポートに設置することにより、目的に応じた観測を行うことができる。錫液滴は実用装置と同様に、錫液滴生成装置により錫を融点以上に加熱・液化して吐出することによって生成している。直径 10・60 μm の範囲で錫液滴を変化させることにより最適な錫の量を探索することが可能となっている。

3. EUV 光発生の高効率化

2.1 節で述べたように、LPP 方式は原理的にも工学的にも非常に有用な方式である。本章ではこれまでに筆者らのグループで得られた実証データを示しながらその技術を検証する。

3.1 錫液滴からプラズマ生成および EUV 発光への過程

筆者らが採用する LPP 方式 EUV 光源の動作原理の概念図を Fig.5 に示す。まず、錫液滴にプリパルスレーザー光およびパルス炭酸ガスレーザー光が照射されると錫は主に 3 つの状態間を遷移する。すなわち「細かく砕かれた液滴」・「錫中性粒子」・「錫イオン(Sn⁺⁺)」である。パルス炭酸ガスレーザー光を吸収して発生した錫プラズマ中の錫イオンから EUV 光が発生し、その後錫はチャンバーの中に飛散し内壁に付着する。付着した錫はプリパルスレーザーおよび炭酸ガスレーザー光を導入する窓、EUV 出力・錫プラズマ・液滴を観測する計測用の窓に付着してその透過率を低下させ、集光ミラーに付着してその反射率を低下させるため、その付着量を極力低減させることが装置の長寿命化のポイントとなる。そのためには、チャンバー内壁に付着する前にいかに錫を捕捉して排出あるいは固定化することが重要な技術となる。

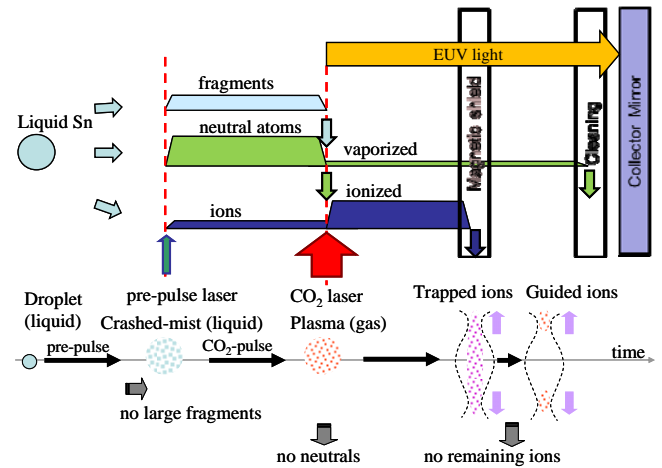


Fig.5 Droplet to EUV; concept of Sn plasma creation and debris mitigation with magnetic field.

磁場を用いた飛散防止技術において、効率よく錫を捕捉するには、いかに錫液滴を多く(100%に限りなく近く)イオン化するかが重要である。なぜならば錫イオンは磁場により捕獲することができるからである。効率の良いイオン生成は EUV 出力向上にも寄与し、錫飛沫による光学系の汚染の緩和との双方に良い効果をもたらす非常に重要な技術ポイントである。このことが LPP 方式 EUV 光源と磁場ミチゲーションの組み合わせを筆者らが採用した最大の理由である。

錫イオンを効率的に生成するにはパルス炭酸ガスレーザーを照射するときの錫液滴の形状がポイントである。前述のように、従来から錫平板などで 2 つのレーザーパルスに時間差を設けて照射するダブルパルス方式が変換効率の向上に有効な手段であることが提唱されてきた¹⁴⁻¹⁸⁾。筆者らは錫液滴にもダブルパルス方式を採用し、パルス炭酸ガスレーザー光を照射する前に、プリパルスレーザー光により錫液滴を霧化する方式を採用した。

3.2 節では、ダブルパルス方式におけるプリパルスレーザー光の照射条件を変化させることにより形状も変えることができることを検証した結果を示す¹⁹⁻²²⁾。3.3 節では、その時にパルス炭酸ガスレーザーのエネルギーの錫への吸収の変化を検証した結果を示す²³⁾。その後磁場によりガイドされた錫イオンが磁力線に沿って排出されていく。この検証結果については 4 章にて述べる。

3.2 ダブルパルス照射による錫液滴の変化

本節より 2.2 節で説明した検証装置を用いて行った計測結果を示す。まず、3.1 節で述べた錫液滴をプリパルスレーザーを用いてパルス炭酸ガスレーザーエネルギーを吸収しやすい形状に最適化する過程の計測結果を述べる。Fig.6

に、錫液滴の形状の変化の過程をシャドウグラフ法にて観測した計測結果を示す。20 μm の錫液滴にプリパルスレーザーを照射(delay time = 0)後の霧化した錫の空間分布の状態を、プリパルスレーザーの照射条件を変化させて観察した。Fig.6 a),b),c) はそれぞれプリパルスレーザーの照射条件を変化させた場合を示している。この実験結果から Fig.6 b) にてプリパルスレーザーを照射した場合において遅延時間 1.5 にて錫が細かく均等に分布している、錫がパルス炭酸ガスレーザーのエネルギーを効率良く吸収できる形状になっている。一方、Fig.6 a)の条件では中心部に錫がなくなりリング状に分散している。また、Fig.6 c)ではほとんど分散せず錫霧の大きさが拡大していないため効率が悪いと考えられる。

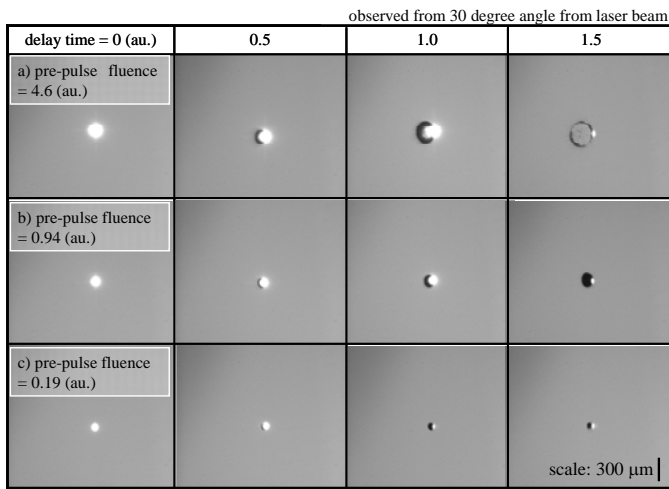


Fig.6 Shadowgraph images of the Sn fragments with pre-pulse laser fluence.

その後炭酸ガスレーザーを照射するとその光を効率よく吸収して錫の微小液滴はすべて蒸発し、消散することは以前筆者らより報告したとおりである。完全に蒸発した錫は中性原子あるいはイオンになっていると考えられる。その状態を直接観測するために、筆者らは LIF を用いて錫原子の分散の状態をプリパルスレーザー光照射後とパルス炭酸ガスレーザー光照射後の状態を観察した。Fig.7 にプリパルスレーザーの照射条件は固定して、パルス炭酸ガスレーザーの照射エネルギーを変化させた場合の結果を示す。パルス炭酸ガスレーザーのエネルギーを増加させていくと照射後の早い時期に錫中性粒子がイオン化していく様子が良くわかる。図のすべての LIF 測定結果は同じ検出感度で計測している。

この結果を錫の中性粒子数とパルス炭酸ガスレーザーエネルギーでプロットした結果を Fig.8 に示す。所定エネルギー以上のパルス炭酸ガスレーザーエネルギーを照射すると錫中性粒子数は大幅に減少し、その数はパルス炭酸ガスレーザーのエネルギー強度によらずほぼ一定であることが

わかる。このことは工業的に安定な性能を保つ上で非常に重要な結果である。実用装置で用いられるパルス炭酸ガスレーザーのエネルギー量もこの閾値よりも十分に高いため実用運転領域で安定な動作が可能となる。

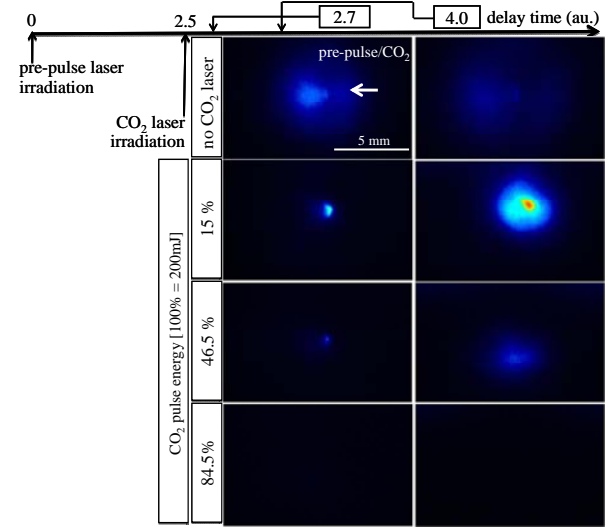


Fig.7 Sn neutral distributions after pre-pulse laser and CO₂ pulse laser irradiation.

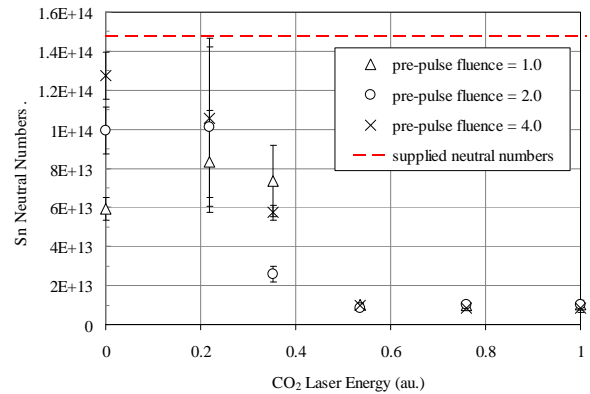


Fig.8 Sn neutral numbers versus CO₂ pulse energy with different pre-pulse laser fluence.

3.3 錫液滴でのパルス炭酸ガスレーザーエネルギー吸収

本節では錫プラズマを発生させる役割を担うパルス炭酸ガスレーザーのエネルギーがどのようにチャンバー内で消費されているかを検証装置にて計測した結果を示す。プラズマ点を中心にして装置水平面に EUV 光センサーを配置してその反射光の分布を測定した。この測定平面の分布がレーザー光の入射光軸を対称に球面でも同じと仮定してその比率を求めた。Fig.9 にその領域の定義を示す。

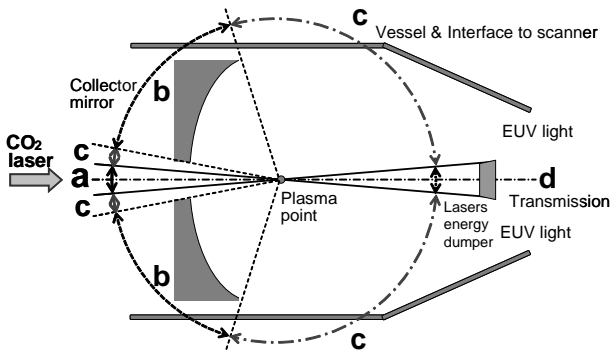


Fig.9 Category of reflected CO₂ laser energy; a) reflection back into the CO₂ laser, b) reflection onto the collector mirror, c) reflection onto the surrounding vessel wall and d) transmitted energy.

パルス炭酸ガスレーザーのエネルギーの行き先を、a) 錫液滴からの反射でパルス炭酸ガスレーザーに戻る成分、b) 錫液滴からの反射で集光ミラーに向かう成分、c) 錫液滴からの反射で EUV 容器周辺とスキャナーへの接続部品に向かう成分、d) 錫液滴を透過してレーザーエネルギー吸収体（ビームダンパー）へ入る成分、そして残り（入力エネルギーと上記で計測されたエネルギーの差分）が錫液滴に吸収されるエネルギー量とした。Fig.10 にその計測結果を示す。プリパルスレーザーの照射条件を変化させることにより、錫液滴の分散状態を変化させてパルス炭酸ガスレーザーエネルギーの配分比を各々計測した。その結果、錫液滴への吸収が増えるにつれて変換効率が上昇していることが判る。プリパルスレーザーの影響が 0 すなわち、パルス炭酸ガスレーザーのみ照射した場合には約 60 % のパルス炭酸ガスレーザーエネルギーが透過していることもわかる。投影面積比では錫液滴は 1 % 以下であるが透過エネルギーが 60 % であるのは錫液滴でのレーザーパルスの初期の吸収により分散・プラズマ化が起り吸収投影面積が拡大しているのが原因と考えられる。この実験の錫液滴の直径は 20 μm、パルス炭酸ガスレーザーのプラズマ点での集光スポット径は 300 μm である。この結果からもダブルパルス方式がパルス炭酸ガスレーザーのエネルギーの錫液滴への吸収を助け、その結果変換効率の上昇に寄与していることが明らかになった。原理検証実験装置の設定条件の範囲内で最適化した結果、パルス炭酸ガスレーザーのエネルギーの 68 % が吸収され、26.6 % が集光ミラーは容器内に反射散乱され、5.4 % が錫液滴を透過した。反射散乱した 26.6 % のエネルギーの内訳を見ると、3.9 % がパルス炭酸ガスレーザーに戻り、4.6 % が集光鏡に、18.1 % がその他の容器内面に分布している。

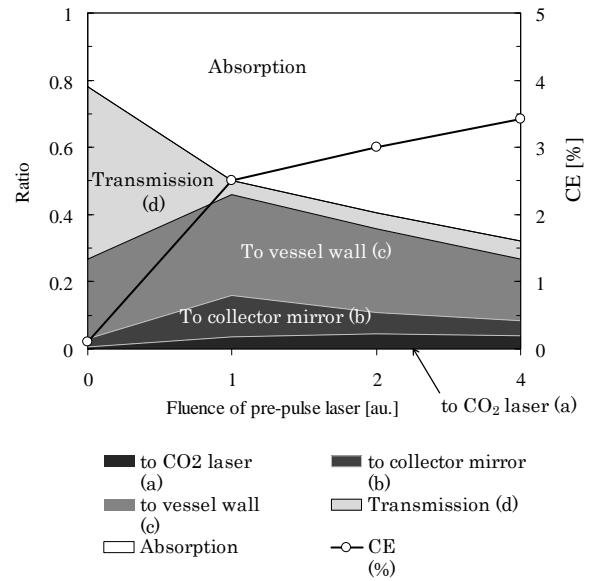


Fig.10 CO₂ laser energy distribution results versus pre-pulse laser fluence.

3.4 パルス炭酸ガスレーザー光から EUV 光への変換効率の向上

前項で述べたようにダブルパルス方式を用いることによりパルス炭酸ガスレーザー光照射時の錫液滴の形状を整えることにより、パルス炭酸ガスレーザーエネルギーを効率よく吸収させて錫のイオン化効率を向上させることが可能であることを報告した。本項では、その結果得られた変換効率について述べる。

パルス炭酸ガスレーザー光から EUV 光への変換効率を錫液滴直径、プリパルスレーザー光の照射条件を変えて比較した結果を Fig.11 に示す。錫液滴への照射条件を最適化した結果、錫液滴径 28 μm、パルス炭酸ガスレーザーエネルギー 200 mJ にて、最大約 3.7 % の変換効率が得られた。一方、錫液滴径やパルス炭酸ガスレーザー光のエネルギーを変更することにより最大 2.5 mJ のパルスエネルギー（定義：錫プラズマから発生する深紫外光および炭酸ガスレーザーからの散乱赤外光をフィルターした後のクリーン EUV 光；換算値）を発生させることも確認した（Fig.12）。これらの結果よりさらに錫液滴直径とプリパルスレーザーの照射条件を最適化することにより量産装置にて必要とされる 250 W (2.5 mJ, 100 kHz) が実現可能であることを実証した。

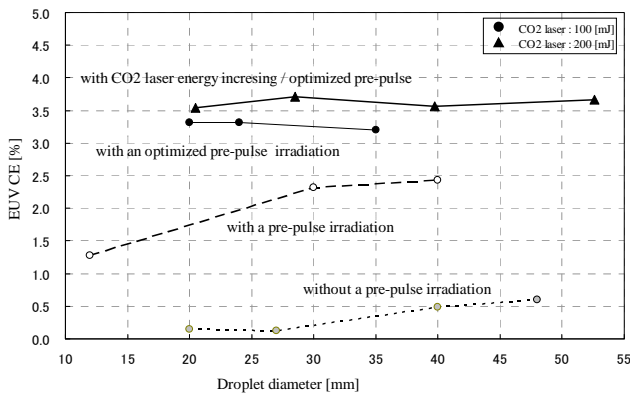


Fig.11 Conversion efficiency as a function of the Sn droplet diameter.

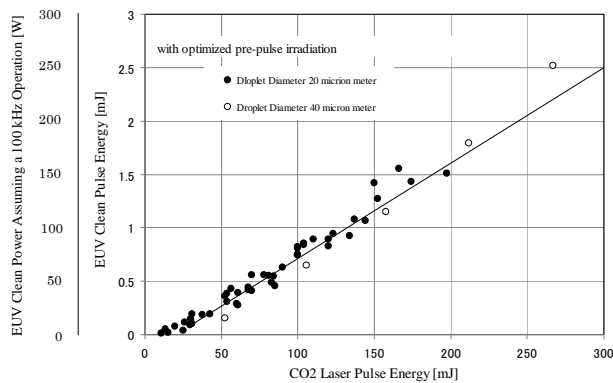


Fig.12 EUV clean energy/power versus CO₂ laser pulse energy.

4. 磁場による錫の飛散防止効果のシステム検証

4.1 錫イオンの磁場による回収

筆者らはまず検証装置にて、イオン化した錫が磁場によってどう捕捉されるかを確認した。検証装置内に磁場コイル(常電導磁石)を挿入し錫プラズマが生成する点に磁場を印加できるように構成した。磁場の強さは実用装置の約1.7倍まで印加することができる。磁場の強度の変化に伴う錫イオン捕捉効果を確認するためにチャンバー内の2か所にファラデーカップを配置して、イオン量を計測した。

Fig.13 にその配置を模式的に示す。イオンの平均価数はこれまでの実験結果から2価と仮定している²⁴⁻²⁷。ファラデーカップは2つ配置(ひとつは磁場が収束する両端の一方、もうひとつは磁場に直交する方向で集光ミラーが配置される場所)して各々の信号を同時に計測・比較することにより磁場による錫イオンの捕捉効果を検証した。

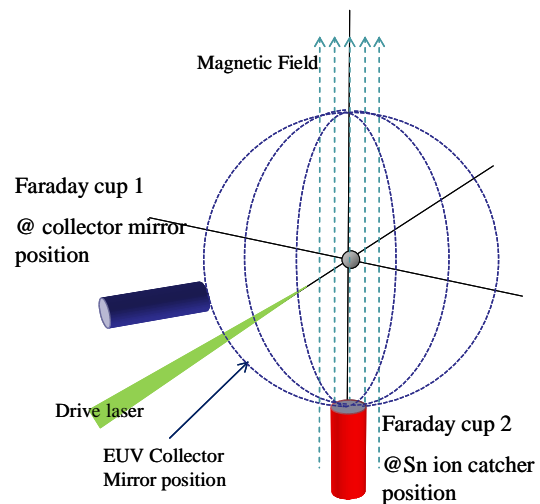


Fig.13 Experimental setup of Sn ion measurement with magnetic field.

錫プラズマから錫イオンは等方的飛散すると仮定して、計測した信号をプラズマ全体に換算した結果を Fig.14 に示す。Fig.14 a)に示すように磁場の強度を上げるにつれて磁場が収束する方向にイオンが集まってきて、集光ミラーの方向に飛散する錫イオンの量が減少していることがわかる。この計測から最大約98%イオンが回収されていることを確認した(Fig.14 b))。

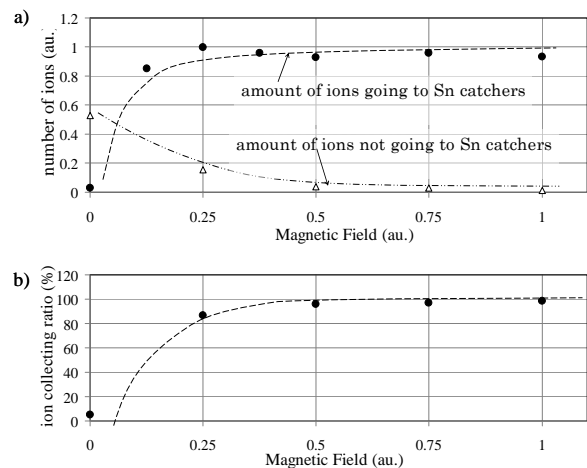


Fig.14 Sn ions numbers and collection rate versus magnetic field strength.

4.2 磁場による錫の飛散防止効果のシステム検証

2.1 節で述べた実用装置を用いて、錫の飛散防止の効果を確認した。Fig.15 示すようにダミーの集光ミラー上と磁場の収束方向にシリコン製のサンプル小片を配置して実験後に取り出して、表面を測定することによりその場所での錫の堆積量を確認した。同時に集光ミラー上にはファラデー

カップも配置して磁場により錫イオンが捕捉されているかの検証も同時に行った。

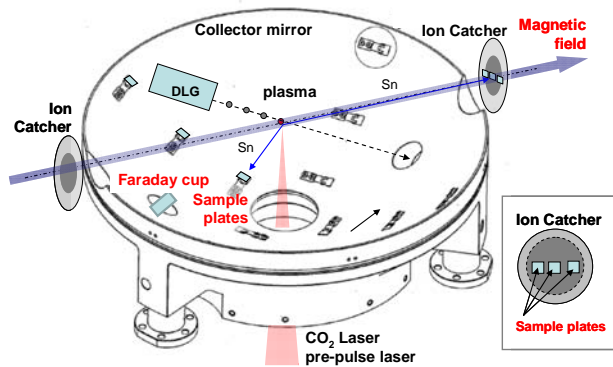


Fig.15 Experimental setup of debris mitigation system in industrial LPP-EUV light source.

今回の実験はパルス炭酸ガスレーザー装置の都合によりその出力エネルギーが所定のエネルギーの約 25 % と低い状態で行っている。筆者らは今後パルス炭酸ガスレーザーの高出力化実現に伴いより高いパルスエネルギーでの実験を進めていく予定である。

Fig.16 に集光ミラー上にファラデーカップを配置して集光ミラーに飛来する錫イオン量を計測した結果を示す。

Fig.16 a)に示すレイアウトで計測を実施した。**Fig.16 b)**のイオン信号の計測データが示すように錫のイオンはファラデーカップにて検出されなかった。このことから磁場による錫イオンの捕捉は機能していることが確認された。さらに詳細に計測するために、集光ミラー面上およびイオン捕集面上の錫の堆積量をサンプル小片で確認した結果を**Fig.17** に示す。

錫の堆積量の計測を表面よりエネルギー分散型 X 線分析 (Energy dispersive X-ray spectrometry, 以下 EDX) にて、断面を透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope, 以下 TEM) にて計測した。両サンプル共に錫の飛沫が飛散して堆積している。これはパルス炭酸ガスレーザーのエネルギーが所定のエネルギーの約 25 % レベルでの運転条件ではイオン化率が 20 % 程度であるために中性原子および錫の飛沫が大量に発生したためである。これらを除くと、集光ミラー上には SEM では錫は検出されなかったが、TEM にて厚さ 4.5 nm の錫の堆積が確認された。この堆積物は中性原子と考えられる。また、イオン捕集面には SEM にても 10 % 程度の信号比率で確認され、TEM にて 63 nm の錫の堆積が確認されている。この結果は、上述のように錫のイオン化率が低く前述の錫の飛沫と共にパルス炭酸ガスレーザーのエネルギーが低く中性粒子がまだ多く生成されているのが原因と考えられる。

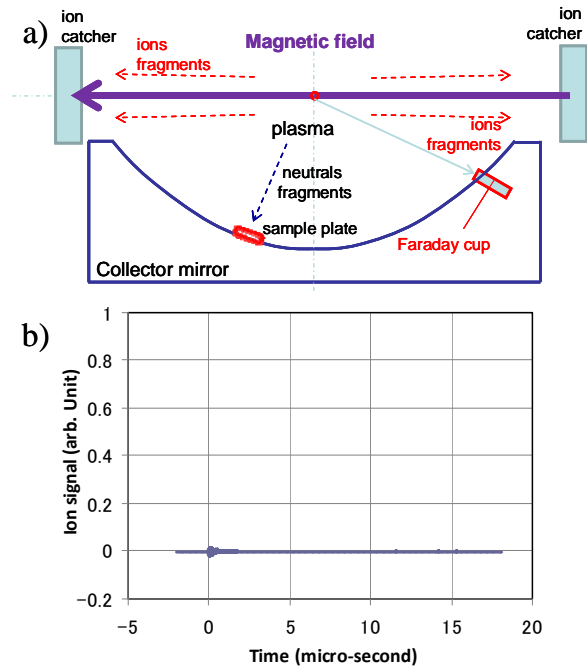
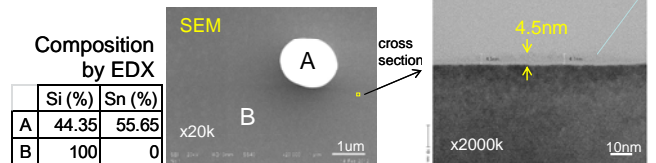


Fig.16 Ion signal on collector mirror and schematics of measurement setup.

a) Collector mirror



b) Ion catcher

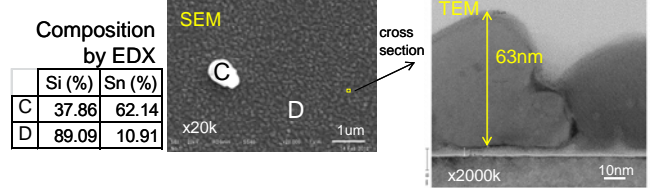


Fig.17 Sn deposition on witness plate located at collector mirror and ion catchers.

今後 50 % 出力レベル以上での運転ができればイオン化率が 90 % 以上に上昇し錫の飛沫および中性粒子が大幅に減少するために EUV 出力向上と共に、磁場による錫の飛散防止効果を実証されることが、これまでの結果から予想される。出力とミラーの寿命がトレードオフになっている現在の EUV 光源の技術状況を根底から改善できる、新しいブレークスルーが間もなくこの実用装置で実証されることが期待される。

5. まとめ

ダブルパルス方式による変換効率の向上と錫イオン化率の向上および磁場を用いた錫飛散防止方式は、以前からより出力と長寿命を両立できる画期的な方式として注目されている。今回報告したように 10 Hz 以下のパルス動作ではほぼ理論どおりの動作をしていることが検証された。

EUV 光源の研究の段階はすでに終了して製品化の段階に入ってきている。本稿で述べたように原理的にはその将来性は非常に有望であることが検証され、実用装置の早期の完成が強く期待されている。特に筆者らの採用するダブルパルス方式による錫のイオン化率向上、磁場による錫の飛散防止策の効果、そして EUV 変換効率の向上の実証データは LPP 方式 EUV 光源の将来性を強く支持するものである。

また、半導体回路の微細化による露光光源の短波長化に伴う露光装置価格の高騰も課題のひとつであり、EUV 光源の露光装置価格に占める割合もエキシマレーザーに比して大きくなると予想される。そのため生産性向上のために高スループットの要求はさらに高まり、光源の出力増加の要求も非常に強くなっている。ダブルパルス方式により変換効率を向上させることにより、最大の電力消費源であるパルス炭酸ガスレーザーの小型化や高出力化の課題の解決が実現すると期待される。

6. 謝辞

EUV 光源開発の一部は「極端紫外線 (EUV) 露光システムの基盤技術研究開発」(新エネルギー・産業技術総合開発機構, NEDO)の一部として技術研究組合極端紫外線露光システム技術開発機構 (EUVA) にてなされた。ここに記し深く感謝の意を表す。

7. 参考文献

- 1) Noreen Harned, Mieke Goethals, Rogier Groeneveld, Peter Kuerz, Martin Lowisch, Henk Meijer, Hans Meiling, Kurt Ronse, James Ryan, Michael Tittnich, Harm-Jan Voorma, John Zimmerman, Uwe Mickan, Sjoerd Lok: "EUV lithography with the Alpha Demo Tools: status and challenges", Proc. SPIE 6517, 651706 (2007).
- 2) Takaharu Miura, Katsuhiko Murakami, Kazuaki Suzuki, Yoshiaki Kohama, Kenji Morita, Kazunari Hada, Yukiharu Ohkubo, Hidemi Kawai: "Nikon EUVL development progress update" Proc. SPIE 6921, 69210M (2008).
- 3) Christian Wagner, Noreen Harned, Peter Kuerz, Martin Lowisch, Hans Meiling, David Ockwell, Rudy Peeters, Koen van Ingen-Schenau, Eelco van Setten, Judon Stoeldraijer, Bernd Thuering: "EUV into production with ASML's NXE platform", Proc. SPIE 76361H (2010).
- 4) Christian Wagner, Noreen Harned, Erik Loopstra, Hans Meiling, David C. Ockwell, Rudy Peeters, Eelco van Setten, Judon M. D. Stoeldraijer, Stuart Young, John D. Zimmerman, Ivo de Jong, Stef Hendriks, Ron Kool, Martin Lowisch, Jose Bacelar: "Performance validation of ASML's NXE:3100", Proc. SPIE 7969, 79691F (2011).
- 5) Akira Endo, Hideo Hoshino, Takashi Suganuma, Masato Moriya, Tatsuya Ariga, Yoshifumi Ueno, Masaki Nakano, Takeshi Asayama, Tamotsu Abe, Hiroshi Komori, Georg Soumagne, Hakaru Mizoguchi, Akira Sumitani, Koichi Toyoda: "Laser produced EUV light source development for HVM", Proc. SPIE 6517, 651700 (2007).
- 6) Hakaru Mizoguchi, Tamotsu Abe, Yukio Watanabe, Takano Ishihara, Takeshi Ohta, Tsukasa Hori, Akihiko Kurosu, Hiroshi Komori, Kouji Kakizaki, Akira Sumitani, Osamu Wakabayashi, Hiroaki Nakarai, Junichi Fujimoto, Akira Endo: "First generation laser-produced plasma source system for HVM EUV lithography", Proc. SPIE 7636, 763608 (2010).
- 7) Junichi Fujimoto, T. Ohta, K. M. Nowak, T. Suganuma, H. Kameda, T. Yokoduka, K. Fujitaka, M. Moriya, A. Sumitani, H. Mizoguchi: "Development of the reliable 20-kW class pulsed carbon dioxide laser system for LPP EUV light source", Proc. SPIE 7969, 79692S (2011).
- 8) Hakaru Mizoguchi, Tamotsu Abe, Yukio Watanabe, Takano Ishihara, Takeshi Ohta, Tsukasa Hori, Tatsuya Yanagida, Hitosh Nagano, Takayuki Yabu, Shinji Nagai, Georg Soumagne, Akihiko Kurosu, Krzysztof M. Nowak, Takashi Suganuma, Masato Moriya, Kouji Kakizaki, Akira Sumitani, Hidenobu Kameda, Hiroaki Nakarai, Junichi Fujimoto: "100W 1st Generation Laser-Produced Plasma light source system for HVM EUV lithography", Proc. SPIE 7969, 796908 (2011).
- 9) Hiroki Tanaka, A. Matsumoto, K. Akinaga, A. Takahashi and T. Okada: "Comparative study on emission characteristics of extreme ultraviolet

- radiation from CO₂ and Nd:YAG laser-produced tin plasmas”, *Appl. Phys. Lett.* **87**, 041503 (2005).
- 10) Katsunobu Nishihara, A. Sunahara, A., M. Nunami, H. Tanuma, S. Fujioka, Richard More, M. Murakami, T. Nishikawa, V. Zhakhovskii, et. al.: “Plasma physics and radiation hydrodynamics in developing an extreme ultraviolet light source for lithography”, *Phys. Plasmas* **15**, 056708 (2008).
 - 11) Akira Endo, H. Komori, Y. Ueno, K. M. Nowak, Y. Takayuki, Y. Tatsuya, T. Suganuma, T. Asayama, H. Someya, H. Hoshino, M. Nakano, M. Moriya, T. Nishisaka, T. Abe, A. Sumitani, H. Nagano, Y. Sasaki, S. Nagai, Y. Watanabe, G. Soumagne, T. Ishihara, O. Wakabayashi, K. Kakizaki, Hakaru Mizoguchi: “Laser-produced plasma source development for EUV lithography”, *Proc. SPIE* **7271**, 727108 (2009).
 - 12) Daisuke Nakamura, Koji Tamaru, Yuki Hashimoto, and Tatsuo Okada, Hiroki Tanaka, Akihiko Takahashi: “Mitigation of fast ions generated from laser-produced Sn plasma for extreme ultraviolet light source by H₂ gas”, *J. Appl. Phys.* **102**, 123310 (2007).
 - 13) D. Nakamura, T. Akiyama, K. Okazaki, K. Tamaru, A. Takahashi, T. Okada: “Ablation dynamics of tin micro-droplet irradiated by double pulse laser used for extreme ultraviolet lithography source”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41**, 245210 (2008).
 - 14) P. Dunne, G. O’Sullivan, D. O’Reilly: “Prepulse-enhanced narrow bandwidth soft x-ray emission from a low debris, subnanosecond, laser plasma source”, *Appl. Phys. Lett.* **76**, 34 (2000).
 - 15) S. Fujioka et al.: “Opacity effect on extreme ultraviolet radiation from laser-produced tin plasmas,” *Phys. Rev. Lett.* **95**, 235004 (2005).
 - 16) T. Higashiguchi et al.: “Enhancement of extreme ultraviolet emission from a lithium plasma by use of dual laser pulses”, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 161502 (2006).
 - 17) T. Higashiguchi et al.: “Suppression of suprathermal ions from a colloidal microjet target containing SnO₂ nanoparticles by using double laser pulses,” *Appl. Phys. Lett.* **91**, 151503 (2007).
 - 18) K. Nishihara et al.: “Plasma physics and radiation hydrodynamics in developing an extreme ultraviolet light source for lithography,” *Phys. Plasmas* **15**, 056708 (2008).
 - 19) Yoshifumi Ueno, H. Hoshino, T. Ariga, T. Miura, M. Nakano, H. Komori, G. Soumagne, A. Endo, H. Mizoguchi, A. Sumitani, Koichi Toyoda: “Characterization of Various Sn Targets with Respect to Debris and Fast Ion Generation”, *Proc. SPIE* **6517**, 65173B (2007).
 - 20) Tsukasa Hori, T. Yanagida, T. Yabu, H. Nagano, G. Soumagne, K. Kakizaki, A. Sumitani, J. Fujimoto, H. Mizoguchi: “Investigation on high conversion efficiency and Tin debris mitigation for laser produced plasma EUV light source”, 2010 SEMATECH EUVL Symposium, Kobe, JAPAN (Oct. 17-20, 2010) SO-04.
 - 21) Tatsuya Yanagida, H. Nagano, T. Yabu, S. Nagai, G. Soumagne, T. Hori, K. Kakizaki, A. Sumitani, J. Fujimoto, H. Mizoguchi, Akira Endo: “Characterization and optimization of tin particle mitigation and EUV conversion efficiency in a laser-produced plasma EUV light source” *Proc. SPIE* **7969**, 79692T (2011).
 - 22) Junichi Fujimoto, Tamotsu Abe, Satoshi Tanaka, Takeshi Ohta, Tsukasa Hori, Tatsuya Yanagida, Hiroaki Nakarai, Hakaru Mizoguchi: “Laser-Produced Plasma based EUV light source technology for HVM EUV lithography”, *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS* **11** (2), 021111 (Apr-Jun 2012).
 - 23) Junichi Fujimoto, Tsukasa Hori, Tatsuya Yanagida, Takeshi Ohta, Yasufumi Kawasuji, Yutaka Shiraishi, Tamotsu Abe, Takeshi Kodama, Hiroaki Nakarai, Taku Yamazaki, Hakaru Mizoguchi: “Development of laser-produced plasma based EUV light source technology for HVM EUV lithography”, *Proc. SPIE* **8322**, 83220F (2012).
 - 24) 藤岡慎介, 下村将史, 植野能史, スマンガオルグ, 小森 浩, 住谷 明, 砂原 淳, 保田ゆづり, 長井圭治, 乗松孝好, 西村博明, 西原功修, 宮永憲明, 井澤靖和, 三間園興, “CO₂ レーザー生成最小質量スズプラズマからの極端紫外光及びデブリ放出”, 春季 第 54 回応用物理学関係連合講演会予稿集 第 2 分冊 28p-A-13, 764 (2007).
 - 25) Russell A. Burdt, Yoshifumi Ueno, Yezheng Tao, Sam Yuspeh, Mark S. Tillack, Farrokh Najmabadi: “Recombination effects during expansion into vacuum in laser produced Sn plasma”, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 041502 (2010).
 - 26) Takeshi Higashiguchi, Chirag Rajyaguru, Naoto

Dojyo, Yosuke Taniguchi, Koji Sakita, Shoichi Kubodera, Wataru Sasaki: "Debris characteristics of a laser-produced tin plasma for extreme ultraviolet source", Rev. Sci. Instrum. **76**, 126102 (2005).

Teerawattansook, Martin Richardson, Vivek Bakshi: "Debris characterization and mitigation from microscopic laser-plasma tin-doped droplet EUV sources", Proc. SPIE 5751, 563 (2005).

27) Kazutoshi Takenoshita, Chiew-Seng Koay, Somsak

