レーザー生成プラズマ極端紫外光源の高出力・ 長寿命化技術

藤本 准一・溝 口 計

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

Junichi FUJIMOTO and Hakaru MIZOGUCHI

Since 2002, our team has been working on research and development of a method for generating EUV light by irradiating tin with a pulse CO_2 laser beam to turn it into EUV-emitting plasma. Since the generation of the deep ultraviolet light source, a high-power semiconductor lithography light source with long operating time has been in demand for higher throughput and stable operation. It is clear that the demand to meet these requirements will even rise in the generation of the EUV light source. The EUV light source makes use of a phenomenon where a tin droplet, being turned into plasma, emits EUV light; and challenges associated with its commercial viability include higher conversion efficiency and reliable mitigation techniques for preventing a vacuum vessel from being contaminated when the EUV-emitting plasma is generated. Our system is characterized by a double-pulse method for remarkably improving conversion efficiency by increasing ionization rate of tin and by a mitigation technique utilizing a magnetic field for capturing ionized tin. In this paper, we will present the overview of our system and the latest data and will also describe our future plan.

Key words: extreme ultraviolet (EUV), laser produced plasma (LPP), CO₂ laser, lithography

半導体製造の微細加工技術の心臓部である縮小投影露光 装置のリソグラフィー工程では,解像度180 nm 以降では KrF エキシマーレーザーが,100 nm 以降ではArF エキシ マーレーザーが量産装置として使用され,続く65 nm 以下 の最先端量産ラインではArF 液浸リソグラフィー技術が使 用されてきた.さらに32 nm の量産では,ダブルパターニ ング技術を実現する露光装置が導入され始めている.その 光源の短波長化の流れに従い,22 nm 以下の次世代露光光 源として EUV (extreme ultraviolet)光源が期待されてい る.微細化の進展に伴い露光装置の価格は世代ごとに上昇 しており,EUV 露光の世代にも装置の価格はさらに上昇 するとみられている.そのため,装置に要求されるスルー プットや信頼性はさらに高いレベルを要求され、そのこと は光源に対しても同様である.EUV 光源はこれまでのエ キシマーレーザー光源とはその装置構成が大きく異なる. また,装置の規模も大幅に複雑化し,部品点数もエキシ マーレーザーの5倍を超える規模となっている。特に,発 光させる真空チャンバー内では,錫のプラズマ化による EUV 光の生成効率と,EUV 光を発生させる錫の飛散によ る光学素子の汚染の防止が大きな技術課題となっている。

筆者らはこの課題に対して,日本発のオリジナル技術と して以下の4つの主要技術を考案し,現在はその実証を行 いつつ,製品化へ向けての詳細な設計を行っている段階で ある.

- パルス炭酸ガスレーザー(波長:10.6 µm)と錫液滴の組み合わせによる高効率な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イオンの生成
- ③錫イオンの磁場による捕捉と排出、必要最小量の錫

ギガフォトン(株)開発部(〒323-8558 小山市横倉新田 400) E-mail: junichi_fujimoto@gigaphoton.com



液滴の生成

④ 小型パルス炭酸ガスレーザーと産業用として実績の ある製品化された炭酸レーザーの組み合わせによる, 高出力短パルス炭酸ガスレーザーシステムの開発

本稿では,最近世界の注目を浴びている日本発の技術で あるリソグラフィー用パルス炭酸ガスレーザー励起錫プラ ズマ生成 (carbon dioxide laser produced tin plasma; CO₂-Sn-LPP,以下 LPP)-EUV 光源の高出力化と長寿命化技術 の開発の最前線の現状,および将来動向について報告する。

これらの技術は、従来より原理的にも工学的にも非常に 有用な方式といわれていたが、それを実証するデータが乏 しかったため、その実現性を疑問視する声もあった。筆者 らはその疑問に答えを出すための実験を行い、データを示 し、その実現性を実証した。さらに、高出力・長寿命化へ の展望について解説したい.

1. EUV 光源の要素技術

1.1 EUV リソグラフィーと EUVA による光源開発

波長 13.5 nm の EUV 光は、反射光学系(反射率 68%程度)による縮小投影が可能であるという特徴を生かしたリ ソグラフィーであり、NA = 0.3 程度の反射光学系を使っ て20 nm 以下の解像力を実現でき、光リソグラフィーとし ては最終波長ともいわれている(図1).ただし、13.5 nm の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%しかないため、 たとえば標準的な11枚のミラー光学系で高 NAの縮小投影 を行うと、元の光の 1.4%しか露光面に届かない.こうし



図2 LPP-EUV 光源の主構成.

た事情もあいまって,実用的スループット (>100 WPH (wafer per hour))を実現するには,光源は 200~500 Wの 出力が必要とされている.

EUV リソグラフィー技術開発を目的として,技術研究 組合極端紫外線露光システム技術開発機構(以下 EUVA) が 2002 年に発足し,日本の EUV 光源技術開発が本格的に スタートした¹⁾.その中で,ギガフォトンとコマツは錫液 滴をターゲットとし,パルス炭酸レーザーをプラズマ発生 ドライバーとして発生させたプラズマを磁場で捕捉する LPP-EUV 光源を考案し,開発を進めてきた.図2にギガ フォトンの LPP-EUV 光源の概念図を示す.

1.2 EUV 光源の要素技術開発

錫液滴ターゲットにパルス炭酸ガスレーザーを照射しプ ラズマを生成するスキームは,筆者らのグループの独創技 術である.九州大学岡田教授の測定結果²⁾をきっかけ に,2006年から本格的に開発を実施している.その成果 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



図3 プラズマ生成用パルス炭酸ガスレーザーのシステムの構成.

となっている.特に,YAG レーザー(波長 1.06 µm:以下 プリパルスレーザー)とパルス炭酸ガスレーザーとを時間 差を置いて照射するダブルパルス法の考案により,生成プ ラズマのパラメーターを探索したところ,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³⁾と,変換効率においてよく一致している.

プラズマ生成用の炭酸ガスレーザーシステムには,独自 の産業用の連続発振炭酸ガスレーザーヘッドを増幅器とし て用いた MOPA (master oscillator power amplifier) システ ムを採用している.発振段のパルス光(繰り返し周波数 100 kHz,パルス幅15 ns)を複数の炭酸ガスレーザー増幅 器で増幅することにより,最大約13 kWの出力を得てい る⁴(図 3).

ターゲットには, 錫を融点(231.93°C)以上に加熱・液 化して吐出することによって, 錫液滴の生成を行ってい る. 直径30 μm, 速度 60 m/sの錫液滴を300 kHz で安定的 に連続生成させることが可能となり, さらに現在では 20 μm 級の錫液滴の安定生成にも成功している.

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する. 錫プラズマから 発生した高速イオンによる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 リング損傷が発生するが, 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⁵⁾.

2. EUV 光源の高出力化と長寿命化

1章で述べたように,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.この章では,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.

ドロップレットから高効率プラズマ生成および EUV 発光への過程

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,錫はおもに3つの状態間を遷 移する.すなわち,「細かく砕かれた液滴(微少液滴)」・



CO2 laser Pre-pulse laser EUV vessel Collector mirror

図5 錫液滴へのレーザー照射方法.

「錫原子」・「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 光を発し、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 EUV 出力・プラズマ・液 滴を観測する窓および集光ミラーに付着して, その透過率 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、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するかが重要 な技術となる、図4に、筆者らが開発を進める錫デブリの 緩和の原理を示す⁶⁻⁸⁾ EUV 光を増大させ錫を効率よく捕 捉するには、いかに多くの錫イオンを効率よく生成するか にかかっている. なぜならば, 錫イオンが EUV 光を発生 し、そのイオンは磁場により捕獲することができるからで ある、すなわち、効率のよいイオン生成は、出力・デブリ 緩和の双方によい効果をもたらす重要な技術ポイントであ る. 同時に、錫液滴に確実にレーザー光を照射する技術も 非常に重要となる.筆者らは、錫液滴の吐出方向やタイミ ング、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(図5).

錫イオンを効率的に生成するには、パルス炭酸ガスレー ザー光を照射するときの錫ターゲットの形状がポイントで ある. 筆者らが採用したダブルパルス方式においては、プ







図7 ダブルパルスによって生成された錫液滴の状態(シャドウグラフ).



図8 プリパルス・パルス炭酸ガスレーザー照射後の錫中性原子の分布.

リパルスレーザー光により錫液滴をパルス炭酸ガスレー ザー光が効率よく吸収できる形状にすることを狙いとして いる.プリパルスレーザー光の照射条件を調整し,錫の形 状を整えると,パルス炭酸ガスレーザー光の吸収を増やす ことができる.

図6にその過程を模式的に示す.まず,錫液滴にプリパ ルスレーザー光が照射されると,液滴が破壊・分散し,時 間とともに拡散していく.そこにパルス炭酸ガスレーザー 光が照射され,EUV発光する.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る状態を示す.

図7に、その過程を実際にシャドウグラフ法にて観測した結果を示す.プリパルスレーザーの照射条件を最適化することによって、図7のように、錫液滴を均等に細かく分散させることができる.錫が細かく分散した状態で炭酸ガスレーザー光を照射すると、その光を効率よく吸収して、錫の微少液滴はすべて蒸発・消散する.

図7のように完全に蒸発した錫は、中性の原子あるいは 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 (laser induced fluorescence, レー ザー誘起蛍光法)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 において観察した。

図8にその結果を示す.上段はプリパルス光のみを照射 してプリパルスの効果を確認した結果,下段はプリパルス レーザー光とパルス炭酸ガスレーザー光を照射してダブル パルスの効果を確認した場合の結果を示している.プリパ ルスレーザー光の照射条件は,前述の最適化された条件で



図 9 中性原子数とパルス炭酸ガスレーザー照射エネルギーの 関係.

ある。プリパルスレーザー光のみを照射した場合は図中で 白く見える錫の中性の原子から発する蛍光が観測時点で約 直径 5 mm の大きさに分散している様子を示している。プ リパルスレーザー光照射後にパルス炭酸ガスレーザー光を 分散の大きさがほぼ炭酸ガスレーザーの集光径になる遅延 時間で照射すると、錫原子がほぼ消散して、錫原子の LIF 信号は観測されなくなる。図8を詳細に解析した結果、イ オン化率93%であることが計測された。観測された信号 の比率から、93%の錫がイオン化し、約7%が錫原子とし て残っていることが確認された。プリパルスレーザーの照 射条件を固定して、パルス炭酸ガスレーザー光のエネル ギー量を変化させた場合の, 錫中性原子数の変化を測定し た結果を図9に示す。所定のエネルギー以上のパルス炭酸 ガスレーザー光を照射すると、錫は十分イオン化され、そ の比率は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



図10 錫イオンの分布の磁場強度による変化.



図 11 ダブルパルスの照射条件と液滴径の違いによる変換 効率の比較.

である.プリパルスレーザーと炭酸ガスレーザーを用いた ダブルパルス方式によって,錫のイオン化率 93%に達す ることが可能となった.

次に、イオン化した錫が磁場によってどう捕捉されるか を計測した結果を図 10 に示す.イオンの観測はファラ デーカップを用いて、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.ファラデーカップを2つ配 置(1つは磁場が収束する両端の一方、もう1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)して計測し た.図 10 右上図に示すように、磁場の強度を上げるとと もに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.この計測では、約98%イオンが回収されている.

2.2 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

前節で述べたように、ダブルパルス方式を用いることで パルス炭酸ガスレーザー光照射時の錫ターゲットの形状を 整えることにより、レーザーエネルギーを効率よく吸収さ せて錫をイオン化させることが可能である.本節では、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、錫液滴径、プリパルスレーザー光照射条件を変えて比 較した結果を図 11 に示す.このように錫液滴への照射条 件を最適化した結果、最大約4.0%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を 発生させることも確認した(図 12).これらの結果より、 さらに錫液滴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、量産装置の仕様値である 250 W (2.5 mJ, 100 kHz)が可能であることが実証された.



図 12 パルス炭酸ガスレーザーと極端紫外光エネルギーの 関係.

3. EUV 光源システム開発

3.1 第1世代機開発

2002~2007 年度までの5年間で,LPP 方式と放電生成プ ラズマ(discharge produced plasma; DPP)方式による EUV 光源開発をギガフォトン・ウシオ電機・コマツで進め, 50 W の実証実験を行った.その結果として両方式が並存 し⁹⁾,さらに 2008 年度からはマッチングファンドで EUVA を継続し,第1世代光源装置の開発が行われ,実験室レベ ルでの100 W以上の出力を達成し,2010年度に終了した. その結果を受けて,民間企業において,半導体量産用露光 装置に向けた EUV 光源システムの開発が進められている.

筆者らは、これらの要素技術を集積したシステム化装置 (engineering test stand、以下 ETS)を試作して、高速錫液 滴吐出 100 kHz の高出力パルス炭酸ガスレーザーを用いた EUV 発生の基礎実験を進めてきた.超伝導マグネットを 用いて 1.0 T 程度の強磁場を錫プラズマの周辺に実現し、 LPP 方式での錫プラズマに含まれる高速イオンの抑制の効 果も実証している⁶⁾.初代システム機の ETS 装置の改良を 進めた結果、中間集光点(intermediate focus、以下 I/F) において 104 W の EUV 光の連続運転に世界で初めて成功 した¹⁰⁾. さらに、液滴直径を半分の 30 μm にすることによ り、錫の飛散を抑制して、出力 42 W レベルで 7 時間の連 続運転も実証した¹¹⁾.

3.2 第2世代機開発^{11,12)}

ETS 装置の実験データをもとに,現在は第2世代機 (Gigaphoton GL200E)の開発が進められている.炭酸ガ スレーザーと EUV スキャナーはそれぞれ別のフロアに設 置されてもよく,スキャナーが置かれるクリーンルーム階 には EUV 発生用のチャンバーと磁石が配置され,13.5 nm 光は減衰を防ぐため伝送路が真空であり,かつ反射による ロスが多大であるため露光装置と最短で光学的に結合され ている. この内部でターゲットである錫液滴にレーザー光 を照射し, 錫プラズマを生成し錫イオンより EUV 光を発 生させている.スキャナー直下のスペースに,プリパルス レーザーおよび比較的伝送が容易でサイズが大きいパルス 炭酸ガスレーザーおよびその周辺機器が配置されている. 炭酸ガスレーザー光は安全性の確保と光学素子の汚染防止 のため,窒素パージされた導光管を用いてチャンバーに導 入される.

ギガフォトンでは現在は第2世代装置の組み立てが終わ り、各コンポーネントの性能検証を実施して総合試験の準 備が進められている.性能確認後には露光機メーカーに納 入され、その後デバイスメーカーにて半導体生産ラインに 導入される見込みである.

第2世代機は,EUV 露光の最初の量産用装置としての稼 動が期待されている.EUV 光源の量産への適用の最大の 課題は,前述のように錫プラズマ生成後のチャンバー内部 へのスパッタリングによる汚染の防止である.筆者らの磁 場による飛散防止策は,錫原子をほぼすべてイオン化させ ることにより,それを実現できる.また,半導体回路の微 細化と露光光源の短波長化に伴い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 合もエキシマー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.ダブルパルス方式は高出力化の課題を実現するため にも有効な技術であると確信している.

EUV 光源は,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つつある. 特に,筆者らの開発グループによるダブルパルス方式での 錫のイオン化率向上,磁場による錫の飛散防止策の効果, さらには 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.

日本のコンソーシアム EUVA も 2010 年度をもって終了 し、その後は民間主体で商用ベースでの国際競争の時代と なっている。筆者らは純国産の独自技術の粋を集めた日本 発の LPP 方式 EUV 光源を実用化し、世界の半導体リソグ ラフィー技術のさらなる発展に貢献することを目標に日夜 開発に邁進している。

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」(NEDO)の一部として EUVA に

てなされた. ここに記し深く感謝の意を表する.

文 献

- 1)小特集「リソグラフィ用 EUV 光源研究の現状と将来展望」, 核融合研究, **79** (2003) 219-262.
- 2) H. 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 (2005) 041503.
- K. Nishihara, A. Sunahara, M. Nunami, H. Tanuma, S. Fujioka, R. 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** (2008) 056708.
- 4) A. Endo, T. Abe, H. Hoshino, Y. Ueno, M. Nakano, T. Asayama, H. Komori, G. Soumagne, H. Mizoguchi, A. Sumitani and K. Toyoda: "CO₂ laser-produced Sn plasma as the solution for highvolume manufacturing EUV lithography, "Proc. SPIE, 6703 (2007) 670309.
- 5) A. 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 and H. Mizoguchi: "Laser-produced plasma source development for EUV lithography," Proc. SPIE, **7271** (2009) 727108.
- 6) Y. Ueno, H. Hoshino, T. Ariga, T. Miura, M. Nakano, H. Komori, G. Soumagne, A. Endo, H. Mizoguchi, A. Sumitani and K. Toyoda: "Characterization of various Sn targets with respect to debris and fast ion generation," Proc. SPIE, 6517 (2007) 6517-123.
- 7) T. Hori, T. Yanagida, T. Yabu, H. Nagano, G. Soumagne, K. Kakizaki, A. Sumitani, J. Fujimoto and H. Mizoguchi: "Investigation on high conversion efficiency and Tin debris mitigation for laser produced plasma EUV light source," 2010 SEMATECH EUVL Symposium, SO-04 (Kobe, Oct. 17–20, 2010).
- 8) T. Yanagida, H. Nagano, T. Yabu, S. Nagai, G. Soumagne, T. Hori, K. Kakizaki, A. Sumitani, J. Fujimoto, H. Mizoguchi and A. Endo: "Characterization and optimization of tin particle mitigation and EUV conversion efficiency in a laser-produced plasma EUV light source," Proc. SPIE, **7969** (2011) 7969-100.
- 9) 特集「実用間近のレーザー方式極端紫外線リソグラフィ光源 開発」, レーザー研究, **36** (2008) 672-746.
- 10) H. Mizoguchi, T. Abe, Y. Watanabe, T. Ishihara, T. Ohta, T. Hori, A. Kurosu, H. Komori, K. Kakizaki, A. Sumitani, O. Wakabayashi, H. Nakarai, J. Fujimoto and A. Endo: "1st generation laser-produced plasma 100 W source system for HVM EUV lithography," Symposium on EUV lithography, SO-03 (Kobe, Oct.18–20, 2010).
- 11) H. Mizoguchi, T. Abe, Y. Watanabe, T. Ishihara, T. Ohta, T. Hori, A. Kurosu, H. Komori, K. Kakizaki, A. Sumitani, O. Wakabayashi, H. Nakarai, J. Fujimoto and A. Endo: "1st generation laser-produced plasma source system for HVM EUV lithography," Proc. SPIE, **7969** (2011) 7969-07.
- 12) J. Fujimoto, T. Ohta, K. M. Nowak, T. Suganuma, H. Kameda, T. Yokoduka, K. Fujitaka, M. Moriya, A. Sumitani and H. Mizoguchi: "Development of the reliable 20-kW class pulsed carbon dioxide laser system for LPPEUV light source," Proc. SPIE, **7969** (2011) 7969-99.

(2011年10月11日受理)