



## 解説

## EUV 光源開発の現状

## Progress in Extreme Ultraviolet (EUV) Source Development

東口 武史<sup>1,2)</sup>, 遠藤 彰<sup>3,4)</sup>, 溝口 計<sup>5)</sup>HIGASHIGUCHI Takeshi<sup>1,2)</sup>, ENDO Akira<sup>3,4)</sup> and MIZOGUCHI Hakaru<sup>5)</sup><sup>1)</sup>宇都宮大学大学院工学研究科, <sup>2)</sup>宇都宮大学オブティクス教育研究センター,<sup>3)</sup>チェコ科学アカデミー HiLase プロジェクト, <sup>4)</sup>早稲田大学理工学術院, <sup>5)</sup>ギガフォトン株式会社

(原稿受付: 2013年4月21日)

半導体集積回路の微細化は情報化社会の飛躍的發展を支えており、半導体集積回路の高密度化を支えてきたのは微細な回路パターンを形成するリソグラフィ技術である。EUV (Extreme ultraviolet) 露光機が市場に投入されるための懸案は、量産用 EUV 光源の出力が低いことである。本解説では、プラズマ EUV 光源の開発がどこまで進展しているのかについて、最近の動向と現状を解説することにする。

**Keywords:**

extreme ultraviolet (EUV), laser-produced plasma (LPP), discharge-produced plasma (DPP),  
high volume manufacturing (HVM), droplet, tin, debris, pre-pulse, ion beam

**1. はじめに**

産業のコメと呼ばれる半導体集積回路の高集積化は、いまや縁の下力持ちとして機能しており、現代の生活に自然に入り込んでいる。パソコン、タブレットの処理速度は未だに高速化、高容量化しているし、車や飛行機などでも電子化は進んでおり、そこにも半導体集積回路が活躍している。

半導体集積回路の一つで CPU (Central Processing Unit) の分野で有名な会社インテル (Intel Corporation) の創始者の一人であるゴードン・ムーアは、有名な法則を提唱している。半導体チップの回路の複雑さはトランジスタの個数に比例し、18か月ごとに倍になるというムーアの法則である。限られた体積、面積内に多くのトランジスタを入れ込むわけである。この原稿を書いている現在、波長 193 nm の ArF レーザーが活躍しており、液浸法により微細回路を量産している。しかしその先の EUV 光源を関係者は首を長くして待っているわけである。

半導体の微細化に寄与する EUV 光源は、様々な光源方式の中にあって、波長が 13.5 nm のインコヒーレント光源を指している。物理の教科書でいうところの真空紫外でもあるし、軟 X 線でもある。極端紫外光ということもある。XUV 光源といってもよいし、EUV 光源といってもよい。それは、この波長を見るとき、見ている人の立ち位置で呼び方が変わる。半導体関連分野では、EUV 光源と呼んでいる。EUV 露光技術では、Mo/Si 多層膜鏡の反射率特性

で光源に要求される波長が先に決まっている。

EUV 光を半導体製造に使う動きは日本で始められていた。木下氏による放射光による EUV 光で半導体回路の細線化が実証されたのは1980年代の中頃のことであり [1]。その後の歴史的背景は様々な報告があり、2012年3月に日本光学会で特集された岡崎氏の解説に詳しいので参照されたい [2]。その後、露光波長に関する様々な議論があって、半導体分野で EUV 光源というと波長 13.5 nm の光のことを意味するようになった。

EUV 露光技術は、今行われている ArF 液浸技術までの光露光技術を突破すると期待されている。しかし…EUV 光源がない。正確には、EUV 光源は開発されているが、もう少しのところで半導体回路を量産するための光源はまだ市場に投入されていない。そのため、まだ EUV 光源がないようにみえているのである。もう少しの状況になっているとは、量産用光源の出力がもう少し、ということである。EUV 光源の開発に基礎研究から携わってきた研究者、開発者からすると確実に進展していると思っているが、この分野以外の方から EUV 露光技術の分野をみると、進捗が遅れているようにみえているのであろう。

これまで本学会誌でも EUV 光源の現状と将来展望などについて小特集 [3, 4] や論文 [5, 6] が掲載されてきたので、本解説では、これまで行われてきた EUV 光源の開発の歴史は他の文献に譲ることにする。また、本学会10月号に「プラズマによる短波長光源研究の進展とその物理」の小

<sup>1)</sup> Department of Advanced Interdisciplinary Sciences, Utsunomiya University, Utsunomiya, TOCHIGI 321-8585, Japan

<sup>2)</sup> Utsunomiya University Center for Optical Research & Education (CORE), Utsunomiya, TOCHIGI 321-8585, Japan

<sup>3)</sup> HiLASE Project, Institute of Physics AS, CR, Na Slovance 2, 18221 Prague 8, Czech Republic,

<sup>4)</sup> Faculty of Science and Engineering, Waseda University, TOKYO 169-8555, Japan

<sup>5)</sup> Gigaphoton Inc., Oyama-shi, TOCHIGI 323-8558, Japan

Corresponding author's email: higashi@cc.utsunomiya-u.ac.jp

特集が予定されているので、EUV光源の物理については、そちらで詳しく述べられる予定である。そこで、本解説では、本稿が書かれている時期の最新の状況を踏まえ、産業界で実用化が目前に迫っているEUV光源の進展について述べることにする。量産用EUV光源のコンセプトと現状の放射特性、EUV露光技術の課題について報告する。

## 2. 露光 EUV 光源の基本構成の成立

原子番号が大きな元素による高密度プラズマから放射されるスペクトルはEUVの波長域にあり、帯域の広いスペクトル構造をもつ。このことが最初に示されたのは1980年代前半の頃である[7,8]。その後、錫の多価イオンプラズマが波長13.5 nmを強く放射し、かつ、出力が大きいことが示されたのは、1990年代のことである[9,10]。錫の多価イオンからの共鳴線発光は図1に示されるように光子エネルギー92 eV領域つまり波長13.5 nm領域に集中している。このような放射のスペクトルは、共鳴千一本一本を分光器で波長分解することはできず、連続スペクトルとして観測される。このようなスペクトル構造をunresolved transition array (UTA)と呼んでいる。多価イオン錫プラズマの場合、共鳴線は、波長13.5 nm領域に1000本以上ある。それぞれの共鳴線は放射強度も大きく、これらが束になっていることから、波長13.5 nm領域の高出力放射が可能になっている。この放射特性を光源に適用しているのがEUV光源である。この放射の物理については、誌面の都合から本解説では割愛し、本学会誌10月号に譲ることとする。

半導体リソグラフィでのEUV光源では要求される連続出力は、2000年頃の研究開発の開始時点で既に100 W以上、現在では1 kW以上と通常の実験設備とは非常に異なる領域にあり、その基本構成をまったくのゼロベースで検討することから始まった。プラズマからの発光は図1に示されているようなUTAのスペクトル構造をもつことは不

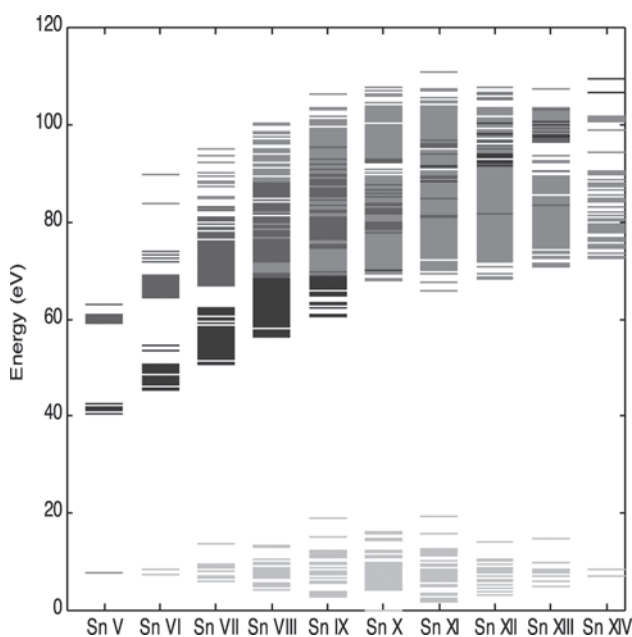


図1 各錫イオンから放射されるエネルギー分布。

変であるが、利用可能な変換効率を1%としても、エネルギー源としてのレーザーは、ナノ秒パルスでの高繰り返し動作が可能で、平均出力が100 kWまで可能な方式を選択する必要があった。

EUV光源は、原子番号が $Z=50$ の錫(Sn)の多価イオンプラズマからのインコヒーレントの点光源である。プラズマを生成する方法にはレーザー生成プラズマ方式と放電プラズマ方式がある。発光効率のよい量産用EUV光源プラズマの典型的なプラズマパラメータは、電子温度が30–50 eV、電子密度が $10^{17}–10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の程度である。

プラズマ媒質としてはUTAスペクトルでのピーク波長が13.5 nmとMo/Si多層膜ミラーの反射率のピークと一致する錫が最終的に選択されたのは必然であった。大学を中心とする基礎研究で、変換効率を維持したままでの必要最少原子数が探索され、これはmass-limited targetと呼ばれたが、100 mJ程度のレーザーパルスエネルギーの場合10  $\mu\text{m}$ 程度の微小ドロップレットに相当することが結論されている[11]。

量産用EUV光源におけるターゲット供給の課題は、この微小ドロップレットを高速で真空チャンバーの発光点に輸送する手段の研究開発である。図2にはその概念を示す。インクジェットなどで研究の進んでいた微小液体技術を応用することで、現在ではノズルから20 cm程離れたポイントに位置、時間安定度を満足する装置が開発されている。

レーザー生成プラズマEUV光源における変換効率(conversion efficiency: CE)は等方的に発光するEUV光をチャンバーの片側に置かれたMo/Si多層膜ミラーで中間集光点(intermediate focus: IF)に集めることに対応して、照射レーザーパルスエネルギーに対する半球( $2\pi \text{ sr}$ )空間に放射される13.5 nmを中心波長とする2%帯域幅に含まれるパルスエネルギーで定義している。光源のサイズにはEtendueと呼ばれるパラメータが存在し、これは、(光源サイズ)  $\times$  (集光立体角)と定義される。Etendueの代表

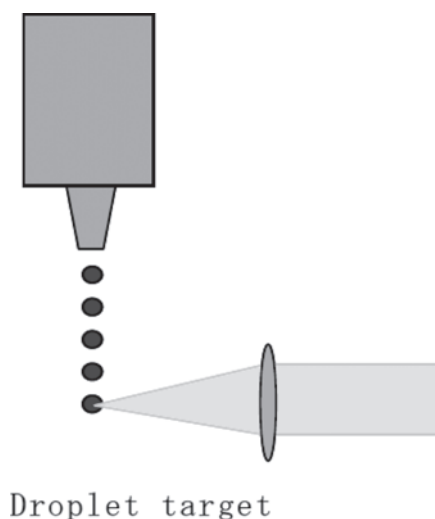


図2 ドロップレットターゲットによるレーザー生成プラズマEUV光源の概念。

的なパラメータは  $3.3 \text{ mm}^2 \text{ sr}$  であり、レーザー生成プラズマではこれを十分に満足できる小径のプラズマを実現できる点も有利である。図3は光源、捕集鏡、中間集光点の典型的な配置を示している。

エネルギー源としてのパルスレーザーとして、EUV光源の開発が開始された頃はNd:YAGレーザーが用いられたが、ビームあたりの平均出力が1kWに近い動作領域では固体媒質での熱揺らぎによるレーザービームの波面の乱れが顕著になり、数十 $\mu\text{m}$ に集光することは困難になる。固体媒質の形状はロッドが典型的であるが、この問題の解決に向けて冷却効率の高い薄ディスク (thin disk) などの方式が試みられている。いくつかの国際プロジェクトでの目標レベルは、平均出力1kWでのシングルビームで、ビーム品質  $M^2 < 2$  が現実的とみられて設定されている。

量産用 EUV 光源のための駆動用レーザーには、シングルビームで10kW以上のパルス出力を良好なビーム品質で実現できるレーザー装置としてはパルス炭酸ガス (CO<sub>2</sub>) レーザーが除去法で唯一残る解であった。同位体分離への利用を念頭に進められたパルスCO<sub>2</sub>レーザーからの経験で、高気圧での放電を利用するTEA (transversely-excited atmospheric-pressure) 増幅器では、長時間にわたる安定な動作が困難であることが知られていたため、増幅器としては低気圧のガス媒質をマイクロ波放電で励起する工業用連続発振器が増幅器として転用された。これと並行して、パルスCO<sub>2</sub>レーザーによるEUV放射実験が行われたが、ここで予測されていなかった好結果が得られた。同じ実験条件では、波長1 $\mu\text{m}$ のNd:YAGレーザーに比べて数倍高い変換効率がCO<sub>2</sub>レーザーで得られた[12-15]。詳細な実験的かつ理論的研究が進められたが、波長に応じてEUV発光領域の密度が異なることが明らかになった。短波長レーザーの場合、発生したEUV光がプラズマから出る前に大半が再吸収されてしまうことであると結論されている。図4にはこれを示唆するレーザー波長に応じたEUV発光スペクトルを示す。

錫ドロップレットのサイズは10 $\mu\text{m}$ であるので、同じ程度の波長のCO<sub>2</sub>レーザーを直接照射しても照射効率は低い。レーザーの吸収も低いままで、結果としてのCEも上がらない。この問題の解決には様々な手法が提案されたが、現在ではピコ秒固体レーザーによるプリパルスで液

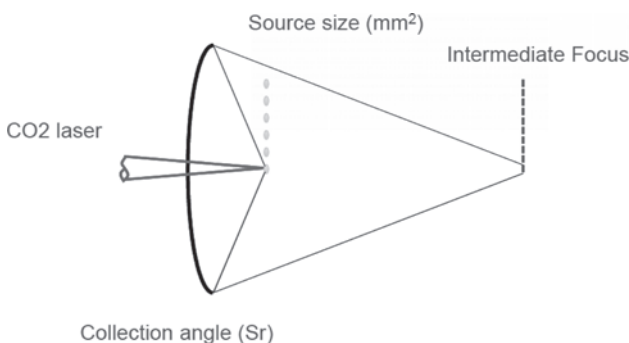


図3 EUV光源における光源、捕集鏡、中間集光点に典型的な配置。

滴中に衝撃波を伝搬させて急速にクラスターに分散させる方式が採用されている。この結果として主パルスのナノ秒CO<sub>2</sub>レーザーに対する変換効率が5%に近い値まで得られている[16]。このプリパルスとして動作するピコ秒固体レーザーはパルスエネルギーとして5mJ程度が必要なために、既存のレーザー装置のパラメータに収まらず、これに向けて薄ディスクを増幅器とする固体レーザーの研究開発が進められている。

以上の基本構成は数多くの理論的、実験的研究を介して次第に確立されたが、残る課題は装置の安定な長時間稼働に向けた光源の清浄度維持とターゲット物質の完全な回収がある。これには投入された錫ドロップレットを平均的なクラスターに分散させて、加熱レーザーパルスで完全なイオン化を行い、外部磁場によるガイドで回収する方式が実用に向けた研究が進んでいる。実験的には95%以上のイオン化が観測されているうえに、中性錫は電離錫原子と高速の荷電交換を行うので、全体として一体のプラズマとして振る舞う。図5には外部磁場中を伝搬する錫プラズマからの発光を示す。ドロップレットあたりに含まれる錫原子数は10<sup>13</sup>程度あり、これがすべて一価のイオンに電離して伝搬すると、数Aのパルスイオンビームになる。電子サイクロトロン共鳴 (electron cyclotron resonance: ECR) イオン源と比較してより多いイオンが含まれるビームが取り出されるので、ドロップレットから出発するイオン源はこれから有望な方法として期待される。

### 3. 量産用 EUV 光源システムの開発状況

現在は米国のCymer社が実用化を主導して2015年に

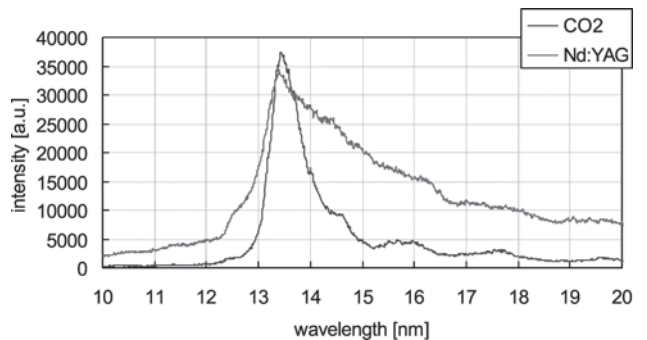


図4 EUVスペクトルのレーザー波長依存性。Nd:YAGレーザーおよびCO<sub>2</sub>レーザーの波長はそれぞれ1.064 $\mu\text{m}$ および10.6 $\mu\text{m}$ 。



図5 静磁場中を伝搬する錫プラズマからの可視光像。

250 W の安定実用出力を実現できる装置の開発が進展している。現在の手法では変換効率、伝送効率などが十分に高くない上に、長時間動作による装置の安定化で予定が大幅に遅れている。実用的には今や平均パワー 1 kW が要求されているため、高効率動作での安定化とレーザーの更なる高出力化は避けることができない。物理的原理を更に極める事で技術面での冗長性を下げる努力が待たれる。ここで述べた原理面については文献[17]を参照されたい。また最近の実用化の動向は日経エレクトロニクスの記事[18]に詳しい。

毎年 2 月にアメリカ合衆国カリフォルニア州サンノゼで SPIE Advanced Lithography という半導体リソグラフィに関する国際会議が行われている。今年、2013 年のこの会議における EUV 光源に関する動向を記しておこう。いくつかの Web ニュースでも公表されているが、量産用光源メーカーの状況について開発状況を紹介しておきたい。ここに書かれている内容は、今回の会議のプロシーディングにまとめられている[19]。

アメリカの Cymer 社製のオランダの ASML 社の露光装置に接続されるレーザー生成プラズマ光源について述べる。EUV 光源出力は連続運転ではないものの、デューティ比 92% (動作時間 2 s, 非動作時間 0.17 s) で駆動しており、バースト出力で 40 W で 1 時間連続動作を行っている。この間、ドーズ安定性は  $\pm 0.2\%$  であり、安定している[20]。また、Cymer 社はこの会議の最終日にデューティ比 92% で 55 W の出力を得たことも報告している。今後、バースト出力を向上することをロードマップで示した[21]。特筆すべきは光源に最も近い EUV 光の捕集鏡の寿命について言及があったことである。この捕集鏡は Mo/Si 多層膜鏡であり、直径 600 mm 以上で捕集立体角は  $\pi$  sr の非常に大きなものであるため、高価でもある。この寿命を延ばすことは必須であった。光源プラズマから放出されるデブリと呼ばれる高速イオンや中性粒子から成る高エネルギーの粒子が捕集鏡に当たって損傷がないようにしなければならず、デブリ対策が必要であった。このため、Cymer 社はガスを真空容器中に充填し、デブリ対策を施している。また、EUV 多層膜鏡にはキャッピングレイヤを施し、長寿命化を図っている[22]。その結果、その寿命は 8 ヶ月 (パルス数 750 億パルス) に延びてきている。

同じくレーザー生成プラズマ方式で、高い変換効率を実現しているのがギガフォトン社である。放射特性や要素技術については次節で述べるが、ここでは、同じく会議で報告したことを紹介する。Cymer 社は我が国のギガフォトン社と同じようなプリパルスを用いる二重パルス照射法を用いているが、Cymer 社の光源で使われているプリパルスレーザーは加熱レーザーと同じ CO<sub>2</sub> レーザーである。一方、ギガフォトン社では、固体レーザー (波長 1  $\mu$ m) のプリパルスを用いている。2 Hz の低繰り返しでの照射実験において、これまで、パルス幅が 10 ns のプリパルスを用いてきたが、最近、パルス幅が 10 ps のプリパルスを用いることにより、変換効率が 50% 向上し、最大で 4.7% にまで上昇している。また、“Proto-2” と呼ばれる EUV 光源を開発して

おり、ドロップレットターゲット発生器および CO<sub>2</sub> レーザーの改善により、10 分以上のバースト動作 (バースト時間 190 ms, デューティ比 16%) において、中間集光点におけるクリーン平均出力 8 W (繰り返し周波数 100 kHz) を実現している[16]。

一方、放電生成プラズマ方式も開発が進んでいる。ウシオ電機の 100% の子会社である XTREME technologies 社もレーザーアシスト放電生成プラズマ (Laser-assisted Discharge Plasma (LDP)) について報告している。このコンセプトは、XTREME technologies 社の Web サイトにも紹介されている[23]。回転電極を高温の錫溶融槽を通すことで電極表面には錫の層が付着する。この電極間には放電用パルス電源が接続されており、レーザーパルスを片方の電極に入射し、錫を蒸散させるだけでなく、放電路も形成することにより、位置安定性に優れ、大きくなりがちな光源サイズの抑制にも成功している。今回の報告では、デューティ比を従来の 12% から 80% (動作時間 0.8 s, 非動作時間 0.2 s) に向上させて、出力 51 W を繰り返し周波数 17 kHz で実現している。

ここまで、量産用 EUV 光源システムの開発状況について概観したが、帯域幅が 2% しかない波長 13.5 nm の放射平均出力がここまで進展していることに驚かれる読者もいらっしゃると思う。光源出力は約 50 W にまで向上してきているが、出力 250 W、更には 1 kW なる出力が求められていることもあり、更なる研究開発を必要としている状況にある。この他にもマスク欠陥用の顕微鏡としての高輝度 EUV 光源の研究開発も進みつつある[24, 25]。

#### 4. 我が国におけるレーザー生成プラズマ EUV 光源の開発の進展

半導体露光用光源が開発される前、解決しなければならない要素技術の項目は非常に多いが、本解説では本学会の読者であることを鑑みて、プラズマ研究の立場でみると、

- レーザー出力の向上
- 錫ドロップレットターゲットの安定高速供給
- 変換効率の向上
- デブリの抑制およびデブリ対策による捕集鏡の長寿命化

などの課題があり、これらは今も技術開発の面で多くの基礎実験や数値解析の結果が反映されている。一方で、多くの技術者の努力で、性能向上が図られており、高変換効率と安定動作を確認しているところである。

##### 4.1 量産用 EUV 光源の開発の進展

前節ですでに光源のコンセプトについては述べたところであるが、ギガフォトン社では高平均出力化を実現するために、100 kHz で高繰り返し動作させられる CO<sub>2</sub> レーザーとプリパルスレーザーを開発した。また、このレーザー光に同期できる錫ドロップレットターゲットも開発している。まず、CO<sub>2</sub> レーザーの進展について紹介する。これには独自の産業用の連続発振レーザーヘッドを増幅器として用いる MOPA (master oscillator power amplifier) システ

ムを採用している。発振器で繰り返し周波数 100 kHz、パルス幅 15 ns のパルス光を発生する。このパルス光を複数段の CO<sub>2</sub> レーザー増幅器で増幅することにより、“Proto-2”EUV 光源の CO<sub>2</sub> レーザーとして、約 9 kW の出力を得ている。

ターゲットには、ドロップレットターゲット方式を採用している。まず、錫を融点 (231.9℃) 以上に加熱し、液化する。これを吐出することによって、ドロップレットターゲットをプラズマ生成位置に供給している。安定にドロップレットターゲットを供給するために、多くの技術改善を行ってきた。ドロップレットターゲットを生成する方式を 図 6 に示す。従来は液体タンクに 10 MPa 以上の気圧をかけて、液体ジェットを連続で吐出していた。この連続ジェットターゲットに振動子により振動を与えることによって、液滴化していた (図 6 左図)。最近、オンデマンド方式 (図 6 右図) に変更した。この場合も同じく加熱・液化した後、電極により静電場を印加し、静電気を帯びた液滴を電場で偏向することにより、位置安定性を確保した。

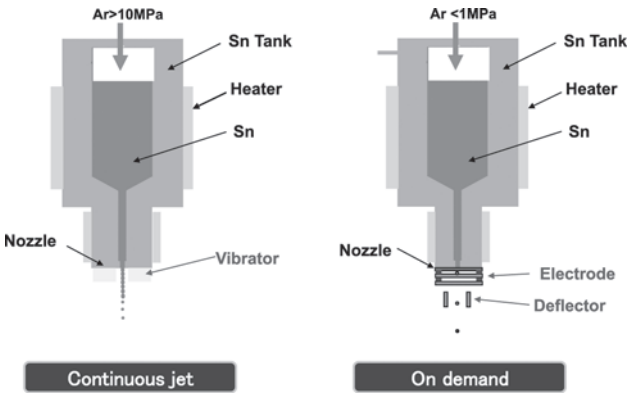


図 6 錫ドロップレットターゲットを生成する方式。

この方法では、液滴を吐出する圧力も 1 MPa 以下に抑えることができている。その結果、図 7 に示すような 69.8 時間も位置安定性に優れたドロップレットターゲットを生成できている。

これらの改善を基に、EUV放射試験をバーストモードで実施した。図 8 はバースト時間 190 ms、デューティー比 16% で動作させたときの EUV 放射エネルギーの測定例である。繰り返し周波数は 100 kHz であるため、バースト時間内のパルス数は 19000 である。平均 EUV エネルギーは 0.4 mJ であった。データを詳しくみてみると、EUV エネルギーはバーストの初期段階で大きく、その最大エネルギーは 0.94 mJ であった。パルス数が 1 ~ 1500 (デューティー比 1.5%) における平均出力は 10.2 W、パルス数が 1 ~ 19000 (デューティー比 16%) における平均出力は 8 W であった。

4.2 研究開発用 EUV 光源での基礎実験

ギガフォトン社では、量産用 EUV 光源を実現するために、要素技術を開発するための低繰り返し EUV 光源を用意している。これまで述べてきたように、錫ドロップレットターゲットの直径は 20 μm しかない。一方、加熱レーザーの CO<sub>2</sub> レーザーの波長が長いので、レーザーの集光径

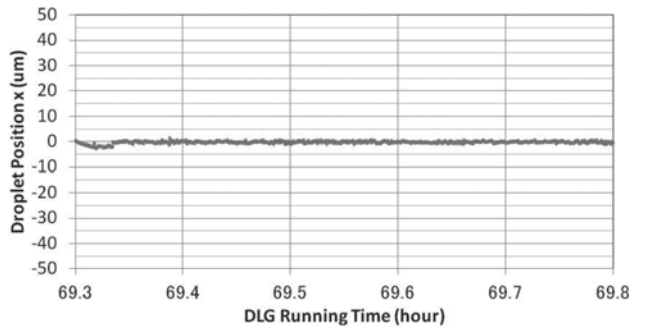


図 7 錫ドロップレットターゲットの位置安定性の動作試験結果。

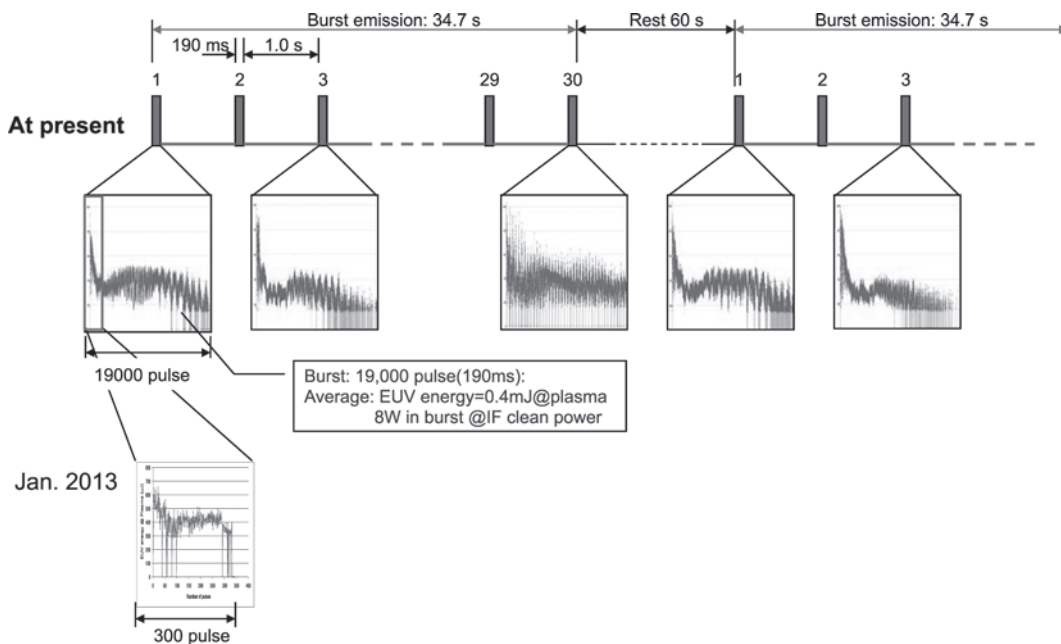


図 8 バーストモードでの EUV エネルギー測定結果。

(典型的には約 100  $\mu\text{m}$ ) はドロップレットターゲットの直径よりも大きく、ターゲットの密度も高いため、加熱レーザーをドロップレットターゲットにそのまま照射すると、吸収効率は非常に悪い。錫ドロップレットターゲットにプリパルスレーザーを照射し、ターゲットサイズを拡大化かつ低密度化することにより、加熱レーザーとしてのCO<sub>2</sub>レーザーを集光照射してきた。

プリパルスレーザーには固体レーザー(波長 1.064  $\mu\text{m}$ ) が用いられており、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、図9に示すように、錫液滴を細かく分散させることができる。影絵を観察してみると、円盤状になって、レーザー照射点から後方にずれていることがわかる。適切な遅延時間を設けて、加熱CO<sub>2</sub>レーザーを集光照射すると、影絵を見る限りにおいては、液滴ターゲットはほぼ蒸散し、プラズマ化されている。このときの交換効率は約3%であった[26]。

完全に蒸散した錫は高速イオンまたは中性粒子になっているものと予想される。そこで、レーザー誘起蛍光法(laser-induced fluorescence: LIF)により錫原子の分散の状態を観測した。プリパルスレーザーにより分散された錫ターゲットは加熱レーザーを照射する時刻には約5mmに拡大化されており、加熱レーザーを照射した時間では、錫原子はほぼ消散し、錫原子のLIF蛍光信号は観測されなかった。レーザー誘起蛍光法による画像データを詳細に解析すると、93%が電離し、約7%が錫原子として残っていることが観測された[26]。約7%の錫原子が残っているものの、円盤状分散ターゲットを93%電離できていると、電磁場によりデブリとしての高速イオンを捕捉することができるようになる[27]。このことにより、捕集鏡への損傷を回避できるだけでなく、真空容器外にデブリを排出することになる。従来、EUV光源の基礎研究で行われてきた静磁場によるデブリ対策はプラズマの拡散を抑制する方式であった。ギガフォトン社では同じように静磁場を印加しているものの、プラズマから発生する電子を磁力線でガイドし、イオン流を真空容器の外に排出している点で異なっている。ギガフォトン社では、静磁場を印加することにより、捕集鏡方向に高速イオンが向かうことを抑え、約98%の高速イオンを捕集鏡の軸から90°方向にプラズマを回収することができている[26]。

しかしながら、これまでの10 nsのパルス幅のプリパル

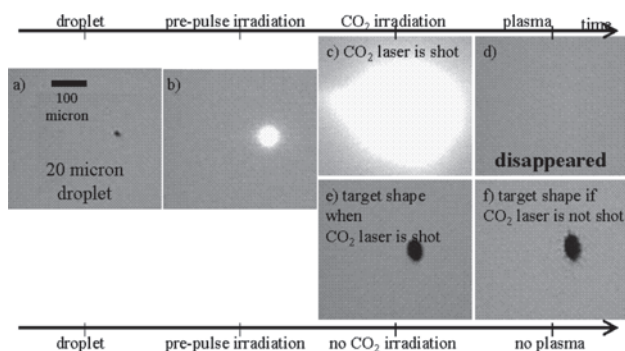


図9 二重パルス照射法により生成された錫ドロップレットの状態。

スレーザーでは、ターゲットが円盤状になり、拡大化はするものの、十分に分散しているわけではなかった。この錫ドロップレットターゲットに10 psのパルス幅をもつプリパルスレーザーを照射することにより、ターゲットの形状を円盤状から、一様分散に変化させることができるようになった。パルス幅が10 psの場合は、ドロップレットターゲットが10 nsレーザーのときよりも短い時間で加熱されるため、球状に広がることになり、かつ、細かく分散していることが明らかになった。このため、分散ターゲットの表面積は大きくなる。

図10は、プリパルスレーザーのパルス幅を変えたときにターゲット形状がどうなるかを観察した写真である。プリパルスレーザーを照射後、1  $\mu\text{s}$  および2  $\mu\text{s}$  後にレーザー入射軸から60°方向および90°方向から観測している。白く光っているのは、プリパルスレーザーにより生成されたプラズマの可視光の再発光であり、この点でプリパルスレーザーがドロップレットターゲットに照射されている。パルス幅が10 nsのときは、円盤状になって、レーザー照射点から後方に飛翔している。一方、パルス幅が10 psのときは、ドーム状に大きく分散しており、かつレーザー照射点から後方にはあまり移動していないことがわかる[16]。

このことを、レーザー照射軸で、ターゲットが飛翔する方向にwitnessプレートを配置して、ターゲットが分散した結果飛翔する錫粒子を電子顕微鏡で観察した。図11は0°方向と15°方向で測定された電子顕微鏡像である。プリパルスレーザーのパルス幅が10 nsのときは、多くの大きな錫粒子が分散しているが、パルス幅が10 psのときは非常に小さく分散していることがわかった。このことから、プリパルスレーザーを10 psに短パルス化することによって、

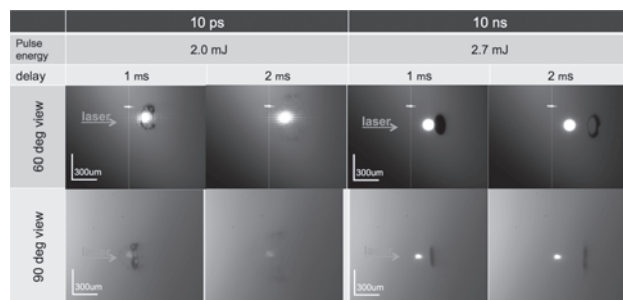


図10 プリパルスレーザーのパルス幅を変えたときにターゲット形状の観察結果。

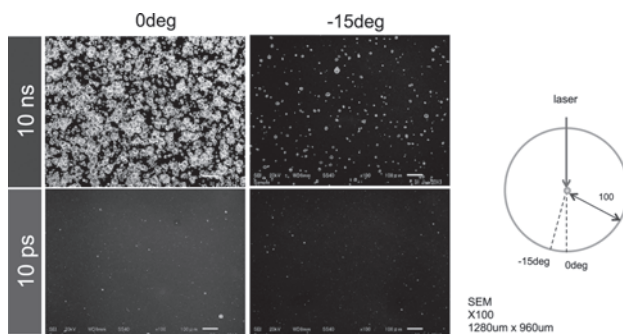


図11 プレートの電子顕微鏡像。

錫ドロップレットターゲットを一様分散化し、効果的にミスト状にすることができることがわかった。

前述したように、錫が細かく砕かれ、表面積が大きくなることにより、加熱 CO<sub>2</sub> レーザーが効率的に吸収される。その結果、変換効率は50%改善され、4.7%の変換効率を実現した。現時点では、世界最高の変換効率を達成している。これまで、この波長領域での変換効率については理論的、数值的、実験的研究から3~4%であると理解されてきたが[28]、CO<sub>2</sub> レーザー生成錫プラズマの基礎的な実験を基に、レーザーやターゲットの条件を改善することにより、更なる高効率化を実現できることが実証されたものと考えている。大阪大学とレーザー技術総合研究所の数値解析によると、プラズマパラメータを最適化することにより約7%まで増加させることができるとの指摘もあり[29]、ギガフォトン社では、更なる最適化試験を行うことにしている。一方、この試験は2 Hzの低繰り返し動作での結果であることから、量産用光源への適用を進めているところである。

## 5. まとめと今後の展望

ここまで、半導体露光用 EUV 光源について解説してきた。ここまで多くの基礎的知見を生かしながら、光源の物理を理解しつつ、技術的な面を大きく改善することによって、世界最高の変換効率を実証すると共に、錫ドロップレットターゲットによる CO<sub>2</sub> レーザー生成プラズマ EUV 光源を市場に投入しようとしているところである。しかしながら、製品レベルの光源はまだ出荷できておらず、今後もレーザーシステムの高出力化やドロップレットターゲットシステムの更なる安定化、デブリ対策など多くの技術改良を進めていく必要がある。

変化の激しいグローバルな最先端技術競争において、勝ち抜くには世界のどこにも負けないスピードで新技術のものにし、かつ質の高い製品を実現することが求められる。その中で共同研究は企業にとって重要な戦略である。すなわち、従来の欧米追従のキャッチアップ時代には企業単独での自前主義での開発は効率、経験の集積、ノウハウの秘匿という点では有効であった。しかしながら、過去の技術経験の集積が役立たない新技術には容易に適応できない。世界的水準の外部の研究グループとのパートナーシップさらには人材の交流、技術開発のスピードアップ、そして技術レベルの向上が、世界で勝ち抜くために必須である。また、技術の模倣を防止するため必須の特許は、共同研究において模索段階であり、相互の意識のズレ、経験の不足等の課題も多い。今後、ビジネスと先端技術共同研究が同時進行する世界競争のなかで、パートナーとなる企業と大学とが真剣勝負を共に戦い、その経験を積み重ねていくことが双方に重要であると考えている。こうした新技術への企業・大学の挑戦を支援する仕組み、公的資金の枠組みの充実が期待される。

## 謝 辞

本解説をまとめるにあたり、ギガフォトン社の児玉、柳田、堀氏らの研究成果を使った。また、EUV 光源の研究の一部には「極端紫外線 (EUV) 露光システムの基盤技術研究開発」(NEDO) からいただいた委託研究、補助金を使っている。ここに記して感謝の意を表したい。

## 参考文献

- [1] 木下博雄 他：第47回応用物理学関係連合講演会予稿集 No.2, 28p-ZF-15, p. 322 (1986).
- [2] 岡崎信次：光学 41, 116 (2012).
- [3] 溝口 計 他：プラズマ・核融合学会誌 79, 219 (2003).
- [4] 西原功修 他：プラズマ・核融合学会誌 81 増刊「レーザー核融合とレーザープラズマ応用の発展」113 (2005).
- [5] 西村博明 他：プラズマ・核融合学会誌 80, 325 (2004).
- [6] 勝木 淳 他：プラズマ・核融合学会誌 81, 231 (2005).
- [7] G. O'Sullivan and P.K. Carroll, J. Opt. Soc. Am. 71, 227 (1981).
- [8] P.K. Carroll and G. O'Sullivan, Phys. Rev. A 25, 275 (1982).
- [9] G. O'Sullivan and R. Faulkner, Opt. Eng. 33, 3978 (1994).
- [10] W. Svendsen and G. O'Sullivan, Phys. Rev. A 50, 3710 (1994).
- [11] S. Fujioka *et al.*, Appl. Phys. Lett. 92, 241502 (2008).
- [12] H. Tanaka *et al.*, Appl. Phys. Lett. 87, 041503 (2005).
- [13] Y. Ueno *et al.*, Appl. Phys. Lett. 91, 231501 (2007).
- [14] Y. Tao *et al.*, Appl. Phys. Lett. 92, 251501 (2008).
- [15] S.S. Harilal *et al.*, Appl. Phys. Lett. 96, 111503 (2010).
- [16] H. Mizoguchi *et al.*, Proc. SPIE 8679, 86790A (2013).
- [17] A. Endo, "CO<sub>2</sub> laser produced Tin plasma light source as the solution for EUV lithography," Chap. 9 "Lithography," Ed. M. Wang, Feb. 2012, InTech online publishing.
- [18] 日経エレクトロニクス 2012年11月26日号：解説2 「半導体のコストダウンは止まるのか？-動き出す450 mm ウエハーと瀬戸際の EUV 露光-」.
- [19] P.P. Naulleau (Ed), "Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography IV," Proc. SPIE 8679 (2013). (ISBN: 9780819494610)
- [20] R. Peeters *et al.*, Proc. SPIE 8679, 86791F (2013).
- [21] D.C. Brandt *et al.*, Proc. SPIE 8679, 86791G (2013).
- [22] T. Feigl *et al.*, Proc. SPIE 8679, 86790C (2013).
- [23] <http://www.xtremetec.com/>
- [24] <http://adlyte.com/>
- [25] <http://www.energetiq.com/>
- [26] 藤本准一、溝口 計：光学 41, 125 (2012); and references therein.
- [27] Y. Ueno *et al.*, Appl. Phys. Lett. 92, 211503 (2008).
- [28] T. Tomie, J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS. 11, 021109 (2012).
- [29] K. Nishihara *et al.*, Phys. Plasmas 15, 056708 (2008).



ひがしぐち たけし  
東口 武史

宇都宮大学大学院工学研究科学際先端システム学専攻 准教授。高原子番号元素による極端紫外光～軟X線光源について研究しています。つい先日、久しぶりに昔やっていた書道をやってみました。筆で字を書くことがずいぶんと少なくなってきた、腕が動かなくなっていることを実感しました。そろそろ、また練習でもしようかと思っています。(思っているだけです……)



みぞぐち はかる  
溝口 計

現在、(株)ギガフォトン、代表取締役副社長(兼)CTO。日本レーザー学会、日本応用物理学会、SPIE、LIA 会員。1982年九州大学総合理工学研究科修了。同年(株)小松製作所入社。1987年まで工業用大出力炭酸ガスレーザーの研究開発に従事。1987年8月～1989年12月西ドイツ、マックスプランク生物物理化学研究所の客員研究員(社費留学生)としてX線レーザー励起用大出力KrFエキシマレーザーの開発に従事。1994年工学博士(1994年九州大学工学部)。1990年以来、リソグラフィ用KrF、ArF、F2レーザー、LPP-EUV光源、ハイブリッド・エキシマレーザーの研究開発に従事。現在に至る。2002年レーザー学会論文賞(解説部門)受賞。2009年第1回日本レーザー学会産業賞(装置部門)受賞(ギガフォトン社:GT62A対象)。



えん どう あきら  
遠藤 彰

高出力レーザーと短波長光源に関する様々な研究を行っている。これまで、フェムト秒テクノロジー研究機構(FST)にてレーザーコンプトン散乱によるフェムト秒X線発生(1996-2002)、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EUV光源開発(2002-2008)に携わってきた。その後、ドイツ連邦共和国イェナ市にあるIOF Jenaにて客員教授、現在はチェコ共和国プラハ市にあるチェコ科学アカデミー物理部門HiLaseプロジェクトにて薄ディスクレーザーや先進EUV光源に関する研究に従事している。