

はじめに：レーザー生成プラズマ EUV 光源の最近の動向

宇都宮大学大学院工学研究科 東口 武史*

Lithography tools are being developed to semiconductor manufacturers for high volume manufacturing (HVM) using extreme ultraviolet (EUV) lithography at 13.5 nm, which is based on the availability of Mo/Si multilayer mirrors with a reflectivity of 65 %–70 %. The optimum sources have been identified as laser-produced plasmas of tin (Sn), as $n = 4 - n = 4$ ($\Delta n = 0$) transitions in their ions emit strongly closing this wavelength, where n is the principal quantum number. The energy conversion efficiency, which is defined by the ratio between input laser energy to in-band EUV emission energy at 13.5 nm with a bandwidth of 2 % in a solid angle of 2π sr, is achieved to be 4.7 %. The average EUV power was also operated to be 132 W during the operating time of 119 hours, corresponding to the number of pulse of 17.8 billion pulses.

Keywords: extreme ultraviolet (EUV), laser-produced plasma (LPP), Sn, droplet, CO₂ laser

1 はじめに

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トン・ムーアは、半導体チップの回路の複雑さはトランジスタの個数に依存し、18 ヶ月ごとに 2 倍になるムーアの法則を提唱し、今もそのトレンドで推移している¹⁾。半導体集積回路を製造するときの先工程の一つがリソグラフィであり、回路線幅の細線化を担う重要な要素技術である。解像度はレイリーの法則に従うことから、リソグラ

フィー工程で用いられる光の短波長化が進んでいる。この原稿を書いている現在でも波長が 193 nm の ArF エキシマレーザーに液浸法を組み合わせた複数回露光技術により、回路パターンがシリコンウエハ上に描画されている。しかしながら、複数回露光はコストが高くなるため、複数回露光を必要としない短波長光源が切望されている²⁾。それが波長 13.5 nm の極端紫外 (extreme ultraviolet (EUV)) 光源である。

波長が 13.5 nm の EUV 光を半導体集積回路の製造に使う動きは日本で始まった。1980 年代の中頃、木下氏により放射光の一つの波長域である EUV 光で半導体回路の細線化が実証された³⁾。このときの努力についてはコラム記事があるので、そちらを参照されたい⁴⁾。EUV リソグラフィは、現在行われている ArF 液浸技術での回路線幅の細線化技術に取って替わると期待されている。安定かつ高出力の EUV 光源は半導体集積回路に関係する市場から切望されている。本項では、EUV 光源にレーザー生成プラズマ光源が候補になった過程を簡単に紹介し、EUV 光源の現状と動向について述べる。

Mo と Si の複層による多層膜鏡の反射率は EUV 領域で高く、波長が 13.5 nm 近傍で反射率は 65 % から 70 % 程度であることから、EUV 光源は波長を 13.5 nm にあわせる必要がある。光源の候補になるのは放射光、高次高調波、レーザー生成プラズマ、放電生成プラズマである。この中で、比較的光源を小型化にできること、エネルギー変換効率が 1 % 以上であること (高ければ高いほどよい)、クリーンであることを考慮し、早い段階でレーザー生成プラズマと放電生成プラズマに絞られ、研究開発が行われてきた。さまざまな学会誌で EUV 光源の開発の歴史やそのときの状況について紹介されているので、ふせて参照されたい⁵⁻¹⁰⁾。

重元素ターゲットに大きなパルスエネルギーをもつナノ秒レーザーパルスをもつ $I_L = 10^{10}$ W/cm²– 10^{11} W/cm² のパワー密度 (強度) で集光照射すると、高温高密度のプラズマが生成され、プラズマ中には多価イオンが生成される。EUV 光の発光領域の典型的なパラメーターは電子温度が $T_e = 30$ eV–50 eV, 電子密度

Introduction: recent progress of the laser-produced plasma EUV source

Takeshi HIGASHIGUCHI* (Utsunomiya University),

〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2

TEL: 028-689-6087, FAX: 028-689-6009,

E-mail: higashi@cc.utsunomiya-u.ac.jp

が $n_e = 10^{17} \text{ cm}^{-3} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ であり、原子番号が 50 の錫 ($_{50}\text{Sn}$) がターゲットではプラズマ中に 10 個前後の多価イオンが生成される。錫の多価イオンの共鳴線発光は、光子エネルギーが 92 eV 領域、つまり波長 13.5 nm 領域に 1000 本以上集中している。共鳴線一本一本を分光器で波長分解することはできず、特定の波長域（ここでは 13.5 nm）を中心として数 nm の帯域を有する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は UTA (unresolved transition array) とよばれる。主量子数が $n = 4$ の準位内には非常に多くのエネルギー準位があり、束縛-束縛遷移間 (bound-bound) による放射が UTA 構造をつくっている。それぞれの共鳴線は放射強度が大きいので、これが 1000 本近く集まっている UTA スペクトルの放射は本質的に高出力である。重元素の原子番号が大きくなるほど $n = 4 - n = 4$ 遷移間による UTA スペクトルのピーク波長は短波長化することも観測されている。X 線管のモーゼリーの法則に似た依存性であることから、疑似モーゼリーの法則とよばれている^{11,12)}。

半導体リソグラフィでの EUV 光源に要求される平均出力は、2000 年頃に研究開発が開始された時点でもすでに 100 W 以上、その後も高出力化への要求は留まるところを知らず、250 W、500 W と上昇し、今や 1 kW 以上となっている。この出力は通常の実験設備における平均出力とは全く異なる領域にあるため、装置の基本構成を白紙の状態から検討することから始められた¹³⁾。プラズマ光源はレーザー生成プラズマであろうか放電生成プラズマであろうかインコヒーレント光源であり、EUV 光は空間的に拡がるため Mo/Si 多層膜や Ru 膜による捕集鏡により EUV 光を集める。この捕集鏡と光学的に結合できるプラズマからの EUV 放射のエネルギー変換効率を 1% と仮定すると、プラズマを生成するレーザー装置や放電電源に求められる平均出力は 10 kW となる。EUV 光源にはこのような高出力の駆動源が必要である。

研究開発が開始されたときは、エネルギー変換効率が高くないレーザー生成プラズマ方式と放電生成プラズマ方式に絞られて並行して進められてきた。捕集鏡が非常に高価であり、捕集鏡も含めた光源システム（これを SoCoMo (Source Collector Module) とよぶ）を長寿命運転させる観点から、清浄度の高い光源でなければならない。しかしながら、金属かつ低融点の Sn を使う限り、プラズマから破片も含む中性粒子や高速イオンからなる飛散粒子（デブリ）の発生は避けられない。そこで、何らかのデブリ対策が必要になる。デブリ対策には、供給する Sn の量を制限する方法と発生

したデブリを回収する方法の 2 つを併用するのが普通である。詳細は割愛するが、現在では量産用光源にはレーザー生成プラズマ方式、マスクの欠陥検査やレジストの評価などの検査用光源には放電生成プラズマ方式が採用されている。

2 量産用レーザー生成プラズマ方式の EUV 光源

プラズマを生成する駆動源としてのパルスレーザーは、開発当初、主発振器出力増幅器 (Master Oscillator Power Amplifier (MOPA)) の 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 1 kW 領域では固体レーザー媒質内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 μm に集光することはできない。そこで、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 10 kW 以上のパルス出力を良好なビーム品質で実現できるパルス炭酸ガス (CO_2) レーザーが採用され、現在の EUV 光源に用いられている。同位体分離への利用を念頭に進められたパルス CO_2 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、増幅器に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_2 レーザーによる EUV 放射実験が行われ、波長が 1 μm の Nd:YAG レーザーに比べて数倍高い変換効率が CO_2 レーザーで得られた¹⁴⁾。詳細な実験的かつ理論的研究が進められ、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¹⁵⁾。短波長レーザーでは、発生した EUV 光が光学的に厚いプラズマから出る前に再吸収されてしまうことにある¹⁶⁾。本稿では紙面の都合から、レーザーシステムの詳細については触れることはできないが、駆動用 CO_2 レーザーの繰り返し周波数は 100 kHz であり、平均出力は約 20 kW である。

EUV 光源のターゲットには、錫液滴ドロップレットが採用されている。連続的に供給できる上、サイズを小さくすることにより供給量を制限することでデブリ対策にもなるからである。高いエネルギー効率を維持できる最低限の供給量から見積られる錫液滴ドロップレットの直径は 10 μm である¹⁷⁾。ドロップレットターゲットを安定に連続的に供給する努力が行われ、研究開発時には大きかった錫液滴ドロップレットの直径は、現在ではほぼ 10 μm になっている。

高い平均出力を実現するためには、入射する CO_2

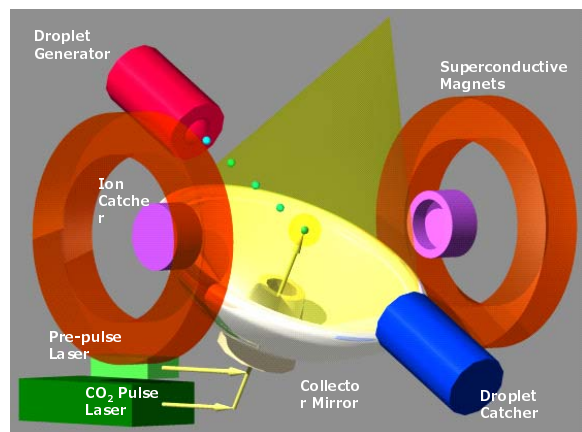


Figure 1. Schematic diagram of the laser-produced tin (Sn) plasma EUV source.

レーザーエネルギーから EUV 光放射エネルギーへのエネルギー変換効率を改善しなければならない。このため、エネルギー変換効率を改善する二重パルス照射法の有効性が示され、原理実証ではエネルギー変換効率が3倍改善することが示された¹⁸⁾。予備パルス（プリパルス）がターゲットに照射されると、プラズマは高温にはならないが、ターゲット表面から真空中に向けて断熱膨張する。適切な遅延時間を設けて主パルス（メインパルス）を照射すると、吸収されるエネルギーが増加する。これは膨張するプリプラズマが緩やかな密度勾配を持つことから、主パルスを吸収する体積が大きくなることで吸収エネルギーが増加し、EUV 光の出力が増加するため、エネルギー変換効率が改善すると理解されている。このことは、キャビティーターゲットにより膨張するプラズマの密度勾配長を長くし、CO₂ レーザーが吸収される領域を拡大することで、実効的な CO₂ レーザーの吸収効率を改善した実験とも矛盾しない。この結果、エネルギー変換効率は4%になることが実証されている^{19,20)}。なお、予備パルスと主パルスのエネルギー比（レーザー強度比）については、ターゲット形状や用いるレーザーパラメータにより変化することから、最適条件はその都度測定しているのが現状である。

ところで、CO₂ レーザーの集光径は約 100 μm であり、直径が 10 μm の錫液滴ドロップレットの約 10 倍も大きい。このため、直径が 10 μm の錫液滴ドロップレットに同じ程度の波長の CO₂ レーザーを直接照射しても照射効率は低く、レーザーの吸収も小さいままでエネルギー変換効率も上がらない。そこで、パルス幅

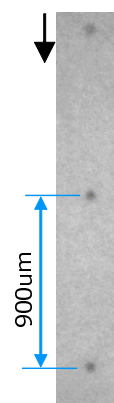


Figure 2. Photograph of tin (Sn)-liquid droplet targets.

が 10 ps の Nd:YAG レーザーによるプリパルスで液滴中に衝撃波を伝搬させ、急速にクラスターに分散させる方式が採用されている。二重パルス照射法は、ターゲットを分散させ拡大することと密度勾配を緩やかにする効果が同時にあるため、主パルスの CO₂ レーザーの吸収効率が改善され、エネルギー変換効率は5%であることが観測されている²¹⁾。

さまざまな実験的かつ理論的な研究を経て概念がある程度落ち着き、現在開発されている量産用 EUV 光源の構成を Fig. 1 に示す。錫液滴ドロップレット発生器から直径が数 10 μm の錫液滴ドロップレットが供給される。Figure 2 は、押し出し圧力が 40 MPa、繰り返し周波数が 100 kHz での液滴ターゲットである。ターゲット間隔をあげるため、ターゲットの供給速度は 90 m/s である。これは、前ショットのプラズマ生成の影響を受けないようにするためである。供給された錫液滴ドロップレットがレーザー照射部に達すると、予備 Nd:YAG レーザーパルスが照射され、ターゲットは分散され、低密度の錫クラウドターゲットに拡大化される。このときのターゲットの大きさは主 CO₂ レーザーパルスの集光径程度になる。適当なサイズのクラウドターゲットになるまでに数 μs の時間を要する。使用されなかった錫液滴ドロップレットは捕集タンクにより回収される。

錫液滴ドロップレットに CO₂ レーザーを集光照射すると、プラズマが生成され、多価イオンが生成される。多価イオンからは波長 13.5 nm 領域の EUV 光だけでなく、高速イオンを中心とするデブリが発生する。EUV 光は Mo/Si 多層膜捕集鏡により中間集光点とよ

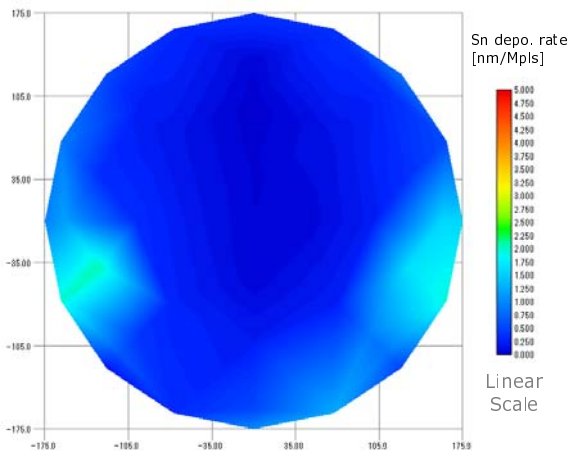


Figure 3. Spatial distribution of the tin (Sn) deposition on the surface of the collector mirror.

ばれる EUV 光源と露光機（ステッパー）との接続部の二次光源部に集光され、露光機と光学的に結合する。このとき、露光機と光学的に結合するため、62°上を向いている。一方、予備パルスによりクラウド化されたターゲットはそのほとんどが電離するため、フラグメントなどの中性粒子デブリは発生しにくい。高速イオンは10個以下のイオンであるため、あらかじめ印加されているミラー磁場により捕捉され、Mo/Si 捕集鏡に対して90°の方向に配置された捕集電極に回収される。

しかしながら、錫クラウドターゲットは完全電離するわけではないため、少量の中性粒子デブリが残る。また、再結合過程や荷電交換過程により、イオンが中性粒子に変化することもある。これらの中性粒子デブリは、ミラー磁場では捕捉できないため、Mo/Si 多層膜捕集鏡を汚染する。Figure 3は付着した錫の膜圧分布である。捕集鏡の端はイオン捕集電極に対応する位置であり、約2nmの錫の膜が付着している。このため、付着物の解析とそれを減らす対策が進められている。

さて、本稿を書いている現在ではその程度の平均出力が実現されているのだろうか。Figure 4はEUV光源の平均出力を示しており、バーストモードで約260Wである。この平均出力は短時間運転での結果であるが、2000年代中頃に露光機メーカーから示されたJoint RequirementにおけるEUV出力に相当しており、高出力化が進んでいる。

EUV光源システムにはさまざまなフィードバックシステムが施されており、錫クラウドターゲットの

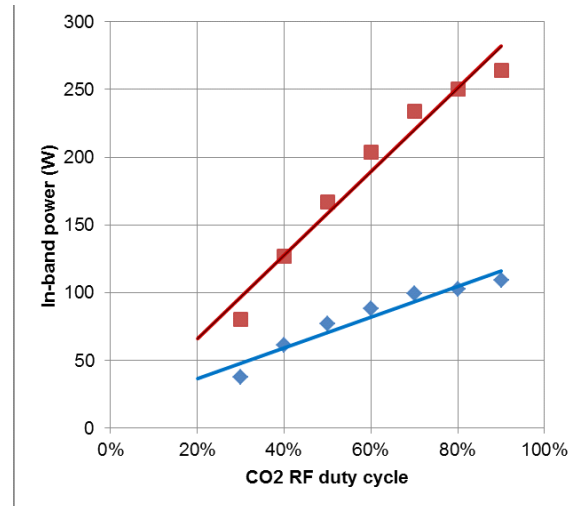


Figure 4. CO₂ RF duty cycle dependence of the EUV conversion efficiency.

シューティングシステムもその一つである。錫液滴ドロップレットの位置およびタイミング監視モニターにより錫液滴ドロップレット発生器の位置を制御し、レーザーパルスが集光照射されるようになっている。さまざまなフィードバック制御により長時間運転されたEUV光源の平均出力をFig. 5に示す。このとき、繰り返し周波数は100kHzであり、運転中にデューティ比を50%から40%に変更している。この結果、EUV光源の平均出力は約160Wから約130Wになっているが、約120時間の長時間運転ができるようになっている。これはレーザー装置、錫液滴ドロップレットの安定供給、デブリ対策がうまく動作しているからである。

3 ポスト EUV 光源をめぐる動き

前節まで量産用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CO₂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。しかしながら、製品レベルの光源はまだ出荷しておらず、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が今も進められている。

ところで、ムーアの法則に従う回路線幅の微細化に

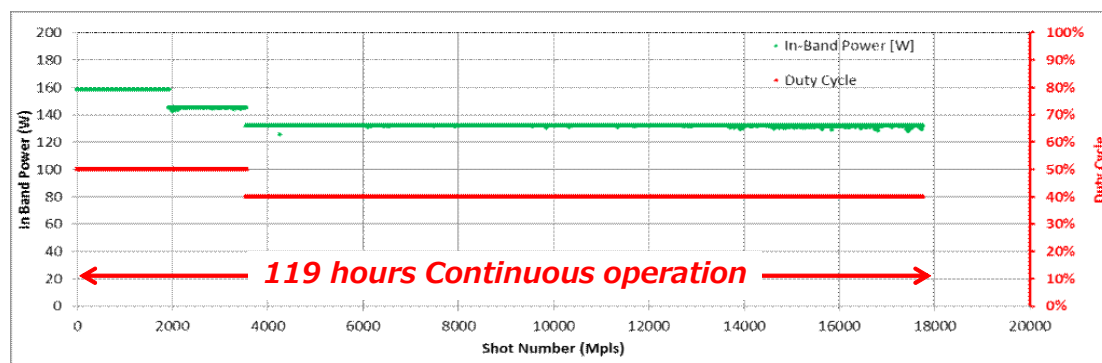


Figure 5. Average EUV power during long continuous operation time of about 120 hours.

向けて、レイリーの式に基づき短波長化に進むのか、または波長 13.5 nm の EUV 光源の更なる高出力化に進むのかなどの議論が始まっている。最後にこのことについて触れる。ポスト EUV 光源として、短波長化する提案は 2009 年から 2010 年頃に露光器メーカーの一つのオランダの ASML からあった²²⁾。高い反射率を有する Mo/Si 多層膜鏡があったことで波長が 13.5 nm に決まったように、B₄C を用いる多層膜鏡は理論反射率が約 70 %、実験でのそれは約 50 % であることから、光源に求められる波長は 6.5 nm–6.7 nm の領域である。これを Beyond EUV (BEUV) 光源という。エネルギー変換効率が高い遷移間 $n = 4 - n = 4$ ($\Delta n = 0$) での UTA スペクトルを Sn EUV 光源と同じように BEUV 光源に適用しようとする、疑似モーザリーの法則により希土類元素の ⁶⁴Gd や ⁶⁵Tb がその候補になる¹²⁾。2010 年頃にスペクトル構造に関する分光実験が筆者等により行われ、比較的エネルギー変換効率が高いことが示された^{23,24)}。その後、さまざまなデータベース実験により Gd や Tb プラズマからの UTA スペクトルのエネルギー変換効率は Sn のそれとほぼ同等であることが観測されている^{25–28)}。実際に、CO₂ レーザーによる実験では、エネルギー変換効率は 0.7 % である²⁹⁾。この数値は、Sn のそれよりもずいぶん小さいが、これには理由がある。波長 13.5 nm の EUV 光源でのエネルギー変換効率を評価するときのスペクトルの帯域幅は 2 % であるが、波長が 6.7 nm の BEUV 光源でのそれは約 3 分の 1 の 0.6 % であり、帯域幅が狭いからである。したがって、帯域幅を同等と仮定したときのエネルギー変換効率はほぼ同等であることから、UTA スペクトル構造の光源は本質的に高いエネルギー変換効率を有している。

しかしながら、本稿を書いている現在では、BEUV

光源がポスト 13.5 nm 光源になるとは考えられていない。それは、BEUV 光源には、EUV 光源よりも約 3 倍高い電子温度が必要であり、レーザーに求められるパワー密度は約 10 倍必要であるため、レーザー開発への負担が大きくなるからである。また、Gd や Tb は高価なレアメタルであると同時に融点も高いため、液滴ドロップレットターゲットを安定に供給することも困難である。多層膜鏡が捕集できるスペクトル領域が狭い上に反射率も 70 % 近くにはなっていない。そもそも波長 13.5 nm の EUV 光源がまだ市場に安定に供給されていない段階では時期尚早である。このような理由から、BEUV 光源の研究開発はその後進展していないのが現状である。

一方、レーザー生成プラズマ方式では安定に 500 W の出力を長時間運転するにはまだ時間がかかるとの予想があり、将来的に 1 kW の出力も必要であるとの要求もあるため、ポストレーザー生成プラズマ EUV 光源の動きもある。それは、超伝導空洞による自由電子レーザーを EUV 光源にするというものである。欧米と日本を中心として検討が進められているが、大型の光源になる上に、非常に大きな開発予算を必要とすることから、現段階では具現化するところには至っていない。また、レーザー生成プラズマ EUV 光源とは放射される EUV 光の性質が異なり、スペックルや高いパワー密度を有することなどの問題に加えて、自由電子レーザーそのものの長時間運転に向けて、加速器も含めた多くの課題が残されている。このことから、自由電子レーザーの建設と露光機との接続には長い開発期間を要するであろう。

4 まとめ

本稿では、EUV 光源の最近の動向について述べた。量産用レーザー生成プラズマ EUV 光源の基本構成とその性能について示すとともに、ポストレーザー生成プラズマ EUV 光源の動向についても述べた。量産用 EUV 光源は、エネルギー変換効率が約 5%、平均出力はバーストモードで約 260 W、デューティー比を 40% から 50% の範囲における約 120 時間の長時間運転で約 130 W から約 160 W の出力が得られている。これはレーザー装置、錫液滴ドロップレットの安定供給、デブリ対策がうまく動作しているからである。今後は、500 W の平均出力を実現するために、CO₂ レーザーの更なる高出力化、錫液滴ドロップレットの更なる安定化、デブリ対策も必要である。また、トムソン散乱によるプラズマパラメータの測定結果や³⁰⁾、積分球による CO₂ レーザーの吸収効率の改善試験の知見³¹⁾、放射流体シミュレーションによるプラズマパラメータの更なる最適解の探索、デブリの挙動のシューティングなどの知見を光源開発にフィードバックし、EUV 光源に最適なプラズマ状態を実現することが必要である。本特集では、これらについて詳しく解説されている。

〈謝 辞〉

本稿をまとめるにあたり、ギガフォトン株式会社の溝口計氏、藤本准一氏、児玉健氏、柳田達哉氏、永井伸治氏、ゲオルグスマン氏等の研究成果を拝借しました。本稿での実験データなどは、「極端紫外線 (EUV) 露光システムの基盤技術研究開発」(NEDO) による委託研究、補助金によるものです。また、BEUV 光源については、科学研究費補助金、キヤノン財団、東電記念財団による援助を受けています。ここに記して感謝の意を表します。

〈参 考 文 献〉

- 1) 岡崎信次, 光学, 41 (2012) 116; and references therein.
- 2) 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-」.
- 3) 木下博雄, 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).
- 4) 岡崎信次, 鈴木章義, 上野巧, はじめての半導体

- リソグラフィ技術, 技術評論社, 2011.
- 5) 溝口計, プラズマ・核融合学会誌, 79 (2003) 219.
- 6) 西原功修, 西村博明, 望月孝晏, 佐々木明, 砂原淳, 蒲田幸平, 村上匡且, プラズマ・核融合学会誌, 81sup (2005) 113.
- 7) G. Tallents, E. Wagenaars, G. Pert, Nat. Photonics 4 (2010) 809.
- 8) 東口武史, 遠藤彰, 溝口計, プラズマ・核融合学会誌, 89 (2013) 341.
- 9) 東口武史, 大塚崇光, 鶴籠照之, 藤岡慎介, 西村博明, 鈴木千尋, 坂上和之, 鷲尾方一, 遠藤彰, プラズマ・核融合学会誌, 89 (2013) 669.
- 10) 東口武史, 藤岡慎介, 砂原淳, 柳田達哉, 溝口計, レーザー研究, 42 (2014) 14.
- 11) T. Higashiguchi, T. Otsuka, N. Yugami, W. Jiang, A. Endo, P. Dunne, B. Li, G. O'Sullivan, SPIE Newsroom, 2011, DOI: 10.1117/2.1201109.003765.
- 12) H. Ohashi, T. Higashiguchi, Y. Suzuki, G. Arai, Y. Otani, T. Yatagai, B. Li, P. Dunne, G. O'Sullivan, W. Jiang, A. Endo, H. A. Sakaue, D. Kato, I. Murakami, N. Tamura, S. Sudo, F. Koike, C. Suzuki, Appl. Phys. Lett., 104 (2014) 234107.
- 13) 遠藤彰, プラズマ・核融合学会誌, 79 (2003) 240.
- 14) H. Tanaka, A. Matsumoto, K. Akinaga, A. Takahashi, T. Okada, Appl. Phys. Lett., 87 (2005) 041503.
- 15) K. Nishihara, A. Sunahara, A. Sasaki, M. Nunami, H. Tanuma, S. Fujioka, Y. Shimada, K. Fujima, H. Furukawa, T. Kato, F. Koike, R. More, M. Murakami, T. Nishikawa, V. Zhakhovskii, K. Gamata, A. Takata, H. Ueda, H. Nishimura, Y. Izawa, N. Miyanaga, K. Mima, Phys. Plasmas 15 (2008) 056708.
- 16) S. Fujioka, H. Nishimura, K. Nishihara, A. Sasaki, A. Sunahara, T. Okuno, N. Ueda, T. Ando, Y. Tao, Y. Shimada, K. Hashimoto, M. Yamaura, K. Shigemori, M. Nakai, K. Nagai, T. Norimatsu, T. Nishikawa, N. Miyanaga, Y. Izawa, K. Mima, Phys. Rev. Lett., 95 (2005) 235004.
- 17) S. Fujioka, M. Shimomura, Y. Shimada, S. Maeda, H. Sakaguchi, Y. Nakai, T. Aota, H. Nishimura, N. Ozaki, A. Sunahara, K. Nishihara, N. Miyanaga, Y. Izawa, K. Mima, Appl. Phys. Lett., 92 (2008) 241502.
- 18) T. Higashiguchi, N. Dojyo, M. Hamada, W. Sasaki, S. Kubodera, Appl. Phys. Lett., 88 (2006) 201503.
- 19) Y. Ueno, G. Soumagne, A. Sumitani, A. Endo, T. Higashiguchi, Appl. Phys. Lett., 91 (2007) 231501.
- 20) Y. Tao, M. S. Tillack, K. L. Sequoia, R. A. Burdt,

- S. Yuspeh, F. Najmabadi, Appl. Phys. Lett. 92 (2008) 251501.
- 21) H. Mizoguchi, T. Yamazaki, T. Saitoh, Proceedings of the 2016 International Workshop on EUVL (EUV Litho Inc., The Center for X-ray Optics (CXRO) at Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 2016).
- 22) J. Benschop, Proceedings of the 2010 International Workshop on EUVL (Maui, HI, 2010).
- 23) T. Otsuka, D. Kilbane, J. White, T. Higashiguchi, N. Yugami, T. Yatagai, W. Jiang, A. Endo, P. Dunne, G. O'Sullivan, Appl. Phys. Lett., 97 (2010) 111503.
- 24) T. Otsuka, D. Kilbane, T. Higashiguchi, N. Yugami, T. Yatagai, W. Jiang, A. Endo, P. Dunne, G. O'Sullivan, Appl. Phys. Lett., 97 (2010) 231503.
- 25) T. Higashiguchi, T. Otsuka, N. Yugami, W. Jiang, A. Endo, B. Li, D. Kilbane, P. Dunne, G. O'Sullivan, Appl. Phys. Lett., 99 (2011) 191502.
- 26) B. Li, P. Dunne, T. Higashiguchi, T. Otsuka, N. Yugami, W. Jiang, A. Endo, G. O'Sullivan, Appl. Phys. Lett., 99 (2011) 231502.
- 27) T. Cummins, T. Otsuka, N. Yugami, W. Jiang, A. Endo, B. Li, C. O'Gorman, P. Dunne, E. Sokell, G. O'Sullivan, T. Higashiguchi, Appl. Phys. Lett., 100 (2012) 061118.
- 28) C. O'Gorman, T. Otsuka, N. Yugami, W. Jiang, A. Endo, B. Li, T. Cummins, P. Dunne, E. Sokell, G. O'Sullivan, T. Higashiguchi, Appl. Phys. Lett., 100 (2012) 141108.
- 29) T. Higashiguchi, B. Li, Y. Suzuki, M. Kawasaki, H. Ohashi, S. Torii, D. Nakamura, A. Takahashi, T. Okada, W. Jiang, T. Miura, A. Endo, P. Dunne, G. O'Sullivan, T. Makimura, Opt. Express, 21 (2013) 31837.
- 30) K. Tomita, K. Nakayama, K. Inoue, A. Sunahara, K. Uchino, Appl. Phys. Express, 6 (2013) 076101.
- 31) H. Matsukuma, A. Sunahara, T. Yanagida, H. Tomuro, K. Kouge, T. Kodama, T. Hosoda, S. Fujioka, H. Nishimura, Appl. Phys. Lett., 107 (2015) 121103.

〈著者略歴〉

東口 武史：2001年3月宇都宮大学大学院工学研究科博士後期課程修了。その間、日本学術振興会特別研究員 (DC2)。2001年宮崎大学工学部電気電子工学科助手。2006年宇都宮大学大学院工学研究科エネルギー環境科学専攻助手。2009年宇都宮大学大学院工学研究部学際先端研究部門教授 (現職)。その間、米国ブルックヘブン国立研究所、英国オックスフォード大学、アイルランド国立大学ダブリン校にて客員研究員。博士 (工学)。専門：レーザー応用、レーザープラズマ、極端紫外光、軟 X 線光源。