

## 技術論文

**半導体製造用短波長光源：エキシマレーザーからLPP - EUV光源への挑戦**  
**Short wavelength light source for semiconductor manufacturing: Challenge from excimer laser to LPP-EUV light source**

溝 口 計  
Hakaru Mizoguchi  
齋 藤 隆 志  
Takashi Saito  
伊 藤 仙 聡  
Noritoshi Itou  
山 崎 卓  
Taku Yamazaki

最近の IT 技術の著しい進展は CPU やメモリーといった半導体の微細化による性能向上に下支えされている。微細化には光リソグラフィ技術が寄与しており、現在は光源として紫外線を発光するエキシマレーザーが用いられている。ギガフoton社では、短波長化・高出力化を進め市場要望に応じており、エキシマレーザーの出荷台数で 2014 年以降世界トップシェアとなっている。しかし、微細化要望は更に進み、より短波長をプラズマ発光で実現できる EUV (Extreme Ultra Violet) 光源の実現が強く要望されている。

ギガフoton社では、2002 年以来、EUV 光源の研究・開発を行い、現在では商品型パイロット機の開発に成功した。独自の技術を導入することで、市場要望に合致する高効率・高出力を達成できた。現在の課題は、半導体工場において安定して長時間稼働を実現するためのエンジニアリング的側面の改善で、数年以内の出荷を目指し開発を進めている。

The remarkable progress of the latest IT technologies are supported by miniaturization of semiconductor devices such as CPUs and memory chips. Optical lithography technology used in semiconductor manufacturing processes has contributed to this miniaturization. Today, excimer laser which emits a beam of ultraviolet light is used as the light source. As a result of making efforts to meet the market's demands for laser with shorter wavelengths and higher outputs, the Gigaphoton company has been holding top share in the global market of excimer laser systems since 2014. However, strong requests for further miniaturization are still growing, and the EUV (Extreme Ultra Violet) light source, which can emit plasma light of a shorter wavelength, is strongly desired for practical use.

Gigaphoton has been researching and developing EUV light source systems since 2002, and succeeded in developing a near-product prototype. By using original technologies, a system having high efficiency and high output that can meet market demands has been attained. The current issue is to establish a production line that can be run stably for prolonged periods of time at the semiconductor factory by improvement of the engineering aspects. The development is under progress, aiming to start delivery in a few years.

*Key Words:* リソグラフィ, エキシマレーザー, EUV, プラズマ, 半導体

## 1. はじめに

ここ十年の日本の半導体製造産業の退潮にも関わらず、世界の半導体需要は今も年率約4%で着実な拡大を遂げている。半導体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工程は180 nm以降 KrF エキシマレーザーが、100 nm 以降では ArF エキシマ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 (Immersion) リソグラフィ技術が使用されている。また 45 nm ノード以降では、現在主力の 32 nm, 22 nm の NAND フラッシュメモリの量産ラインでは、ArF 液浸リソグラフィにダブルパターンニング技術を実現する露光装置が導入され半導体が量産されている。それに続く 16 nm では、かつては 13.5 nm の極端紫外光 (EUV) をつかう EUV リソグラフィが本命とされていたが、光源出力の問題から量産技術の選択からはずされ (2012 年)、現在では ArF 液浸リソグラフィにマルチパターンニングを組み合わせた導入が始まっている。2016 年現在、リソグラフィ用エキシマレーザーの市場規模は、800 億円/年を超え着実に成長を遂げている。

さて液浸露光技術は装置の対物レンズとウエハの間を屈折率の大きな液体を満たし、見かけの波長を短くし解像力を上げ、焦点深度を大きくする。液浸による解像力と焦点深度は、次式で表されレーリー (Rayleigh) の式と呼ばれる。すなわち；

$$\text{Resolution} = k_1 (\lambda/n) / \sin\theta$$

$$\text{DOF} = k_2 \cdot n\lambda / (\sin\theta)^2$$

$k_1, k_2$  : experimental constant factor

$n$  : 屈折率,  $\lambda$  : 波長

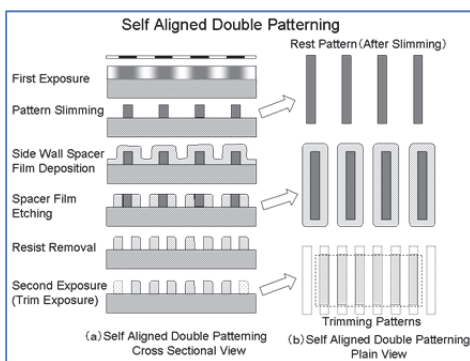


図 1 2 回露光パターン技術の例<sup>1)</sup>

しかしながら、1 回の露光ではこの式中の  $k_1$  値を 0.25 以下に下げる事はできない。そこで 2 回露光技術が注目を集め実際に用いられてきた。図 1 に 2 回露光の基本的な方式の一例を示す。1 回目の露光で形成したパターンの空間周波数を 2 倍にするのはマルチプルパターンニング技術<sup>2)</sup>といわれ、最近では三回露光、四回露光までもが最先端

工程へ導入検討されている。



図 2 量産用 ArF エキシマレーザー-GT64A

現在、量産工場では ArF 液浸露光および多重露光工程に挟帯域 ArF エキシマレーザー<sup>2)</sup>が使用されている。ギガフォトン社では ArF リソグラフィ用光源 “GT シリーズ” を量産している。2004 年に独自のインジェクションロック方式の ArF レーザー-GT40A をギガフォトン社から製品化し、その後 GT60A を 2005 年にリリースして以来、120W 出力の GT64A にまで進化し続けている<sup>3)</sup> (図 2)。“GT シリーズ” は、登場が遅れている EUV を尻目に高い稼働実績 (Availability > 99.6%) がエンドユーザから高く評価されている。2015 年末現在、世界の主要ユーザーで 400 台以上の累積出荷実績を有する。ギガフォトン社はリーマンショック以来の日本の半導体産業の退潮で伸び悩んできたが、最近では省エネ性能の優位性が海外ユーザーにも高く評価され、2014 年度の通年世界シェア 52%、2015 年度 63%を越えた (図 3)。ギガフォトン社は世界一のエキシマレーザー出荷台数の光源メーカーに成長した。一方で最先端市場では多重露光ではプロセスが複雑化し、トランジスタコストの上昇から EUV 露光技術の登場が熱望されている。

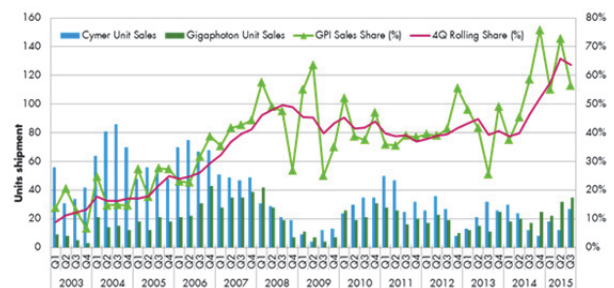


図 3 リソグラフィ用エキシマレーザー世界シェア推移 (Data source: Gigaphoton)

## 2. EUVリソグラフィ

### 2.1 EUVリソグラフィと開発の経緯性

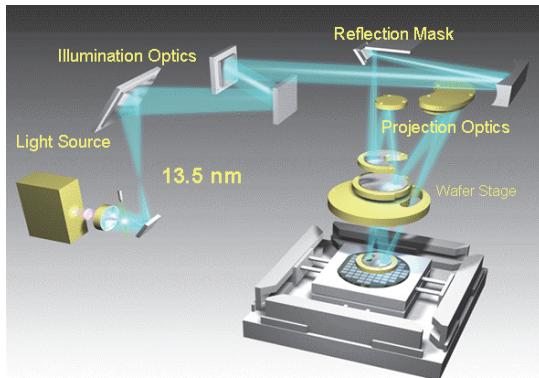


図4 EUVリソグラフィ露光装置の概念図

波長 13.5 nm の EUV 光は反射光学系(反射率 68%程度)による縮小投影を用いたリソグラフィで 1989 年に NTT の木下ら<sup>4)</sup>により提唱された日本発の技術である。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、究極の光リソグラフィのともいわれている(図 4)。ただし 13.5 nm 光は気体によって強く吸収され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。さらにミラー反射率が 68%しかないため、11 枚系のミラーで高 NA の縮小投影を行うと 1.4%しか露光面に届かない。量産では 300 mm ウェハで 100 WPH (Wafer Per Hour) 以上の生産性を実現するには光源は 250 W 以上の出力が必要とされる。

表 1 液浸露光技術の波長、屈折率と解像力

	R(K1=0.4) nm	n	medium	$\lambda/n$ nm	NA	Power
KrF dry	124	1	Air	248	0.8	40
ArF dry	103	1	Air	193	0.75	45
F <sub>2</sub> dry	84	1	N <sub>2</sub>	157	0.75	-
ArF immersion	40	1.44	H <sub>2</sub> O	134	1.35	90
EUV ( $\lambda=13.6$ nm)	18	1	Vacuum	13.6	0.3	>250
EUV ( $\lambda=13.6$ nm)	9	1	Vacuum	13.6	0.6	>500
EUV ( $\lambda=6.7$ nm)	4.5	1	Vacuum	6.7	0.6	>1000

EUV リソグラフィは光源の出力がネックとなり登場が遅れている。しかしその波及効果の大きさから、次の世代の 10 nm ノード以降での本命技術として現在も世界的に大きな研究開発費が投じられている。光源波長、光学系の NA と解像度の関係を(表 1)に示す。現在は NA=0.3 の光学系と 13.5 nm の波長を組み合わせることで 18 nm 程度の解像力が得られる。NA=0.55 以上の次世代投影光学系の開発も進められ、光量ロスが少なく縦横倍率の異な

る Anamorphic optics が提案され開発が進められている。ただし次世代では微細化に伴うレジスト感度低下などのシステム要求から、500 W 以上が必要とされている<sup>5)</sup>。将来は 6.7 nm 近傍の波長の 1000 W 程度の光源と NA=0.6 の光学系との組み合わせが実現できれば 5 nm 以下の解像も可能とされる(表 1)。

### 2.2 世界の露光装置開発と市場の現況

現在世界の EUV リソグラフィの最先端量産用露光装置開発はオランダの ASML 社主導のもとに進んでいる。初期(2000 年頃)には小フィールドの露光装置が各露光装置メーカーで試作されたが、2006 年に ASML 社が開発したフルフィールドの  $\alpha$ -Demo-Tool が現在に繋がる本格的露光装置であった。光源に 10 W 級(設計値)の放電プラズマ光源を搭載し、欧州の IMEC および米国 SEMATECH の Albany 研究所などに納入された<sup>6)</sup>。2009 年からは ASML 社は 100 W 光源(設計値)を搭載した EUV  $\beta$  機 NXE-3100 を開発した<sup>7)</sup>。この装置には XTREME 社製の DPP 光源を搭載した 1 台と Cymer 社製 LPP 光源を搭載した 5 台の計 6 台が出荷された。当初 100 W 光源の搭載を目指し量産の先行機の実現を目指したが、2012 年時点で光源出力は 7~10 W の出力に低迷し EUV リソグラフィ量産性検証のボトルネックとなった。

2013 年 EUV  $\gamma$  機 NXE-3300 では 250 W(設計値)の EUV 光源を搭載し 200 WPH 以上の生産性を目指したが<sup>8)</sup>、光源は当初 10 W レベルの稼働で、ASML からは 2015 年までに 80 W 以上に光源を改良する計画が公表され TSMC 社<sup>9)</sup>、Intel 社<sup>10)</sup>で 2014 年後半に改造が行われ 80 W の模擬運転に成功したと報告された。さらに 2015 年によくフィールドで 80 W レベルの改良とそれによる稼働が複数のユーザー先で実現され、1000 WPD (Wafer Per Day) の達成が報告された。さらに 2016 年現在では露光装置メーカーの実験室で 125 W 運転で 1500 WPD のチャンピオンデータの達成も報告されている<sup>11)</sup>。

他方で光源メーカーはビジネスの遅れで EUV 光源開発費が嵩み、経営が圧迫され厳しい状況にある。EUV  $\beta$  機で先行した Cymer 社は 2013 年 6 月に開発費が嵩み ASML 社に買収された。さらに  $\alpha$ -Demo-Tool で先行していた XTREME 社は 2013 年 5 月にその煽りで解散となった。Gigaphoton 社は 2012 年から単独での本格的な開発を進めているが、未だ開発フェーズで製品化は道半ばである。光源メーカーは文字通り激動の“Death Valley”の中にあると言えよう。

### 3. 高出力EUV光源の開発の経緯とコンセプト

図5にギガフォトンのEUV光源の概念図を示す。現在はこの方式の優れた特性が認められ、世界の高出力EUV光源の主流の方式となった。EUV光を効率よく発生させるには、黒体輻射の原理より約300,000 Kのプラズマを生成する必要がある。このプラズマを生成するため、これまで2つの方式でアプローチがなされてきた。

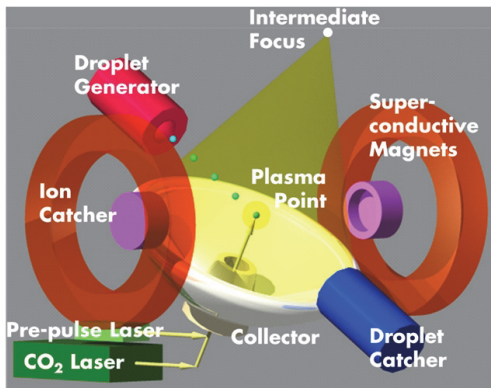


図5 ギガフォトン社EUV光源のコンセプト

すなわち、1つはパルス放電を用いた Discharge Produced Plasma 方式<sup>12)</sup>、もう一つはパルスレーザーをターゲットに照射する Laser Produced Plasma 方式である。世界では1990年台末から米国で EUV LLC<sup>13)</sup>、欧州の Fraunhofer 研究所等の機関で研究が開始された。

我が国では2002年より研究組合極端紫外線露光技術研究開発機構 (EUVA) が組織され EUV リソグラフィの露光装置技術および光源技術の開発がスタートした。筆者らもこれに参画し当初からターゲット物質にパルス CO<sub>2</sub> レーザーを照射し高温プラズマを発生させるスキームをテーマとして追求してきた<sup>14)</sup>。また2003年からスタートした文科省リーディングプロジェクトの九州大学岡田教授の測定結果<sup>15)</sup>をきっかけに、筆者らは2006年から本命になる技術と確信しドライバーレーザーに CO<sub>2</sub> レーザーを用いた LPP 方式の優れた性能を予見するデータを確認して、この方式を開発してきた。CO<sub>2</sub> レーザーシステムには信頼性が確立した産業用の CW-CO<sub>2</sub> レーザーを増幅器として用いた独自の MOPA システムを採用している。すなわち発振段の高繰り返しパルス光 (100 kHz, 15 ns) を、複数の CO<sub>2</sub> 増幅器により増幅している<sup>16)</sup>。ターゲットは Sn を融点に加熱して、20 μm 程度の液体 Sn ドロップレットの生成技術の安定化を行ってきた。EUV 集光ミラーは、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。このプラズマから発生する高速イオンによるミラー表面の多層膜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、その防止・緩和を行っている。

### 4. 最近の高出力EUV光源開発の進展

#### 4.1 変換効率の向上

YAG レーザーと CO<sub>2</sub> レーザーを時間差を置いて Sn ドロップレットに照射するダブルパルス法により生成プラズマのパラメーターを最適化したところ高い変換効率 (>3%) が得られることを柳田らは実験的に見出した<sup>17)</sup>。この結果は西原らのグループの理論計算の結果と変換効率で良く説明できた<sup>18)</sup>。さらに2012年にはプリパルスレーザーのパルス幅の最適化を行い画期的な約50%の効率改善を実現した。すなわち、これまでパルス幅約10 nsのプリパルスを約10 psのパルスに変更して CO<sub>2</sub> レーザーパルスで加熱することで変換効率が3.3%から4.7%に向上した。さらに最近では5.5%の変換効率も実験的に検証された(図6)。これは世界最高記録で画期的なデータである。製品レベルでこの効率を実現できれば、平均出力21 kWパルス CO<sub>2</sub> レーザーで250 WのEUV出力が、40 kWパルス CO<sub>2</sub> レーザーでEUV 500 Wが達成できることになる<sup>19)</sup>。

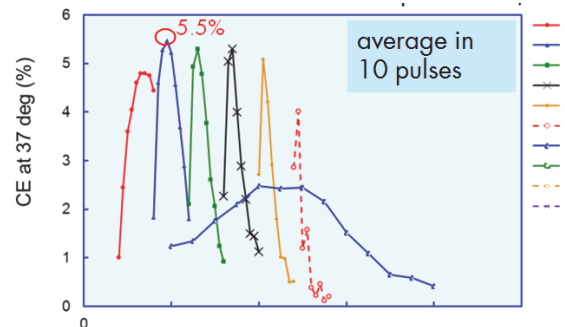


図6 EUV変換効率 (EUV光/CO<sub>2</sub>レーザー)

#### 4.2 高出力CO<sub>2</sub>レーザーの開発<sup>20)21)</sup>

250 WのEUV出力を達成するために2011年度と2012年度NEDOの支援の元で三菱電機(株)との共同プロジェクトを実施し、ギガフォトン製のパルスオシレータと三菱電機製の4段増幅器を組み合わせ100 kHz, 15 nsのパルスで20 kWを超えるCO<sub>2</sub>レーザー増幅器の出力が実証された(図7)。



図7 CO<sub>2</sub>増幅実験装置 (三菱電機(株)提供)

この成果をもとに、この増幅器を実用レベルに仕上げ、2014年に高出力のCO<sub>2</sub>レーザーの増幅実験が行われた。その試験結果によれば、従来10 kWで制限されていた出力が、2倍の20 kWまで改善できている。さらに多波長のCO<sub>2</sub>レーザーの発振線を使った増幅実験で増幅効率が10～15%改善され、Proto#2装置にて23 kWの発生に成功した。現在は、この増幅器を4台直列に並べたシステムがPilot装置のドライバーレーザーとして開発中である（第5項）。

### 4.3 ドロップレットジェネレーター

ターゲットには、ドロップレット（液滴）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。その結果最近では、直径約20 μmのドロップレットターゲットを100 kHzで生成しドロップレットスピードで90 m/sで生成し運転時間で200時間以上、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るようになった。

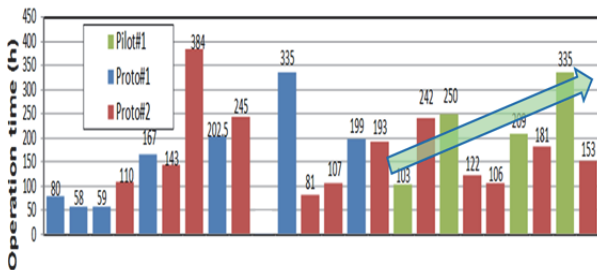


図8 ドロップレット連続生成時間の推移

### 4.4 磁場デブリミチゲーション技術<sup>22)</sup>

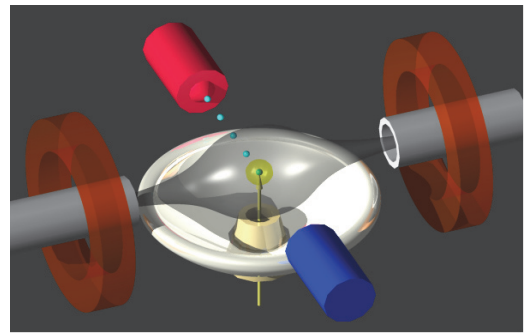


図9 コレクタミラー周辺の構造

錫液滴にプリパルスレーザー光が照射し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（図9）。現在、前節で述べた10 psのプリパルスにCO<sub>2</sub>レーザーを組み合わせるとイオン化率が99%以上に改善できることが計測の結果証明されている。実際の装置試験を行ってみると、集光ミラー表面のイオンキャッチャー付近にはイオンキャッチャーからの逆拡散によるSnのデポジションが観測されている（図10）。

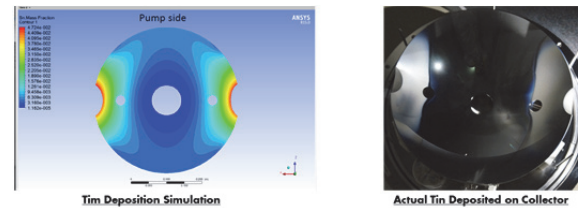


図10 EUVミラー部のSn汚損データ

一方でエッチングガスの流路の制御で集光ミラーでのデブリが桁違いに改善されることがシミュレーションで確認された（図11）。

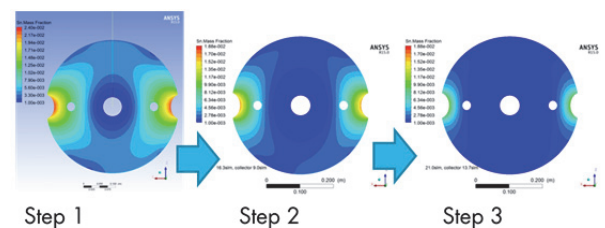


図11 イオン捕集器からの逆拡散の改善

すでに10 Wレベル出力のProto#1号機では、3日間に渡るEUV光照射部へのEUV光の伝送にも成功している。

4.5 EUV光源装置プロト#2による高出力実験<sup>23)24)</sup>

2002年以來、これまでギガフォトン社ではEUV光源の  
実験装置を数々試作し技術の改良を進めてきた、2007年  
にはETS機、2012年にはProto#1号機(図12-1)、2014  
年からはProto#2号機(図12-2)を稼働させてきた。現在  
は、このProto#2号機を使って高出力光源技術の開発を進  
めてきた。2015年からは、高出力実験と並行させて製品  
化を目指したPilot#1号機の開発を進めている(表2)。

表2 ギガフォトン社 EUV 光源試作装置の諸元

Operational Specification Concept		Pilot #1 HVM readiness	Proto #2 Power scaling	Proto #1 Proof of concept
Target Performance	EUV Power	250 W	> 100 W	25 W
	CE	4%	3.5%	3%
	Pulse rate	100 kHz	100 kHz	100 kHz
	Output angle	62°upper (matched to NXE)	62°upper (matched to NXE)	Horizontal
Technology	Availability	> 75%	1 week operation	1 week operation
	Droplet generator	< 20 μm	20 μm	20 - 25 μm
	CO <sub>2</sub> laser	27 kW	20 kW	5 kW
	Pre-pulse laser	picosecond	picosecond	picosecond
	Debris mitigation	> 3 month	10 days	validation of magnetic mitigation in system

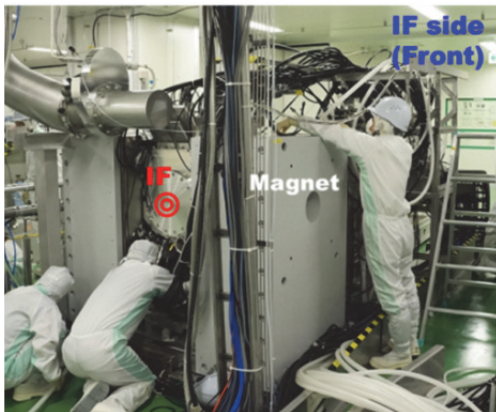


図12-1 EUV光源装置 Proto#1号機

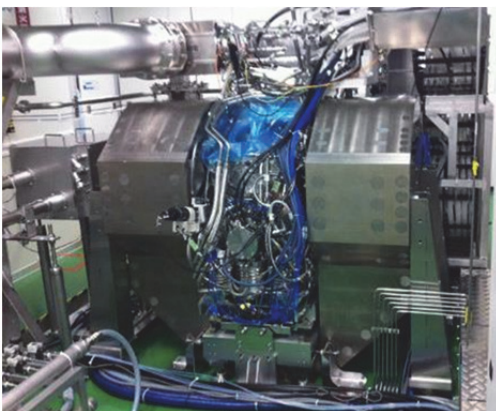


図12-2 EUV光源装置 Proto#2号機

図13に、Proto#2号機の出力の改良の経緯とPilot#1号機  
の性能の現状を示した。2015年以降エンジニアリング  
技術の改良と共に急速に出力データが改善されているこ  
とが見て取れる。

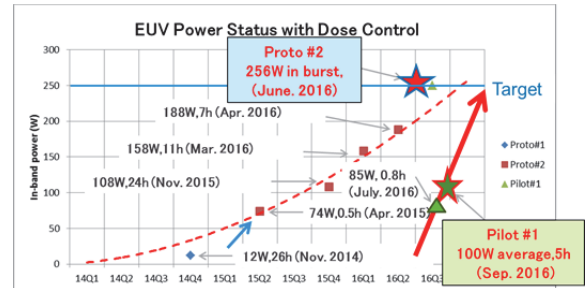


図13 ギガフォトン社 EUV 光源装置の出力データ推移

2016年6月には250Wを超える運転に短時間ではある  
が成功した(図14)。オープンループでは301W (in Burst)  
の出力を発生させ、フィードバックをかけ光量を安定化  
させたクローズループで256Wの運転に成功した。また  
この時点で、高出力運転にもかかわらず変換効率  
CE=4.0%が実現されている。ただしProto#2装置の制約か  
ら運転のDuty Cycleは50%であった。

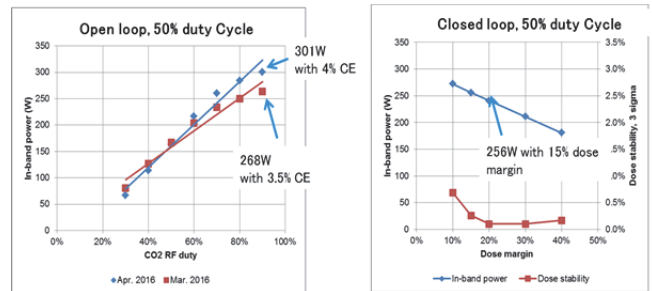
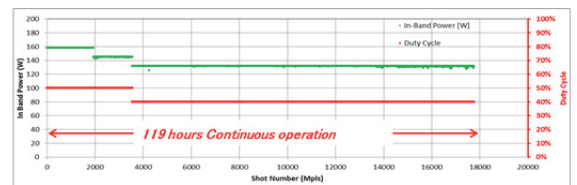


図14 Proto#2号機による250W運転データ

また同じProto#2号機のシステム試験のデータでEUV  
出力158-132W (in Burst)で露光動作を模擬した  
Duty=40-50%での約120時間連続で安定した発光データ  
(3σ<0.5%)が確認されている(図15)。



**Result:**  
In-band power: 158W-132W  
Operation time: 119 h  
Number of Pulse: >17.8 Bpls  
Dose stability 3σ: < 0.19 %

**Condition:**  
Repetition rate: 100kHz  
Duty: 40/50%\*  
Average power: 79W-52W  
With dose control mode  
\* 10 kpls on/0.15 or 0.1s off

図15 Proto#2 EUV光源の長時間運転データ

## 5. EUV光源パイロットシステムの開発<sup>24)</sup>

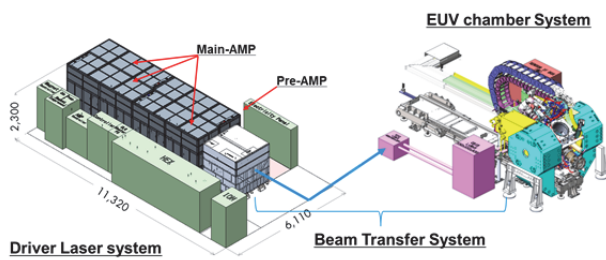


図 16 250WEUV 光源装置 GL200E-Pilot

ギガフォトン社では2017年の12 nm ノード以降の量産工場向け 250 W (@ I/F) の EUV 光源の実現とその量産化を目指し開発を進めている。図 16 に商品型パイロット機 (Gigaphoton GL200E-Pilot) の概観を示す。サブファブと呼ばれる階下スペースにプリパルスレーザー光とメインプラズマ加熱用の CO<sub>2</sub> レーザーが配置され、クリーンルーム階に EUV 発生用のチャンバーが配置されるように設計されている。EUV 発生用チャンバーと露光装置とは光学的に結合されている。この内部で Sn ドロップレットにレーザー光を照射し EUV 光を発生させる。現在ギガフォトン平塚事業所で建設終え、2016 年 9 月からの本格稼働を始めた。以下本装置の概要と最新データを紹介する。

### 5.1 EUVチャンバーシステム

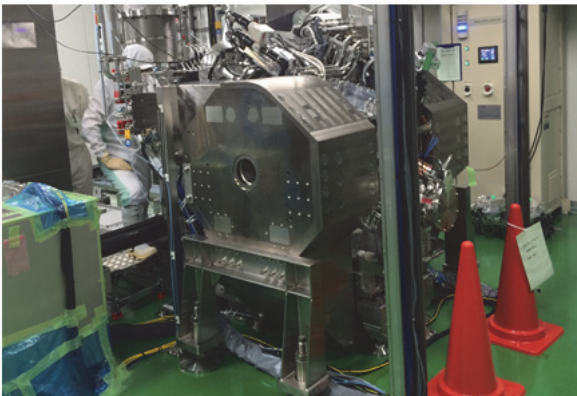


図 17 EUV チャンバーシステム 外観

図 17 に EUV チャンバーシステムの外観を示す。写真から見て取れるように、1 対の超電導磁石の間に EUV を発生させる真空チャンバーが挿入された構造になっている。人間のサイズからそのおおよその大きさが推定できると思う。

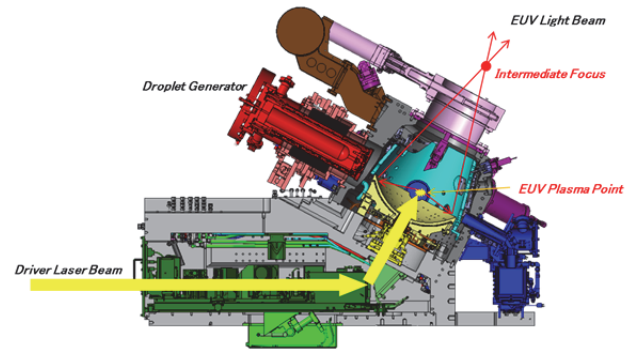


図 18 EUV チャンバーシステム断面構造

図 18 に真空チャンバーの断面図が示されている。図中赤色で塗られている部分が錫のターゲットを供給するドロップレットジェネレーター、青く塗られている部分がドロップレットキャッチャーである。ドロップレットジェネレーターで 100 kHz, 20 μm の錫のドロップレットが生成・供給され、プラズマ化されなかったターゲットがドロップレットキャッチャーで回収される。真ん中の黄色い半球上の構造物が EUV 光を集める集光ミラーで、その中央部に穴が開いておりその穴から集光ミラーの焦点位置に供給されたターゲットをレーザーでプラズマ化し発光させる。プラズマから発せられた光は集光ミラーで集められもう 1 つの焦点である、Intermediate Focus と呼ばれる点に集められる。発生したプラズマは超電導磁石が作る磁場でイオンキャッチャーの方向へガイドされる。この EUV チャンバー全体はレーザービームを集光するユニットの上に配置され、全体はメンテナンス時に引き出せるようにレールの上に載っている。チャンバー全体は高真空状態が保持できる構成になっている。運転時には低圧の水素ガスを流して、イオンキャッチャーで捕集できなかったものをエッチングしてガス化し排気して処理し、内部を清浄に保つように設計した。

5.2 ドライバレーザースystem

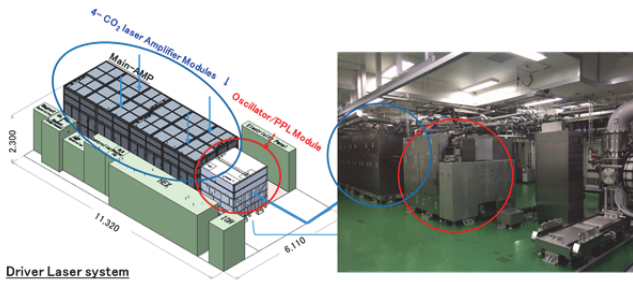


図 19 ドライバレーザースystem (全体外観)

ドライバレーザースystemのパーツ図と外観を図 19 に示した。ドライバレーザースystemはメンテナンススペースも含め約 11 m×6 m×2.3 m<sup>h</sup> と非常に大きい。大半は CO<sub>2</sub> レーザの後段の 4 アンブが大半を占めている。プリパルスと CO<sub>2</sub> のシードパルスを生成する CO<sub>2</sub>-OSC 部は 1.7 m×1.7 m×2 m にまとめられている。また CO<sub>2</sub> レーザ増幅システム全体の構成は図 20 に示す。シードパルスは QCL レーザを使って構成し、中段は小型の CO<sub>2</sub> ガスレーザ、後段は産業用として確立した板金加工用の CO<sub>2</sub> レーザを用い信頼性を高めている。

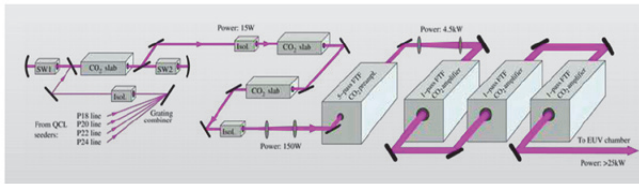


図 20 ドライバレーザースystem (CO<sub>2</sub> レーザ)<sup>25)</sup>

後段の CO<sub>2</sub> レーザは 4 項でも説明した、三菱電機で本应用到に特化して開発された増幅ユニット 4 台を使って構成されている<sup>26)</sup>。図 21 に外観図を示す。写真の人間の大きさと比べてその大きさが想像できると思う。



図 21 CO<sub>2</sub> レーザ最終増幅器部 外観

5.3 ターゲットシューティングシステム

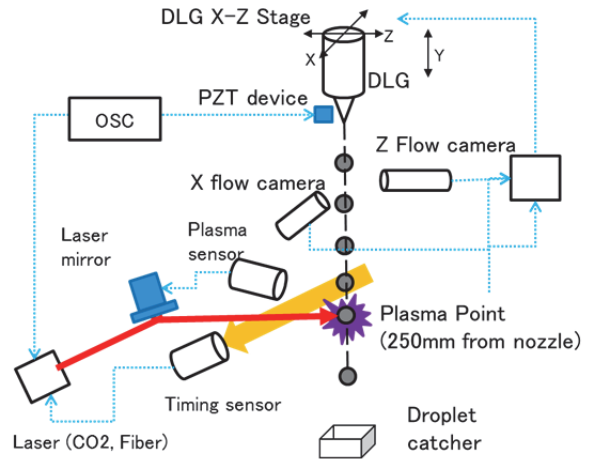


図 22 シューティングシステム構成

図 22 にドロプレットターゲットにレーザースystemを照射してプラズマを生成するためのシューティングシステムの構成を示す。ドロプレットジェネレータは真空中で X-Z ステージにマウントされ、生成されたドロプレットの軌跡は X, Z のフローカメラで計測され、仮想的なプラズマ点で常に同じ点にターゲットが通るようにステージが制御されている。またタイミングを正確に制御するためにドロプレットの間隔が計測され、それにパルスレーザ光のタイミングとビームの集光位置を同期させて時間的にも空間的にも正確にシューティングを行っている。その制御状況をリアルタイムで監視しながら運転を行っている EUV 光源運転操作部の写真を図 23 に示す。



図 23 EUV 光源運転操作部 外観



5.4 最新の試験結果

これらの Pilot#1 機のハードウェアを使って得た運転データの一部を図 24 に示す。UV 出力 105 W (in Burst) , 平均出力 100 W の約 5 時間連続で Duty=95% の高デューティ運転かつ CE=5% の高効率運転で安定した発光データ (3σ<0.5%) が確認されている (図 24) 。 100 W レベルの高出力運転で CE=5% 運転は世界最高レベルの運転といえよう。

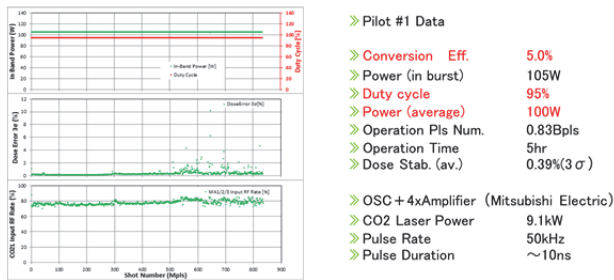


図 24 Pilot#1号機の最新運転データ

また CE=5% 運転を実現するために 2012 年の小型実験装置による実験, 2016 年初めから Proto#2 号機による実験に基づく数々のエンジニアリング上の改良を加えてきた。その経緯を含めて示したのが図 25 である。小型実験装置の実験から 5% 程度の CE が実現できる可能性が示唆されていた。その後高出力装置での実験では最初 3% 程度の CE しか実現できていなかったが, プリパルスレーザーの改良, シューティング制度の改良で Proto#2 号機で 4% が可能になった。さらに Pilot#1 号機ではドライバーレーザーの改良を加えた結果 5% の CE が実現できるようになった。

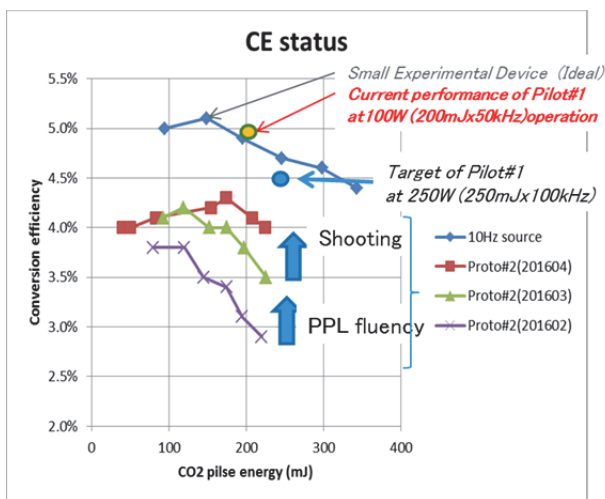


図 25 Pilot#1 号機の変換効率

EUV 光源プラズマの発光メカニズムについてはシミュレーションによる研究の精度を高めるために, プラズマのパラメーター (電子密度, 温度, イオン密度, 温度) を直接計測する試みもなされ, プラズマ内のこれらパラメーターの計測により更なる高効率化の可能性の検討が試みられている。今後の研究の進展を期待したい<sup>27)</sup>。

6. おわりに

これまで述べてきたように, EUV 開発は民間主体の努力で, EUV リソグラフィの半導体量産工場への本格導入は “If” から “When” で議論される時代となった。今後は EUV 光源も, 短時間の輝度性能だけでなく Duty, Availability そしてランニングコストで議論される時代になってきた。本稿で述べてきたデータを時間の推移順に並べた表 3 で EUV 光源装置の現状の到達点のまとめをしたい。

表 3 運転データと開発目標まとめ

	2016 Mar.	2016 Jun.	2016 Aug.	2016 Sep.	2016 Sep.	2016 Dec.
	Proto#2	Proto#2	Proto#2	Proto#2	Pilot#1	Pilot#1 target
Power (av.)	79-52W	128W	62-99W	101W	100W	250W
Duty Cycle	40-50%	50%	50-80%	95%	95%	100%
Power (in Burst)	158-132W	256W	115-124W	106W	105W	250W
Dose Margin	40%	15%	30-35%	30%	30%	30%
Power (open loop)	221-184W	301W	177W	151W	150W	325W
Conv. Eff. (CE)	3.5	4.0%	4.0%	3.8%	5.0%	4.5%
Operation time	119h	-	56h	49h	5h	>1000h
Rep. Rate	100kHz	100kHz	50kHz	50kHz	50kHz	100kHz
CO2 Laser Power	15kW	20kW	13kW	11.9kW	9.1kW	25 kW

一方で将来のさらなる短波長光源への展開が世界の原子分光学の研究者と企業のコラボレーションで行われている。毎年 11 月 Dublin で開催される EUV 光源ワークショップでは, 短波長領域での多層膜の探索が行われ 6.7 nm 領域で高い反射率の多層膜の可能性が欧州の露光装置メーカーから提案された<sup>28)</sup>。さらに Gd, Tb など CO<sub>2</sub> レーザーによる EUV 発光実験で約 2% の高効率発光が実験的に確認され<sup>29)</sup>, さらに高い効率の可能性も示されている。また最近の新しい動きとしては自由電子レーザーを使った kW 級の EUV 光源によるリソグラフィの提案が欧米を中心に検討が始まっている<sup>30)</sup>。

## 7. 参考文献

- 1) 岡崎信次：「先端リソグラフィの技術動向」，クリーンテックテクノロジー，No.3, Vol.19 (2009) 1-6.
- 2) O. Wakabayashi, T. Ariga, T. Kumazaki et.al.: Optical Microlithography XVII, SPIE Vol.5377 (2004) [5377-187]
- 3) Hirotaka Miyamoto, Takahito Kumazaki, Hiroaki Tsushima, Akihiko Kurosu, Takeshi Ohta, Takashi Matsunaga, Hakaru Mizoguchi: “The next-generation ArF excimer laser for multiple-patterning immersion lithography with helium free operation” Optical Microlithography XXIX, Proceedings of SPIE Vol.9780 (2016) [9780-1L]
- 4) H. Kinoshita et al., J.Vac.Sci.Technol.B7, 1648 (1989)
- 5) Winfried Kaiser; “EUV Optics: Achievements and Future Perspectives”, 2015 EUVL Symposium (2015. Oct.5-7, Maastricht, Netherland)
- 6) J. Zimmerman, H. Meiling, H. Meijer, et.al: “ASML EUV Alpha Demo Tool Development and Status” SEMATECH Litho Forum (May 23, 2006)
- 7) J. Stoeldraijer, D. Ockwell, C. Wagner: “EUVL into production - Update on ASML’ s NXE platform” 2009 EUVL Symposium, Prague (2009)
- 8) R. Peeters, S. Lok, et.al.: “ASML’ s NXE platform performance and volume Introduction” Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography IV, Proc. SPIE 8679 (2013) [8679-50]
- 9) Jack J.H. Chen, TSMC: “Progress on enabling EUV lithography for high volume manufacturing” 2015 EUVL Symposium (5-7 October 2 015, Maastricht, Netherlands)
- 10) Mark Phillips, Intel Corporation “EUVL readiness for 7nm” 2015 EUVL Symposium (5-7 October 2015, Maastricht, Netherlands)
- 11) Britt Turkot, Intel Corporation; “EUVL Readiness for High Volume Manufacturing”, 2016 EUVL symposium (24-26, Oct.2016, Hiroshima, Japan)
- 12) U. Stamm et. al.; “High Power EUV sources for lithography”, Presentation of EUVL Source Workshop October 29, 2001 (Matsue, 2001)
- 13) C. Gwyn: “EUV LLC Program Status and Plans”, Presentation of the 1st EUVL Workshop in Tokyo (2001)
- 14) 遠藤彰：「極端紫外リソグラフィ光源の装置化技術開発」レーザー研究 32 卷 12 号 (2004) 757-762
- 15) H. Tanaka, 著者 5 名, et. al.: Appl. Phys. Lett. Vol.87 (2005) 041503
- 16) A. Endo, et al.: Proc. SPIE 6703 (2007), 670309
- 17) T.Yanagida, et al: “Characterization and optimization of tin particle mitigation and EUV conversion efficiency in a laser produced plasma EUV light source” Proc. SPIE 7969, Extreme Ultraviolet Lithography II, (2011)
- 18) K. Nishihara et. al.: Phys. Plasmas 15 (2008) 056708
- 19) H. Mizoguchi, “High CE technology EUV source for HVM” Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography IV, Proc. SPIE 8679 (2013) [8679-9]
- 20) Y. Tanino, J. Nishimae et. al.: “A Driver CO<sub>2</sub> Laser using transverse-flow CO<sub>2</sub> laser amplifiers”, Symposium on EUV lithography (2013.10.6 - 10.10, Toyama, Japan)
- 21) K. M. Nowak, Y. Kawasuji, T. Ohta1 et al.: “EUV driver CO<sub>2</sub> laser system using multi-line nano-second pulse high-stability master oscillator for Gigaphoton’s EUV LPP system”, Symposium on EUV lithography (2013.10.6 - 10.10, Toyama, Japan)
- 22) H. Mizoguchi, et. al.; “High CE Technology EUV Source for HVM” Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography IV, Proc. SPIE8679 (2013) [8679-9]
- 23) Hakaru Mizoguchi, Hiroaki Nakarai, Tamotsu Abe, Krzysztof M. Nowak, Yasufumi Kawasuji, Hiroshi Tanaka, Yukio Watanabe, Tsukasa Hori, Takeshi Kodama, Yutaka Shiraishi, Tatsuya Yanagida, Tsuyoshi Yamada, Taku Yamazaki, Shinji Okazaki, Takashi Saitou: “Performance of new high-power HVM LPP-EUV source” Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography VII, Proc. SPIE9776 (2016)
- 24) H. Mizoguchi “Development of 250W EUV Light Source for HVM Lithography”, 2016 EUVL symposium (24-26, Oct. 2016, Hiroshima, Japan)
- 25) Takashi Suganuma, Hiroaki Hamano, Toshio Yokoduka, Yoshiaki Kurosawa, Krzysztof Nowak, Yasufumi Kawasuji, Hiroaki Nakarai, Takashi Saito, Hakaru Mizoguchi; “High power drive laser development for EUV Lithography”, 2016 EUVL symposium (24-26, Oct. 2016, Hiroshima, Japan)
- 26) Koji Yasui, Naoyuki Nakamura, Jun-ichi Nishimae, Masashi Naruse, Kazuo Sugihara, Masato Matsubara, “Stable and scalable CO<sub>2</sub> laser drivers for high-volume-manufacturing extreme ultraviolet lithography applications” 2016 EUVL symposium (24-26, Oct. 2016, Hiroshima, Japan)
- 27) George Soumagne “Comparison between Thomson scattering Measurements and plasma simulation results for a EUV lithography source plasma” 2016 EUVL symposium (24-26, Oct.2016, Hiroshima, Japan)
- 28) V. Banine et al. “Opportunity to extend EUV lithography to a shorter wavelength”, Symposium on EUV lithography, Brussels, Belgium (2012)
- 29) K. Koshelev: “Experimental study of laser produced gadolinium plasma emitting at 6.7 nm”, International workshop on EUV sources (Nov. 13-15, 2010, Dublin, Ireland)
- 30) Erik Hosler; “Free-electron Laser Extreme Ultraviolet Lithography: Considerations for High-Volume Manufacturing”, 2014 EUVL Symposium (2014. Oct. 27-29, Washington D.C., USA)

## 筆者紹介



Hakaru Mizoguchi  
みぞぐち はかる  
溝口 計

2000年，ギガフォトン入社。  
代表取締役副社長 兼 CTO



Takashi Saito  
さいとう たかし  
斎藤 隆志

2000年，ギガフォトン入社。  
常務執行役員 EUV 開発部長



Noritoshi Itou  
いとう のりとし  
伊藤 仙聡

2000年，ギガフォトン入社  
執行役員 EUV 事業推進部長



Taku Yamazaki  
やまざき たく  
山崎 卓

2000年，ギガフォトン入社。  
EUV開発部 副部長

## 【筆者からひと言】

EUV 光源開発の一部は 2003 年から 2010 年にわたり NEDO「極端紫外線（EUV）露光システムの基盤技術研究開発」の一部として EUVA にてなされ、2009 年以降の高出力 CO<sub>2</sub> レーザーシステムの開発は NEDO「省エネルギー革新技術開発事業」による補助金を受けて平成 21-23 年度および 23-24 年度に、また「NEDO 戦略的省エネルギー技術革新プログラム」において 25-27 年度「高効率 LPP 法 EUV 光源の実証開発」の一部として研究開発を実施している。ここに記し研究を支えていただいている関係機関および関係機関の皆様へ感謝の意を表します。また EUV 光源開発に携わる弊社社員諸氏の昼夜を分かたぬ努力に感謝します。