

技術論文

半導体量産露光用高出力EUV光源の開発状況

Development Status of High Power EUV Light Source Development for Exposure in Semiconductor Mass Production

溝 口 計
Hakaru Mizoguchi
斎 藤 隆 志
Takashi Saitou
山 崎 卓
Taku Yamazaki

ギガフォトンでは 10 nm ノード以降の量産工場向け 250 W (@ I/F) の EUV 光源の量産化を目指し開発を進めている。商品型第 1 世代機の開発状況について報告する。ギガフォトン平塚事業所で建設を終え、2016 年 9 月から稼働を開始した。この Pilot1 号機のシステム試験の最新データでは EUV 出力で 113 W (in Burst) で露光動作を模擬した Duty = 95% での 134 時間連続で安定した発光データ ($3\sigma < 0.5\%$) が確認されている。現在は集光鏡の寿命試験を継続している。

Gigaphoton is progressing with development aiming at mass production of 250 W (@I/F) EUV light sources for mass production plants going beyond the 10 nm node. We like to report the development status of the first generation commercial type unit. The facility was constructed in Gigaphoton Hiratsuka plant, and its operation started from September 2016. The latest data of the system test in the 1st pilot machine has demonstrated that stable emission data ($3\sigma < 0.5\%$) can be obtained under Duty=95% continuously for 134 hours in the exposure operation simulation of 113W (in Burst) of EUV output. Currently we are continuing life tests of the collector mirror.

Key Words: 半導体製造, リソグラフィ, EUV, 極端紫外光, パルス炭酸ガスレーザー

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 65nm 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ちし、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, λ : 波長

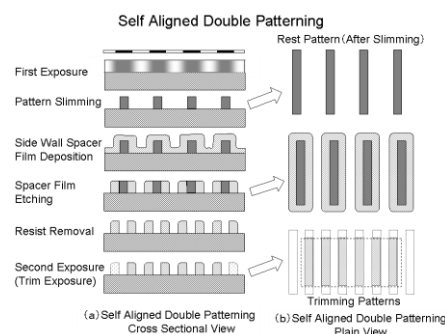


図 1 2 回露光パターン技術の例^[1]

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ング技術^[2]といわれ、最近は三回露光、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^[2]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 (4 kHz, 0.5 pm (E95), 45W) をギガフォトン社から製品化し、その後 GT60A (6 kHz, 0.5 pm (E95), 60 W) 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^[3] (図2)。“GT シリーズ”は、量産工場ですでに大量に使用され、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、反転攻勢に転じた。2014年度の通年世界シェア52%、2015年度63%を越えた (図3)。事実上は世界一のエキシマレーザー出荷台数を誇る光源メーカーに成長した。

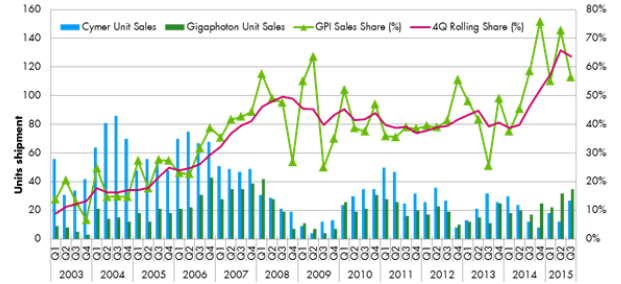


図3 リソグラフィ用エキシマレーザーの世界シェア推移 (Data source: Gigaphoton)

2. EUVリソグラフィ

2.1 EUVリソグラフィと開発の経緯

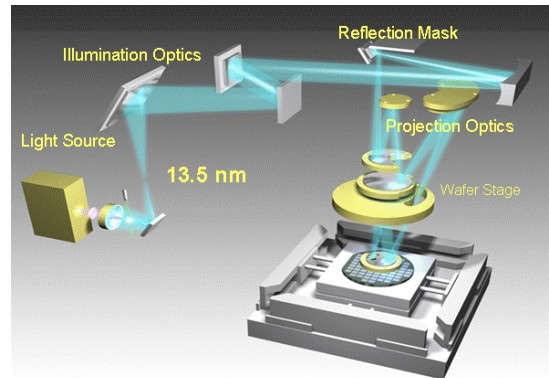


図4 EUV リソグラフィ露光装置の概念図

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^[4]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 ウエハで 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	λ/n nm	NA	Power
KrF dry	124	1	Air	248	0.8	40
ArF dry	103	1	Air	193	0.75	45
F ₂ dry	84	1	N ₂	157	0.75	-
ArF immersion	40	1.44	H ₂ 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 11 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^[5]。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ている (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試作されたが、2006 年に ASML 社が開発したフルフィールドの α -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^[6]。2009 年からは ASML 社は 100 W 光源 (設計値) を搭載した EUV β 機 NXE-3100 を開発した^[7]。この装置には EXTREME 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 γ 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^[9]、光源は当初 10 W レベルの稼働で、2014 年 8 月によりやくフィールドで 40 W レベルの改良が複数のユーザー先で実行され、600 WPD (Wafer Per Day) の達成が報告されている。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^[9]、Intel 社^[10] 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ている。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 β 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 α -Demo-Tool で先行していた EXTREME 社は 2013 年 5 月にその煽りで解散となった。光源メーカーは文字通り激動の “Death Valley” の中にある。

3. 高出力 EUV 光源の開発の経緯とコンセプト

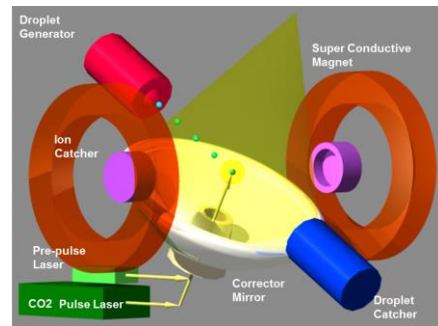


図 5 ギガフォトン社 EUV 光源のコンセプト

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には、これまで 2 つの方式でアプローチがなされてきた。すなわち、1 つはパルス放電を用いた Discharge Produced Plasma 方式^[11]、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^[12]、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 CO₂ 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^[13]。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^[14]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 CO₂ 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。CO₂ レーザーシステムには信頼性が確立した産業用の CW-CO₂ 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 CO₂ 増幅器により増幅している^[15]。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 CO₂ レーザーの時間差を置いて 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^[16]。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^[17]。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 CO₂ 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が実現できれば、平均出力 21 kW パルス CO₂ レーザーで 250 W の EUV 出力が、40 kW パルス CO₂ レーザーで EUV 500 W が達成できることになる^[18]。

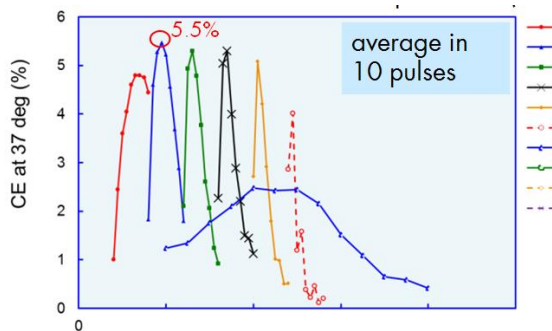


図 6 EUV 変換効率 (EUV 光/CO₂ レーザー)

4.2 高出力CO₂レーザーの開発^[19] [20]

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㈱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 CO₂ レーザー増幅器の出力が実証された (図 7)。この成果をもとに、この増幅器を実用レベ

ルに仕上げて 2014 年春より高出力の EUV プラズマ発生実験がギガフォトン社で始まっている。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。現在は、この増幅器を 4 台直列に並べたシステムが開発中である (5. EUV 光源システムの開発)。



図 7 CO₂ 増幅実験装置 (三菱電機㈱提供)

4.3 磁場デブリミチゲーション^[21]

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 8)。

現在、前節で述べた 10 ps のプリパルスに CO₂ 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。集光ミラー周辺部には磁気ミラーのイオン収集部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 9) が、エッチングガスの流路の制御で EUV 発生試験の集光ミラー位置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 (図 10)、すでに 10 W レベルのプロト 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。

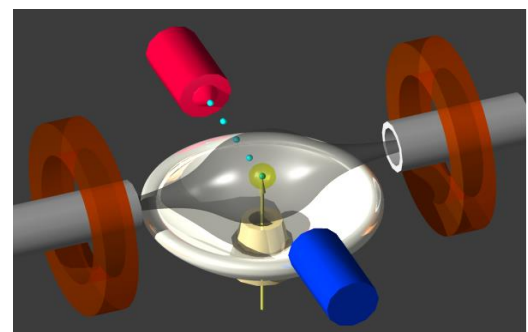


図 8 コレクタミラー周辺の構造

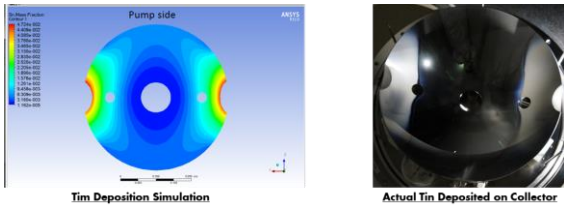


図9 EUVミラー部のSn汚損データ

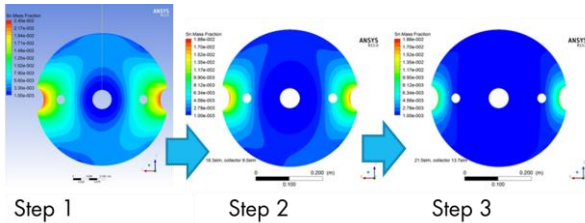


図10 イオン捕集器からの逆拡散の改善

またプロト 2 号機のシステム試験の最新データ (2015 年 11 月) では EUV 出力で 113 W (in Burst) で露光動作を模擬した Duty = 75% での 143 時間連続で安定した発光データ ($3\sigma < 0.5\%$) が確認されている (図 11)。

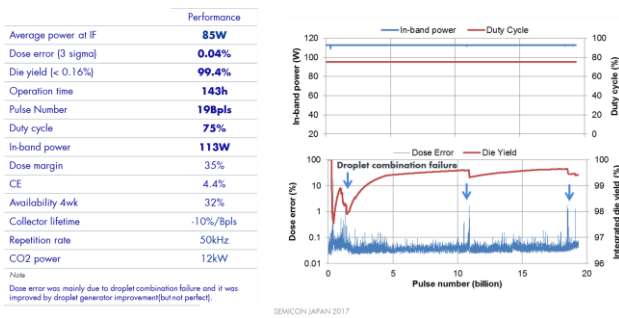


図 11 EUV 光源の最新データ (113W, 143h, Duty < 75%)

5. EUV光源システムの開発^[22]

ギガフォトンでは 2017 年の 12 nm ノード以降の量産工場向け 250 W (@ 1/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 12 に商品型第 1 世代機 (Gigaphoton GL200E) 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 CO₂ レーザーが配置され、クリーンルーム階に EUV 発生用のチャンバが配置されている。EUV 発生用チャンバ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を終え (図 13)、現在は本格的な稼働試験を行っている。

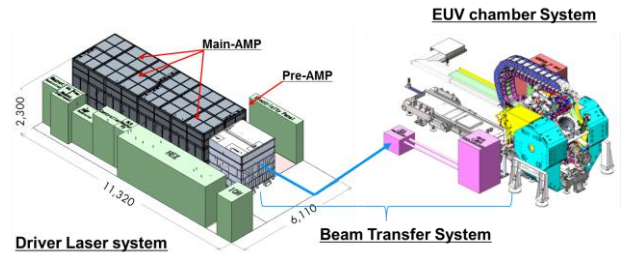


図 12 250W EUV 光源装置 GL200E-Pilot

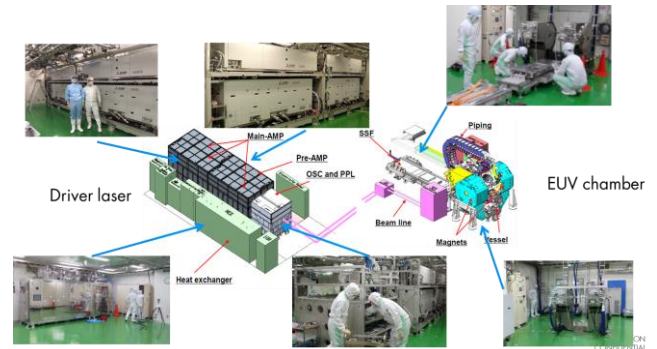


図 13 パイロット装置の建設風景

パイロット装置では現在は、実コレクタミラーを装着して反射率の低下を観測している。100W (in burst) レベルで 1 週間程度の運転で -0.4%/Billion pulse という非常に低い低下率での運転に成功している。今後、さらに運転時間を延長して検証を進める予定である。

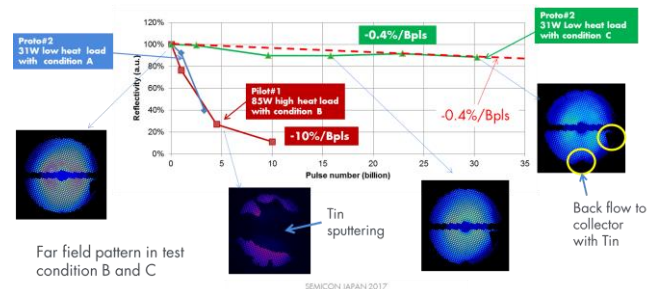


図 14 実機における EUV 集光鏡の反射率の経時変化

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、ようやく商用ベースでの国際競争の時代となっている。今年 2017 年は INTEL, Global Foundry, TSMC, Samsung Electronics といった大手のロジックデバイス製造メーカーの EUV での量産宣言の年となった。2019 年には数十台レベルの EUV 装置が並ぶ半導体量産ラインが現実のものとなろうとしている^[23]。同時に EUV 光源も、短時間の輝度性能だけでなく長時間安定性、部品寿命、Availability がビジネスの勝敗を分ける時代になってきた。

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, Netherlands)
- 【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 2015, Maastricht, Netherlands)
- 【10】 Mark Phillips, Intel Corporation “EUVL readiness for 7nm” 2015 EUVL Symposium (5-7 October 2015, Maastricht, Netherlands)
- 【11】 U. Stamm et. al.; “High Power EUV sources for lithography”, Presentation of EUVL Source Workshop October 29, 2001 (Matsue, 2001)
- 【12】 C. Gwyn: “EUV LLC Program Status and Plans”, Presentation of the 1st EUVL Workshop in Tokyo (2001)
- 【13】 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 巻 12 号 (2004) 757-762
- 【14】 H. Tanaka, 著者 5 名, et. al.: Appl. Phys. Lett. Vol.87 (2005) 041503
- 【15】 A. Endo, et al.: Proc. SPIE 6703 (2007), 670309
- 【16】 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)
- 【17】 K. Nishihara et. al.: Phys. Plasmas 15 (2008) 056708
- 【18】 H. Mizoguchi, “High CE technology EUV source for HVM” Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography IV, Proc. SPIE 8679 (2013) [8679-9]
- 【19】 Y. Tanino, J. Nishimae et. al.: “A Driver CO₂ Laser using transverse-flow CO₂ laser amplifiers”, Symposium on EUV lithography (2013.10.6 - 10.10, Toyama, Japan)
- 【20】 K. M. Nowak, Y. Kawasuji, T. Ohta et al.: “EUV driver CO₂ 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)
- 【21】 H. Mizoguchi, et. al.: “High CE Technology EUV Source for HVM” Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography IV, Proc. SPIE8679 (2013) [8679-9]
- 【22】 Hakaru Mizoguchi, Hiroaki Nakarai, Tamotsu Abe, Krzysztof M. Nowak, Yasufumi Kawasuji, Hiroshi Tanaka, Yukio Watanabe, Tsukasa Hori, Takeshi Kodama, Yutaka Shiraishi, Tatsuya Yanagida, Georg Soumagne, Tsuyoshi Yamada, Taku Yamazaki and Takashi Saitou; “High Power LPP-EUV Source with Long Collector Mirror Lifetime for High Volume Semiconductor Manufacturing” EUVL Symposium, Montlay USA (11-14. September, 2017)
- 【23】 ムーアの法則, EUV で再起動へ
日経エレクトロニクス 2017 年 9 月号

筆者紹介



Hakaru Mizoguchi
みぞぐち はかる
溝口 計

2000年、ギガフォトン創業。
代表取締役副社長 兼 CTO



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



Takashi Saitou
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 工学博士

【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CO₂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年度に実施された。現在は、「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には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開発への努力に感謝します。末尾ながら三菱電機株式会社との共同開発で中心的研究者として活躍され2014年2月に急逝された谷野陽一氏の生前の貢献に深く感謝し冥福をお祈り申し上げます。