

小特集 EUV 露光技術の動向と光源プラズマ研究・制御への要求

2. 半導体量産露光機用ハイパワーEUV光源の現状と今後の展望

2. Today and Future of High Power EUV Source for Semiconductor Mass Production Lithography

溝口 計

MIZOGUCHI Hakaru

九州大学プラズマ・ナノ界面工学研究センター

(原稿受付：2025年4月16日)

EUV光を使った日本発のリソグラフィ技術は、欧米主導で半導体量産工場への導入が進められている。日本では約10年遅れでラピダス社の工場に昨年複数台のEUV量産露光装置が導入され、ようやく本格的EUVリソグラフィ時代が日本にもやってきた。本章では、初めにこれまでの国内外のEUV開発の経緯について解説する。次に、EUV露光装置用光源装置の構造と必要性能について述べた後、今後のEUV光源開発に求められる課題について示す。また、2024年7月EUVを利用するため不可欠な材料開発の支援を目的とした「EUVフォトン社」を九州大学が立ち上げた。これらの活動の最新状況についても報告する。

Keywords:

EUV, plasma, lithography, semiconductor, light source

2.1 半導体製造用EUV露光装置

波長13.5 nmのEUVリソグラフィは反射光学系（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[1]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とも言われている（図1）。

ただし13.5 nm光は気体によっても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。300 mm ウエハで100 WPH（Wafer Per Hour）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。

2.2 日米欧のEUV露光装置開発の経緯

2.2.1 黎明期：1990年代

EUV露光は、日本の木下らの提唱とほぼ同時期に米国のBell研究所でも研究が開始された。1990年代には国立研究所を中心とした各国のコンソーシアムを中心に研究が進められた。すなわち米国で1997年にEUV Limited Liability Company (EUVLLC) と呼ばれる機関が組織され、本格的な露光装置開発を含むEUVリソグラフィ技術の研究が始まった[2]。このEUVLLC設立の動きに触発され、欧州ではEUCLIDES、日本では技術研究組合超先端電子技術開発機構 (ASET) EUV研究室が発足し、日米欧三極での研究が開始された[3, 4]。

2.2.2 発展期：2000年代

米国ではSEMATEC (SEmiconductor MANufacturing TECHnology) に研究の中心が移り、Albany Nanotechとローレンス・バークレー国立研究所 (LBNL) で研究が進められた。欧州ではMEDEA+, More Moore等の研究プログラムで研究が行われ、EXEPTというプロジェクトに続いた。

日本ではASETのEUV研究室に続き、2005年から(株)半導体先端テクノロジーズ (Selete) で本格的な研究が行われた。マスク技術やレジスト評価などの研究開発が進

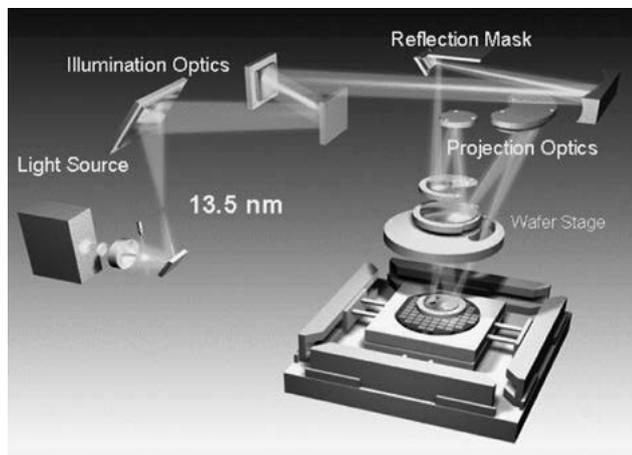


図1 EUV露光装置の概念図 (EUVA 提供)。

Center of Plasma Nano interface Engineering, Kyushu-Univ.

author's e-mail: mizoguchi.hakaru.010@m.kyushu-u.ac.jp

められた[5]. ASETやSeleteでは、マスク技術やレジスト技術などEUVの利用技術の開発が中心となっただけに対し、光源技術や露光装置技術の開発のため、2001年に技術研究組合極端紫外線露光システム技術開発機構(EUVA: Extreme Ultraviolet Lithography System Development Association)が設立され、光源研究と装置研究が始められた。メンバには、装置メーカー5社(ニコン、キヤノン、コマツ、ウシオ、ギガフォトン)と半導体メーカー4社(東芝、日本電気、富士通、ルネサス)が参加した。EUVAで行われた露光装置開発においては、ニコンが露光実験装置EUV-1、キヤノン社が小画面露光装置(SFET: Small Field Exposure Tool)をEUVAで開発した。またウシオ電機社のDPP光源およびコマツ社のLPP光源はこれら露光装置に接続され、本格的パターニングの実証試験が行われた。EUVAの終了までに光源出力ではウシオ社DPP光源で数10 Wレベル、コマツ社LPP光源では高出力EUV光源の現在主流になっている炭酸ガスレーザーと錫ドロップレットの組み合わせた独自のLPP方式を創出し、50 Wレベルの光源出力を実証した(当時世界記録)[6]。この時点で確立した錫のドロップレットに固体レーザーで生成したプリパルス光を照射しプラズマを生成し、さらにそれをCO₂レーザーで加熱する方式は、現在世界の高出力EUV光源の主流の方式となっているがこれは日本初の発明であることを強調しておきたい。それからEUV光源プラズマ基礎的な面の研究は、大阪大学を中心に組織された文部科学省のリーディングプロジェクトが2002年に発足し、プラズマシミュレーション技術でも世界をリードしたことを付け加えておきたい。

2.2.3 日本の退潮期：2010年代

日本のEUVAの露光装置の研究は、2011年3月に国家予算の期限と共に終了した。この時期のASML社のDUVマーケットでの躍進と相まって、先物のEUVへの開発投資が民間企業で継続できず、終焉を迎えることとなった。残念なことに国内の露光装置の研究開発は、公的資金で10年間育ててきたEUV露光機の技術を散逸することとなった。

日本のEUV光源の研究開発は、DPP光源はウシオ電機社で継続され、2013年頃応用先をマスク検査用LPP光源に変更し、日本のLaserTech社の検査装置に2016年頃採用され製品化された。またLPP光源はコマツ社から子会社のギガフォトン社に2012年に引き継がれ、経済産業省のマッチングファンドをつかって露光用光源出力330 Wの実証にまで至った[7]。しかしながら競合のCymer社が2013年にASML社に買収されたことと、日本の露光装置メーカーがEUV露光機市場から撤退したことから、商業的な出口が見出せず撤退を余儀なくされ、2022年に開発拠点であった平塚事業所を閉鎖し、光源装置のドライバーレーザー部分を九州大学に寄贈した。このドライバーレーザーシステムはNEDOの補助金を受け、コマツと三菱電機で共同開発したもので、波長10.6 μm 、10 nsのパルス幅で100 kHzの繰り返し周波数で、約30 kWの平均出力を達成した。図2は閉鎖直前のLPP光源の写真である。ち



図2 LPP型EUV光源装置(ギガフォトン社提供)。

なみに現在ギガフォトン社は、この高輝度LPP光源技術を転用した次世代検査装置用LPP光源の開発に注力し、マスク検査装置用EUV光源として製品化を進めている。

一方で国費でのマスクやレジストの研究は、ほぼ同時期に終了したSeleteの後継である株式会社EUVL基盤開発センター(EIDEC: EUVL Infrastructure Development Center)(2011年5月発足)でさらに10年近く研究開発が継続されたものの、予算の終了と共に解散となった。こうして国内のEUVの研究インフラが消滅していった。

2.2.4 EUV0.33 NA機の発展：2006年～2022年

転換期を縮小の方向で迎えた日本勢とは対照的に、世界のEUVL量産用露光装置はオランダのASML社主導のもとに進んだ。図3に開発の歴史を示した[8]。

初期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て、欧州のIMEC(IMEC: Interuniversity Micro-Electronics Center)および米国SEMATECHのAlbany研究所などに納入された[9]。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[10]。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光源の搭載をめざしたが、2012年時点で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。このころ膨大なEUV光源開発費の負担に苦しむCymer社をASML社が買収した。2015年には

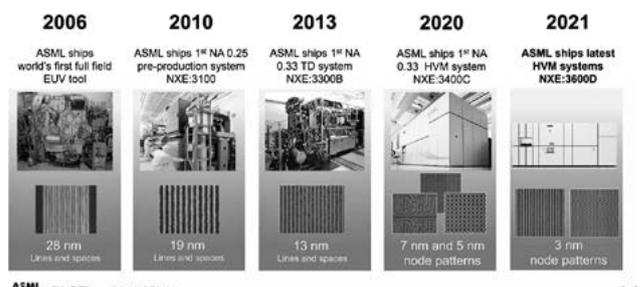


図3 ASML社露光装置開発の進歩[8]。

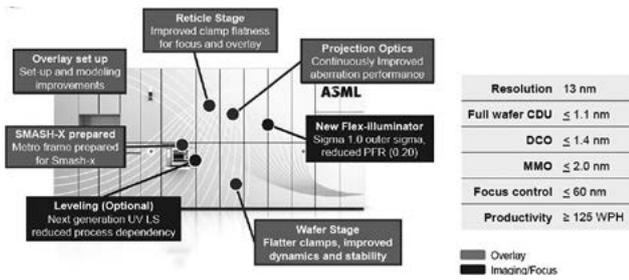


図4 NXE-34000B/Cの特徴と仕様[13].

80 W以上に光源を改良し、TSMC社[11]、Intel社[12]で40-80 Wで1週間前後の安定した運転に成功した。2016年には光源出力が100 Wを超え、NXE-3400B/Cが発表された(図4)[13].

2018年以降は250 W出力での安定した運転が可能となり、量産ラインへのEUVリソグラフィ適用が始まった。EUV露光装置の半導体工場への設置台数は現時点で300台に迫っている。2024年12月にはNXE-3400Cの後継機のNXE-3800Eが、日本のRapidus社の工場に導入され、2025年4月には日本で最初のEUV露光に成功した。

2.2.5 High NAの工場導入：2023年～

ASML社のHigh NA露光装置EXE-5000の構造と特徴を図5に示した[14]。光源に関しては、LowNA露光装置NXEシリーズと比較し、EUVの光軸が打ち上げ方向から水平方向に変わっている。これは、ミラー枚数を1枚削減するために変更されたと思われる。NA = 0.55の次世代露光装置EXE5000の初号機が、2023年末に米国Intel社のオレゴン工場に導入された。

現在は量産ラインへ組み込むため露光試験中であり、露光試験データ等もIntel社より公表された[15]。NA = 0.33との差が示されている(図6)。

さらに近年、ASML社は次々世代の露光装置として“Hyper NA”と銘を打って、NA = 0.75を超える露光装置の可能性を示した。同社の最新ロードマップでは2032年以降の新製品技術と位置付けている。光源出力は1000 Wを超える出力が要望されている。

2.3 EUV露光装置用光源装置の構造と性能

2.3.1 光源の全体構成

ASML社の250 W-EUV光源装置の全体構造を図7に示

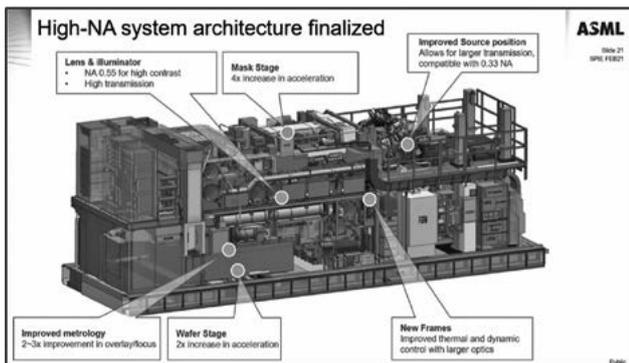


図5 EXE-5000露光装置の構造と特徴[8].

す[17].

EUV光は大気中で吸収されてしまうためEUV発光プラズマは真空チャンバの中で生成され、容器の中にはターゲット材を供給するドロップレット供給装置、ドロップレットにレーザービームを照射するレーザー照射ユニット、ドロップレットがレーザー照射によりプラズマ化しそこから出てくるEUV光を集光する集光鏡、そしてドロップレットに正確にレーザービームを照射するための観測モニターなどから構成される。このEUVチャンバ部はEUV露光装置“Scanner”の真空チャンバに直結している。このチャンバの中でEUV光を発生させる錫のドロップレットターゲットにドライバレーザーモジュール(左)で発生させたレーザー光を照射し、約30万Kの高温プラズマを発生させて、EUVを発生させる。発生した光は全方向に放射されるため、回転楕円面のEUVミラーで集光して“Scanner”の真空チャンバに伝送する。

2.3.2 ドライバレーザー部

ドライバレーザーモジュールはドイツTRUMPF社製で10 kW級の溶接用CO₂レーザー4台を1つのフレームの上に乗せた構造で、このモジュールは1階部分にある発振器部で発生させた50 kHzのCO₂レーザーパルスを、4台のレーザーで直列に増幅するMOPA (Master Oscillator Power Amplifier) 構成になっている。このCO₂レーザーはいわゆる高速軸流方式でガラス管に沿ってガスを流しその外側から高周波での容量結合による給電が行われている。

2.3.3 EUVチャンバ

ドロップレットで供給される材料としては溶融させた錫(融点240℃)が使用される。高温の溶融錫を生成する坩堝に圧力をかけて、小さなノズル穴から噴き出す溶融錫ジェットにピエゾエレクトリック素子で振動を与えること

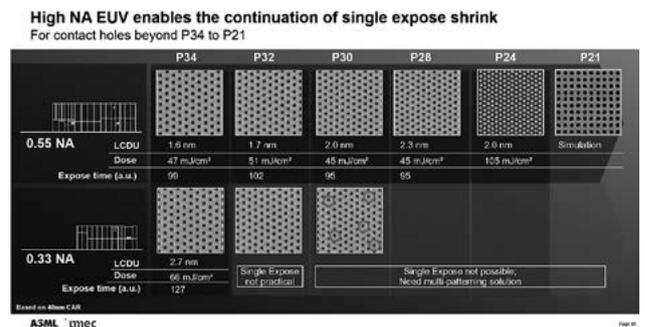


図6 EXE5000露光試験データ[16].

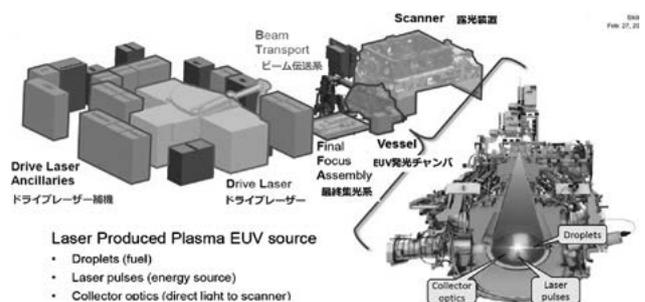


図7 ASML社 EUV光源装置[17].

で、直径20 μm程度のドロップレットを10–100 kHzで生成している。ドロップレットの飛翔速度は80–100 m/sに達する。従来はこのドロップレットの原料補給のために坩堝を冷却し、原料を補給する必要があったが、最新のモデルではインライン・リフィル機能が搭載され運転しながら、原料の補給ができる構成に改良された。

2.3.4 EUV集光鏡

EUV集光鏡の写真を図8に示した[18]。直径は660 mm、重量45 kgの回転楕円鏡で1つの焦点が、発光プラズマ点、もう1つの焦点が露光装置光学系の入り口：IF (Intermediate Focus) 点となっている。反射面にはMo/Siの多層構造の膜が蒸着されている。製造はドイツのZeiss社製である。

2.4 EUV光源開発の今後の課題

2.4.1 高出力化と電力の増大

この基本構成で2017年にはLPP光源は300 Wを超え、現在は700 Wを超えるデータが発表されている。2030年ごろには1000 W出力のEUV光源の実現をめざしている(図9)。この高出力化のためにはドロップレットの供給速度を速めて、ドライバーレーザの出力を現状の40–50 kWから100 kW程度まで増やすのが常道であるが、CO₂レーザの入力電力は既に1 MWを超えており、半導体工場の立地条件を大幅に制約する要因となっており実用装置としての限界に近づいていると言わざるを得ない。

2.4.2 EUV集光光学系のメンテナンスコスト

EUVプラズマから発生するEUV光をこの集光鏡で集めるが、光子のみならず発光材料の錫や、錫のエッチングガスとして流している水素プラズマもミラーに到達する。これら様々な高エネルギー粒子による多層膜のダメージを防

御するための工夫もなされている。特に水素ガスによる、高エネルギー粒子の失活過程、錫のエッチング過程は重要なプロセスであり、EUV光源装置設計の重要なポイントである。図10にASML社光源に使われた集光鏡の反射率低下速度の推移が示されている。

2015年には0.6%/Gplsだったものが、2017年0.4%/Gpls、2020年0.1%/Gplsと改善が進んできているが、依然ミラーのメンテナンスコストに占める割合は7割近くを占める。また前項の高出力化の方向と二律相反するため、今後もメンテナンスコスト低減の大きな課題である。

2.4.3 稼働率向上

半導体工場での装置稼働率は非常に重要であり、これまでの露光装置でも99.7%以上を常にめざしながら改善が進められている。EUV露光装置では真空中であるとともに、メンテナンス必要部品数も多く、非常に難しい要求である。集光鏡交換、ドロップレットジェネレータ交換、リフィルの場合の従来所用時間とその改善の結果、集光鏡交換は従来50時間かかっていたが、7時間程度と画期的に短縮され、現在の稼働率は平均値でようやく90%を超えるデータが出るようになってきている(図11)。

2.5 おわりに

2.5.1 EUVフォトン社の誕生

2024年7月に九州大学OIPの子会社としてEUVフォトン株式会社(以下EUVPと略)が発足した。これまで2章で述べてきたように、日本でのEUV研究は2010年台にことごとく終結し、途絶えたが比較的最近まで継続していたEUV材料開発の活動とDUVの実績で国内材料メーカーは健闘していて、フォトレジストの世界シェアは日本メーカーがその90%を占めている。この材料開発にはEUV光を使っ

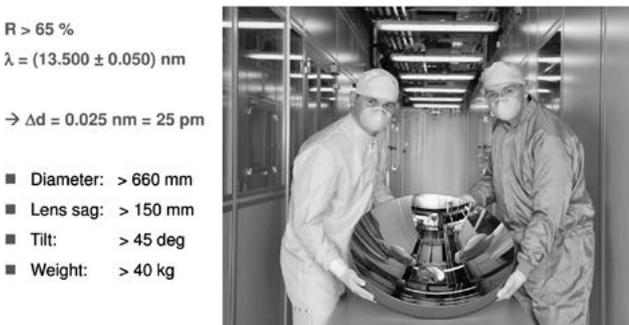


図8 ASML社のEUV光源用集光ミラー[18].

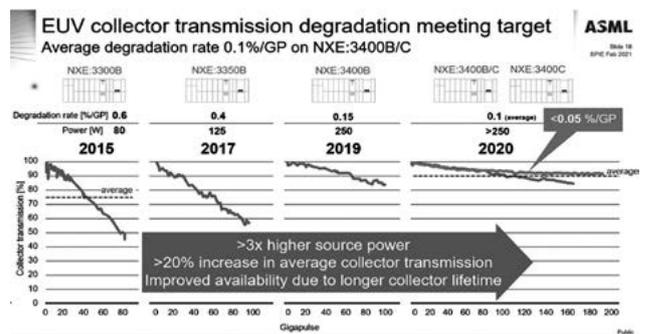


図10 EUV光源用集光ミラー寿命[19].

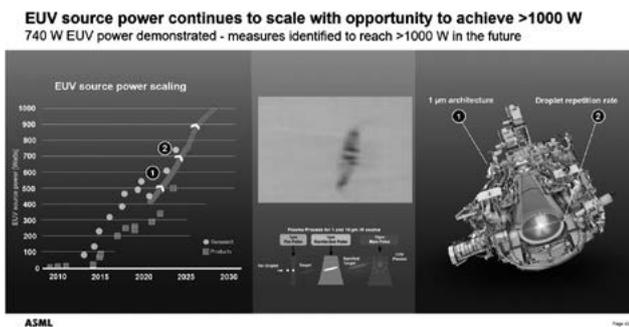


図9 EUV光源の高出力化の歩みと将来目標[16].

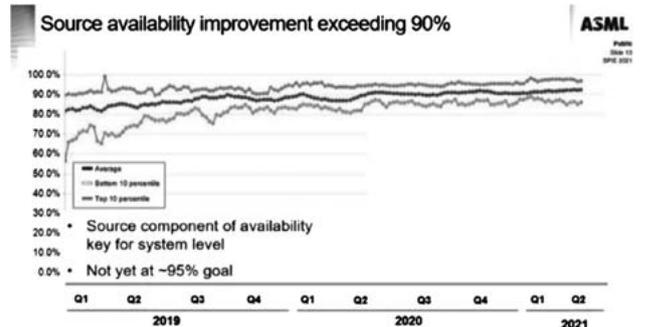


図11 EUV照射試験装置(リソテック Japan社提供).

た研究が必要不可欠にもかかわらず、現在はiMECを初めとする欧米の研究機関に頼らざるを得ない状況にある。九州大学では、この状況を打破し国内の材料メカを支援するために、EUV光の照射サービスおよび材料開発の支援を実行する“EUV”フォトン九州大学OIPの元に2024年7月に発足させた。その業務コンセプトは、EUV光の照射+観測データの解析+材料設計までを一貫したサポートを行い材料メカを材料科学の面からサポートするというものである。

現在は佐賀シンクロトンや光源メカの協力を得ながら自前の分析機器を使ってEUV照射業務を進めているが、2025年後半からは自前の照射試験装置(図12)を使って大幅なキャパシティの拡大を計画している

2.5.2 国内のEUV技術の発展に向けて

ここまでEUV露光光源の開発について解説を加えてきた。残念ながらEUV量産用露光機、およびEUV光源の開発は2010年代に中断・撤退が相次いだ。しかしながらEUVリソグラフィを支える検査装置、およびその光源技術は日本の中に健在であり、レーザーテック社はEUVマスク検査装置では世界のリーダー的存在となっている。また、露光用光源を断念したギガフォトン社も、露光用光源開発で培った光源技術を検査装置用光源として製品化すべく活動中である。

EUV露光システムは図13に示すようにそれを支える数多くの要素技術抜きには語れない。図13に要素技術を整理した。EUVの発生のターゲット技術、レーザー技術、プラズマ制御技術、EUV光学素子技術、真空中でのステージ技術、位置合わせ技術などが必要である。今後もこれらの技術にチャレンジすることが、日本の最先端装置技術を高めることになり、諸外国との差別化ができると考える。

本章では誌面の制約上、検査装置、および要素技術の状

況の解説には触れることができなかった。今後国産の要素技術を保有するメーカーと大学・研究機関がタイアップして微細加工の最先端であるEUV技術を継承だけではなく、世界をリードする技術として発展させていくことが強く望まれる。

謝辞

最初に本章のきっかけとなったEUVリソグラフィ関連調査のチャンスを与えてくださった経済産業省の関係者の皆様に感謝します。さらに本プログラムを研究面から支えてくださった、九州大学の白谷正治副学長をはじめとする九州大学の関係者各位。北海道大学富田健太郎氏、Padue大学砂原淳氏、大阪大学西原功修氏に感謝します。最後に、本LPP-EUV光源研究開発において2003年のEUVA発足から出力50W達成までLPP-EUV光源の研究開発で、EUVA平塚分室長として指導的役割を果たされ、「遠藤方式」と言っても過言ではない、現在世界の半導体工場で活躍しているLPP-EUV方式の開拓[6]を行った遠藤彰氏(2022年2月死去)に改めて感謝の意を表すとともに遠藤氏の御冥福を祈り本稿の結びとしたい。

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, 322 (1986).
- [2] C. Gwyn *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol.* **B16**, 3142 (1998).
- [3] J.P.H. Benschop *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol.* **B17**, 2978 (1999).
- [4] S. Okazaki: *Proc. SPIE* **3676**, 238 (1999).
- [5] I. Mori *et al.*, *Proc. SPIE* **6921**, 692102 (2008).
- [6] A. Endo, *et al.*, *Proc. SPIE* **6703**, 670309 (2007).
- [7] H. Mizoguchi *et al.*, “Challenge of >300W high power LPP-EUV source with long collector mirror lifetime for semiconductor HVM”, *Proc. SPIE*.
- [8] Jan Van Schoot *et al.*, “High-NA EUV lithography exposure tool: advantages and program progress”, *SPIE Photomask Technology + EUV Lithography*, 2020.
- [9] J. Zimmerman *et al.*, “ASML EUV Alpha Demo Tool Development and Status”, *SEMATECH Litho Forum* (May 23, 2006).
- [10] J. Stoeldraijer *et al.*, “EUVL into production -Update on ASML's NXE platform”, *2009 EUVL Symposium*, Prague (2009).
- [11] J.J.H. Chen, TSMC: “Progress on enabling EUV lithography for high volume manufacturing”, *2015 EUVL Symposium* (5–7 October 2015, Maastricht, Netherlands).
- [12] M. Phillips, Intel Corporation “EUVL readiness for 7nm”, *2015 EUVL Symposium* (5–7 October 2015, Maastricht, Netherlands).
- [13] M. Mastenbroek: “Progress on 0.33 NA EUV systems for High-Volume Manufacturing”, *Proceedings Volume 11147, International Conference on Extreme Ultraviolet Lithography* (2010).
- [14] Jan van Schoot, ASML; *EUVL workshop 2023 Leuven, Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography XI* (2019) [11323-28].

EUV Source by Energetic



EQ-10HP
High-Brightness
20Watt EUV Source
for Metrology and
Testing

EUV Exposure system by Litho Tech Japan

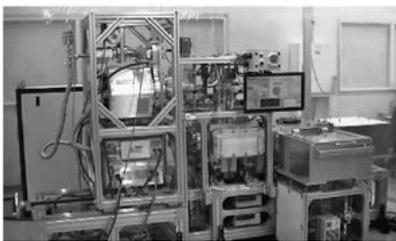


図12 EUV光源の稼働率の改善[20].

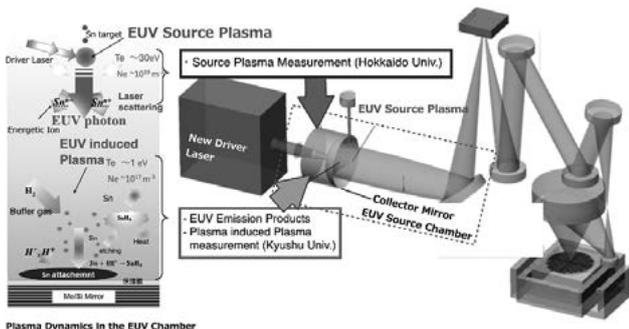


図13 EUV技術の構成とEUV露光システム(EUVフォトン).

- [15] S.L. Carson, “Early manufacturing status with high-NA EUV”, ALP-2025 [13424] (2025).
- [16] S. Nagahara *et al.*, “ASML Advanced EUV Technology in AI Era”, パターニング戦略会議 (2025.5.23-24, 箱根共創の森).
- [17] I. Fomenkov *et al.*, “Laser produced plasma light source development for HVM”, Proceedings Volume 9048, Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography V; 904835 (2014).
- [18] W. Egle *et al.*, “EUV collectors: design, development, fabrication, and testing”, Proceedings Volume 5193, Advances in Mirror Technology for X-Ray, EUV Lithography, Laser, and Other Applications; (2004).
- [19] SPIE Advanced Lithography + Patterning (2021).
- [20] 2021年 NGL 研究会第 3 回定例 (2021.11.9).