

技術論文

リソグラフィ用光源開発の現状と将来

Development of Light Sources for Lithography at Present and for the Future

溝口 計

Hakaru Mizoguchi

斎藤 隆志

Takashi Saitoh

松永 隆

Takashi Matsunaga

半導体製造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では 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 液浸リソグラフィ技術が使用されている。さらに 32 nm、22 nm の NAND フラッシュメモリの量産では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量産されている。本報告では、ArF エキシマレーザーリソグラフィおよび次世代リソグラフィ用の CO₂ レーザー励起 LPP-EUV 光源の開発の現状・将来動向について報告する。

In projection reduction photolithography processes, the heart of semiconductor mass-microfabrication, KrF excimer lasers are used for 180 nm and below, ArF excimer lasers are used for 100 nm and below, and advanced ArF immersion techniques are used for 65 nm and below. In mass-production of 32 nm and 22 nm NAND flash memories, double patterning exposure devices are used. This report describes where the development of ArF excimer lasers for lithography and that of CO₂ laser-excited LPP-EUV sources for next-generation lithography currently stand and where they are headed in the future.

Key Words: ArF, EUV, リソグラフィ, 半導体製造, 光源開発, パルスCO₂レーザー

1. はじめに

半導体の微細化の道筋は ITRS のロードマップ¹⁾によれば、2011 年に 22 nm NAND Flash メモリの量産がダブルパターンニングで開始された。また 16 nm では過去 EUV 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 + MP (マルチパターンニング) での導入が始まっている。2013 年現在リソグラフィ用エキシマレーザー発振機の市場規模は、500 億円/年を超え着実に成長を遂げている。一方 EUV リソグラフィは登場が遅れているが、次の世代の 11 nm 以降での本命として引き続き世界的に大きな研究開発費が投じられている。本稿では、リソグラフィ用 ArF エキシマレーザーおよび世界の注目を浴びている日本発の技術であるリソグラフィ用 CO₂ レーザー励起 LPP-EUV 光源の開発の現状・将来動向について報告する。

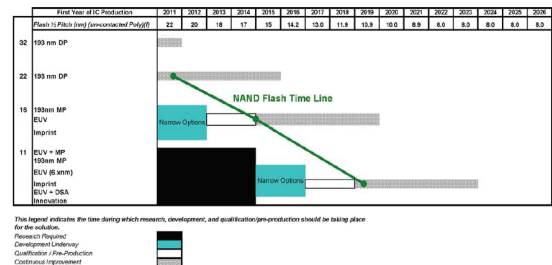


Figure LITH3B Lithography Exposure Tool Potential Solutions for NAND Flash Devices

図 1 ITRS Roadmap (2011 Edition lithography)¹⁾

2. ArFエキシマレーザーリソグラフィ

2.1 ArFリソグラフィと液浸技術

ITRS ロードマップ¹⁾にも示されるように 2007 年頃には 65 nm 以下の超微細プロセスでは、ArF および ArF 液浸露光技術の量産工場導入が進められ、現在まで活発な投資がなされている。さて液浸露光技術 (Immersion) 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、見かけ上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、次の式で表される。

$$\begin{aligned} \text{Resolution} &= k1 (\lambda/n) / \sin\theta \\ \text{DOF} &= k2 n\lambda / (\sin\theta)^2 \\ k1, k2 &: \text{experimental constant factor} \\ n &: \text{屈折率} \quad \lambda : \text{波長} \end{aligned}$$

光源波長と屈折率の関係を (表 1) に示す。

表 1 Immersion combination of wavelength and n

	R (K1=0.4) nm	n	medium	$\lambda / n \text{ nm}$	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 ($\lambda=13.6\text{nm}$)	18	1	Vacuum	13.6	0.3	>250
EUV ($\lambda=13.6\text{nm}$)	9	1	Vacuum	13.6	0.6	>500
EUV ($\lambda=6.7\text{nm}$)	4.5	1	Vacuum	6.7	0.6	>1000

2.2 多重パターニング技術²⁾

波長、屈折率を変化させ解像力を高める液浸技術については 2.1 節で説明した。一方で一回の露光ではこの式の中の k1 値を 0.25 以下に下げることができない。図 2 に二重露光の基本的な方式の一例を示す。この図にあるように、一回目の露光で形成したパターン空間周波数を 2 倍にするというものである。

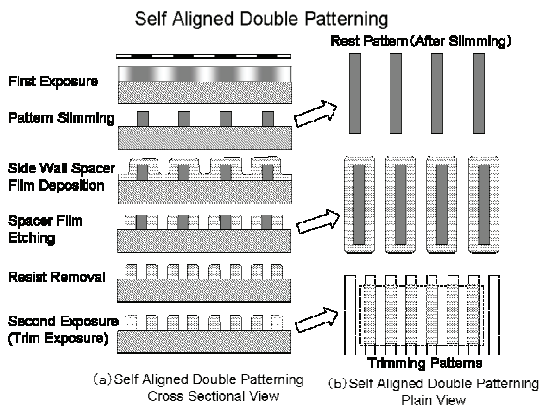


図 2 Example of double patterning process²⁾

3. インジェクションロック ArF エキシマレーザー

3.1 インジェクションロック技術

高出力化とスペクトル性能の向上がキーワードとなる。高出力化の手法として MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) 方式は構成が簡便なため、さまざまなレーザーにも利用され、リソグラフィ用としては 2002 年に実用化された³⁾。

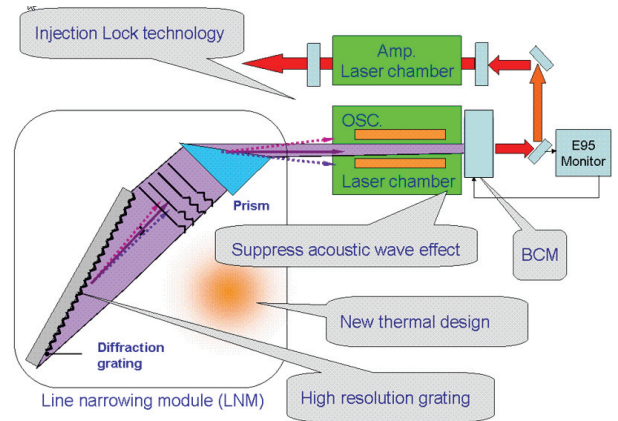


図 3 Injection lock ArF excimer laser³⁾

他方 2 台を組み合わせた高出力レーザーとしてインジェクションロック (Injection Lock) 方式 (以下 I/L と略記) (図 3) が知られてきたがコヒーレンスが高く、従来リソグラフィ用には不向きとされていた。筆者らは 2000 年～2002 年に NEDO と ASET で実施された F₂ 光源の研究から生まれた高効率、高安定という特性を持つ I/L 技術と、独自のコヒーレンスを下げる共振器技術を使い I/L 方式レーザーの実用化に成功した⁴⁾。

3.2 ArF エキシマレーザー “GT シリーズ”

現在この技術を基に本格的な ArF リソグラフィ用光源 “GT シリーズ” がメガフォトン社によって量産されている。2004 年に I/L 式 ArF レーザー GT40A (4 kHz, 0.5 pm (E95), 45W) をメガフォトン社から製品化し⁵⁾、発振周波数を 1.5 倍に向上させた GT60A (6 kHz, 0.5 pm (E95), 60W) を 2005 年に、2013 年には 120W 出力の GT64A が発売されている⁶⁾。図 4 に最新型の GT64A の外観を示す。表 2 には主仕様を示す。これら GT40A/61A/60A/62A は共通のプラットフォームを用いた設計で高い信頼性と拡張性を実現している。

表 2 Specification of GT64A

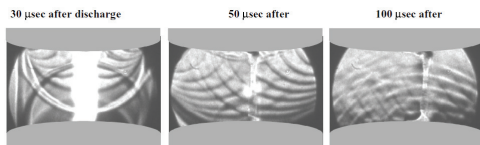
Tuning range	193.330 - 193.450 nm
Power	90 W / 120 W
Bandwidth (FWHM / E95)	0.20 pm / 0.35 pm
Repetition Rate	6000 Hz
Pulse duration	> 70 ns
Maintenance requirement	6 consumable modules
Size	2800 W × 820 D × 2050 H



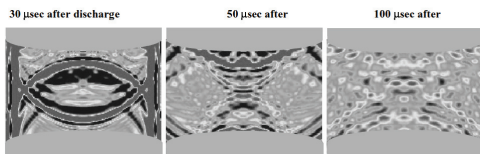
図4 Outlook of GT64A

3.3 放電技術

一般的にエキシマレーザーは、極めて速い立ち上がりの励起が必要とされている。レーザーチャンバ内部に数気圧という比較的高気圧でかつフッ素ガスを封入し電極長数十 cm の長い空間に均一なグロー状放電を生成している。ArF エキシマレーザーの運転周波数を 4 kHz から 6 kHz に向上させるにあたり、レーザーの放電空間ガス密度分布のシュリーレン法による実測データと数値シミュレーションデータ（図 5）を比較した。数値計算によって衝撃波による放電の揺らぎを最小化する設計が可能となった⁷⁾。結果的に 1 kHz から 6 kHz にわたるスペクトル安定性を実現した。



Figs 4. Visualized acoustic wave (measured by Schlieren method)



Figs 5. Calculated wave front (calculated by PC)

図5 Shock wave simulation and experimental data⁷⁾

3.4 フォーカスドリル (FD)⁸⁾

EUV 登場の遅延により、ArF 液浸露光は理論限界まで大きくなった高 NA レンズの使用により、焦点深度 (DOF) も限界まで小さくなっている。ゲートパターン等の孤立パターン等では、この DOF を大きくすることが必要なケースが増えてきている。ギガフォトンでは解像力が高い従来の狭いスペクトル幅を発生するノーマルモードと DOF が大きく出来る広いスペクトル幅を発生する FD モードとの切替えを瞬時に出来る FD 機能を開発した。この機能により、プロセスに合わせて 2 つのスペクトルを自

由に変化させ最適のパターニングが出来るようになり、ファンドリイ、ロジックメーカ等で好評を博している。

4. EUV光源の開発

4.1 EUVリソグラフィとは

波長 13.5 nm の EUV 光は、反射光学系（反射率 68%程度）による縮小投影が可能であるという特徴を生かしたリソグラフィで NTT 木下らにより提唱された⁸⁾。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、光リソグラフィとしては最終波長ともいわれている（図 6）。ただし 13.6 nm 光は気体によっても強く吸収されるため光路は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元の光の 1.4%しか露光面に届かない。実用的スループットを実現するには光源は 250 W~1000 W の出力が必要とされている。

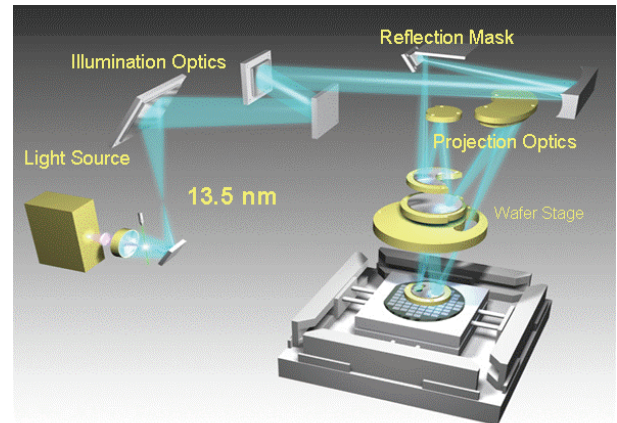


図6 Schematic of EUV exposure tool

ギガフォトン社では 2002 年より研究組合 EUVA に参画して取り組んできた⁹⁾。Sn ターゲットを CO₂ レーザーで照射するスキームはギガフォトンの独創技術で、九州大学岡田教授の測定結果¹⁰⁾をきっかけに 2006 年から力を入れて開発を行ってきた。その甲斐があつて今、世界の主流となっている。特に YAG レーザーと CO₂ レーザーを時間差を置いて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%) が得られている。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¹¹⁾。図 7 にギガフォトンの EUV 光源の概念図を示す。プラズマ生成用の CO₂ レーザーシステムには、独自の産業用の CW-CO₂ レーザーを増幅器として用いた MOPA システムを採用している。発振段の高繰り返しパルス光 (100 kHz, 15 ns) を、複数の CO₂ 増幅器により増幅することにより最大約 13

kW の出力を得ている¹²⁾。ターゲットは Sn を融点に加熱して、液体 Sn ドロップレットの生成を行ってきた。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。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緩和を行っている。

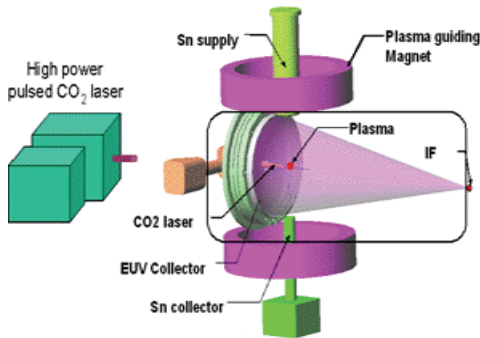


図 7 Schematic of Gigaphoton EUV source

4.2 世界の露光装置開発と市場の現況

世界の量産用露光装置開発は欧州の IMEC および米国 SEMATECH の Albany 研究所に 2006 年に納入された ASML 社 α -Demo-Tool をもって事実上スタートした¹³⁾。またニコン社は EUV-1 を 2007 年に Selete 納入し露光データを公表した。2009 年からは ASML 社はフルフィールドの EUV β 機 NXE-3100 を開発した¹⁴⁾。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 台を出荷した。当初 100 W 級の EUV 光源を搭載し 100 WPH を目指したが、2012 年時点で 7~10 W の出力に低迷し EUV リソグラフィ検証のボトルネックとなっている。現在は 250 W の EUV 光源を搭載し 200 WPH 以上の生産性を実現すべく設計されたフルフィールドの EUV γ 機 NXE-3300 が開発中で 2013 年には初号機が出荷されると予測されている¹⁵⁾。この装置の光源は現在 40 W、6 時間稼働データが報告され、2015 年までに 250 W にアップグレードする計画が公表されている。一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 開発支援の名目で Cymer 社は ASML 社に買収され(2013 年 6 月)、EXTREME 社は親会社ウシオ電機の判断で解散となった(2013 年 5 月)。

5. 要素技術の最近の発展

5.1 変換効率の向上

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。これは世界最高記録で画期的なデータである(図 8)。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 レーザで 250 W の EUV 出力が、40 kW パルス CO₂ レーザで EUV 500 W が達成できることになる¹⁶⁾。

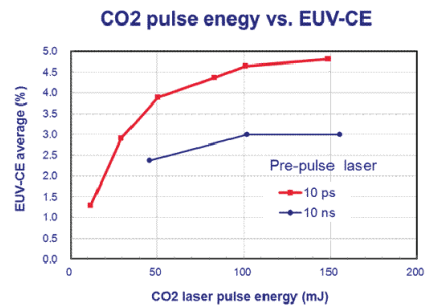


図 8 EUV conversion efficiency

5.2 磁場ミチゲーション

図 9 に筆者らが開発を進めている錫デブリの緩和のスキームを示す。プリパルスレーザー光の照射条件を調整し錫の形状を整え炭酸ガスレーザー光の吸収を増やしている。すなわち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。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。

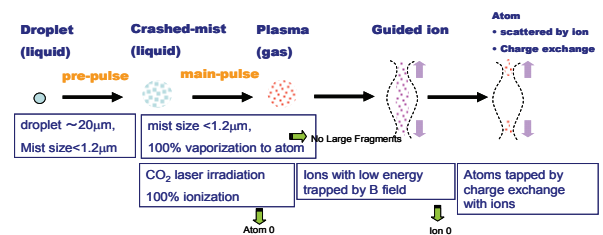


図 9 Schematic of Magnetic mitigation

5.3 高出力CO₂レーザーの開発¹⁷⁾¹⁸⁾

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ている (図 10)。



図 10 Picture of high power CO₂ laser experiment

6. EUV光源システムの開発¹⁶⁾

現在は第 2 世代機 (Gigaphoton GL200E) の開発を進めている。図 11 に概観を示す。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、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露光装置と光学的に結合している。この内部で Sn ドロップレットにレーザー光を照射し EUV 光を発生させている。図 12 にプロトタイプの写真を示す。2012 年からは、CO₂ レーザーの安定した高出力運転とドロップレットジェネレータの設計の大幅な見直しを行って要素技術の改良をすすめている。最新データでは (2013 年 8 月) EUV 出力で 15 W のバーストモード (0.5s ON/ 0.5s OFF) での連続発光データが確認されている。ギガフォトンでは 2015 年以降の 250 W (@ 1/F) の EUV 光源の実現とその量産化を目指している。

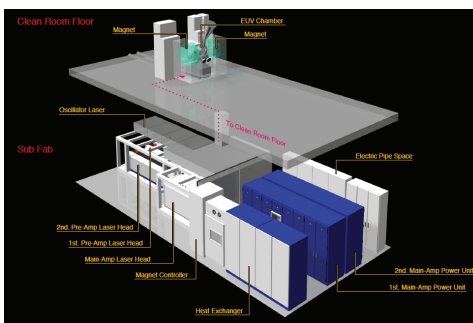


図 11 Overview of EUV source GL200E



図 12 Picture of proto-type EUV source GL200E

7. おわりに

開発が遅れている EUV を尻目に高い稼働実績 (Availability > 99.6%) がエンドユーザーから高く評価されギガフォトン社の ArF レーザー GT40A/60A/61A は、急速に各国の主要ユーザに受け入れられ、すでに 1100 台以上の出荷実績を有するようになった。一方でリーマンショック、欧州危機で日本の半導体産業の退潮で、業績は低迷してきたが最近新しいレーザー技術開発の成果と相俟って、反転攻勢に転じている。(図 13)

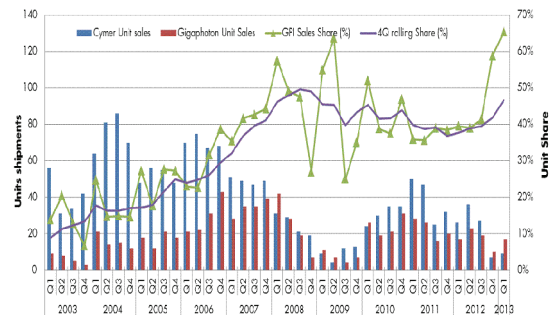


図 13 World wide sales of excimer laser for lithography (Data source: Gigaphoton)

また EUV 開発は民間主体の商用ベースでの国際競争の時代となっている。将来に向けてさらなる短波長光源への展開が世界の原子分光学者で行われている。毎年 Dublin で開催されている EUV 光源ワークショップでは、最近 Gd, Tb など CO₂ 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¹⁹⁾、シミュレーションではさらに高い効率の可能性も示されている。また、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²⁰⁾。この分野の基礎研究の進展を期待したい。

8. 謝辞

高出力 ArF エキシマレーザーの実用化は超先端電子技術開発機構 (ASET) の組合メンバーとして平成 11 年度経済産業省補正予算「F₂ レーザーリソ技術の開発」プロジェクトの成果, (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) より「高スループット露光装置用高出力レーザーの実用化研究開発」において平成 14 年度の開発費助成で高出力 ArF エキシマレーザー GT40A/60A の製品化を行った。また 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 にてなされた。さらに 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」による補助金を平成 21-23 年度, 23-24 年度に受け実施された。ここに記し感謝の意を表します。

9. 参考文献

- 1) ITRS 2011 年版リソグラフィ (JEITA訳) 23頁, Figure LITH3B
- 2) 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.
- 3) H.Mizoguchi: Optical Microlithography XIX, Proceedings of SPIE Vol. #6154 (2006) [6154-78]
- 4) O. Wakabayashi, T. Ariga, T. Kumazaki et.al.: Optical Microlithography XVII, SPIE Vol.5377 (2004) [5377-187]
- 5) H. Mizoguchi, T. Inoue, J. Fujimoto, et.al.: Optical Microlithography XVIII, Proceedings of SPIE Vol. #5754 (2005) [5754-74]
- 6) T. Asayama, Y. Sasaki, A. Kurosu, et.al.: Optical Microlithography XXVI, Proceedings of SPIE Vol.8683 (2013) [8683-51]
- 7) T. Hori, T. Yabu, T. Watanabe, et.al.: Optical Microlithography XVIII, SPIE 5754 (2005) 1285-1292
- 8) H. Kinoshita et al., J.Vac.Sci.Technol.B7, 1648 (1989).
- 9) 遠藤彰:「極端紫外リソグラフィー光源の装置化技術開発」レーザー研究32巻12号 (2004) 757-762
- 10) H. Tanaka, 著者5名, et. al.: Appl. Phys. Lett. Vol.87 (2005) 041503
- 11) K. Nishihara, 著者22名, et. al.:Phys. Plasmas 15 (2008) 056708
- 12) A. Endo,著者11名, et al.: Proc. SPIE 6703 (2007) , 670309
- 13) J. Zimmerman, H. Meiling, H. Meijer, et.al:“ASML EUV Alpha Demo Tool Development and Status” SEMATECH Litho Forum (May 23, 2006)
- 14) J. Stoeldraijer, D. Ockwell, C. Wagner: “EUVL into production – Update on ASML’s NXE platform” 2009 EUVL Symposium, Prague (2009) CD媒体
- 15) R. Peeters, S. Lok, E.V. Alphen, et.al.: “ASML’s NXE platform performance and volume Introduction” Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography IV, Proc. SPIE 8679 (2013) [8679-50]
- 16) H. Mizoguchi, “High CE technology EUV source for HVM” Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography IV, Proc. SPIE 8679 (2013) [8679-9]
- 17) Y. Tanino, J. Nishimae, T. Yamamoto, et.al.: “A Driver CO₂ Laser Using Transverse-flow CO₂ Laser Amplifiers” Symposium on EUV lithography (2013.10.6-10.10, Toyama, Japan)
- 18) 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)
- 19) T. Otsuka, D. Kilbane, J. White, et.al.: “Rare-earth plasma extreme ultraviolet sources at 6.5 nm”, Appl. Physics Letters 97 (2010) 111503
- 19) 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) CD媒体
- 20) V. Banine, A. Yakunin, D. Tuerke, U. Dinger: “Opportunity to extend EUV lithography to a shorter wavelength” , Symposium on EUV lithography (2012.9.30 - 10.4, Brussels, Belgium) CD媒体

筆者紹介



Hakaru Mizoguchi

みぞぐち はかる
溝口 計 1982年コマツ入社.

2000年ギガフォトン(株)入社(創業)
現在、ギガフォトン(株)代表取締役副社長(兼)CTO.



Takashi Saitoh

さいとう たかし
斎藤 隆志 2000年ギガフォトン入社.

現在、ギガフォトン(株)執行役員
(兼)EUV開発部 部長



Takashi Matsunaga

まつなが たかし
松永 隆 1985年コマツ入社.

2000年ギガフォトン入社.
現在、ギガフォトン(株)レーザ開発部
部長

【筆者からひと言】

パソコンからスマートフォン、タブレットと電子機器の発展は留まるところを知りません。

一方で電子産業の中心は、この10年で日本から東アジア地域に移っています。ギガフォトンも国境を越えて世界に雄飛しています。このEUVは微細化の究極の光とも呼ばれています。

EUV時代にも世界の電子産業の発展に貢献すべく湘南工場の一角で日夜がんばっております。