テーマ1「関西の放射線等利用施設の現状と将来展望」



ニュースバル放射光施設における EUV リソグラフィー技術開発の取組 および今後の展開 ~日本の半導体復興に向けて~

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 学長特別補佐 渡邊 健夫

先端半導体微納加工技術である EUV リソグラフィー (EUVL) 技術は 2019 年および 2020 年よりそれぞれ 7 nm 世代および 5 nm 世代用のロジッ クデバイスの量産技術に適用され、2022 年には 3 nm 世代の量産が 開始される。IRDS 国際半導体ロードマップによると今後も EUVL の 進展が要求されている。講演ではニュースバル放射光施設に於ける EUVL 開発の技術課題へ取り組み、今後の展開について紹介するとと もに、日本の半導体復興に向けた必要な施策について論ずる。

ニュースバル放射光施設における EUV リソグラフィー技術開発の取組および

今後の展開 ~日本の半導体復興に向けて~

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所

渡邊 健夫

1. はじめに

半導体の進歩により、IoT や AI、並びにスマートフォンをはじめ、データセンター等の電 子機器に大変多く使用されている。この進歩を支えてきたのが、半導体微細加工技術である。 この技術は半導体の前工程で最も重要な技術である。

先端半導体微細加工技術である EUV リソグラフィー (<u>extreme ultraviolet lithography</u>: EUVL) 技術[1,2]は 2019 年および 2020 年よりそれぞれ 7 nm 世代および 5 nm 世代用のロジッ クデバイスの量産技術に適用された。今後の半導体デバイスは図 1 に示すように複雑な構造

となる。このような状況の中で、 表1に示すように IRDS 国際ロ ードマップ[3]は今後少なくと も 2030 年までに EUVL 技術を用 いたさらなる微細加工技術、つ まり EUVL による多重露光法や High NA EUV 露光[4]法が量産技 術として使用されると予想され プレナー型FET ている。ここで、High NA EUVL は露光光学系の開口数を現 在の 0.33 を 0.55 に拡大す ることで、8 nm のパタン形 成を可能にし、2025年以降で の量産展開を目指している。 また、2031 年以降の 1.0 nm 世代のロジックデバイスの 量産では EUV 光の短波長で ある Beyond EUV リソグラフ

ィー (BEUVL) が[5,6]候補に 挙げられている。 EUVL の技術課題のこれま

での変遷を表2に示す。今後 の技術課題は1)レジスト、 2)マスク、3)EUV 光源の



	2022	2025	2028	2031	2034	2037
Logic node	3 nm	2.1 nm	1.5 nm	1.0 nm	0.7 nm	0.5 nm
Node	G48M24	G45M20	G42M16	G40M16T2	G38M16T4	G38M16T6
Minimum ½- pitch	12 nm	10	8 nm	8 nm	8 nm	8 nm
Primary options for logic	EUV 0.33.NA multiple patterning	EUV 0.33.NA multiple patterning EUV 0.55.NA single patterning	EUV 0.55.NA single patterning EUV 0.55.NA multiple patterning	EUV 0.55.NA single patterning EUV 0.55.NA multiple patterning	EUV 0.55.NA single patterning EUV 0.55.NA multiple patterning	EUV 0.55.NA single patterning EUV 0.55.NA multiple patterning
				Beyond EUVL (λ=6.X nm)	Beyond EUVL (λ=6.X nm)	Beyond EUVL (λ=6.X nm)

表 1. EUV と BEUV の今後の展開

研究開発である。EUV レジストの技術課題は1)高感度、2)高解像、3)低LWR(線幅ばらつき:<u>l</u>ine <u>w</u>idth <u>r</u>oughness)を同時に満足することが要求されている。EUV マスクの技術課 題は1)無欠陥マスク、2)ペリクル、3)ペリクル越しの欠陥検査を実現することである。

2015	2016	2017	2018	2019	2020	>2021			
光源	光源	レジスト	レジスト	レジスト	レジスト	レジスト			
レジスト	レジスト	光源	光源	マスク	マスク	マスク			
マスク	マスク	マスク	マスク	光源	光源	光源			

表2. EUVLの技術課題の変遷(基礎研究+実用化技術開発)

EUV 光源の技術課題は高強度で安定した光源の開発である。

ここでは上記内容を鑑み、兵庫県立大学が保有する放射光施設ニュースバル[7,8](以降、 「ニュースバル」(図2))では EUVL の基盤技術開発を進め、これまでに ASET、SELET、EUVA、

EIDEC と約 20 年間にわたって EUVL の国家プロジェクトを先 導してきた。また、のべ 200 社 の国内外企業と共同研究等も 進めてきた。これらの結果、 EUVL の実用化に繋がった。ここ では、新たな EUVL 基盤技術開 発の内容について紹介する。

近年、半導体不足やウクライ ナ情勢により経済安全保障や 国家安全保障の観点から世界



図2. ニュースバル放射光施設

における日本の半導体技術覇権が課題となっている。この意味において、日本の半導体復興 に向けた必要な施策について論ずる。

2. ニュースバル放射光施設

兵庫県立大学が保有するニュースバルは高度産業科学技術研究所が管理運営する国内大学 最大の放射光施設であり、軟X線領域の中型の放射光施設である。図3に電子陸績リングお よびビームラインの配置を示す。ニュースバルの電子蓄積リングの周長は約120 mであり、

蓄積電子のエネルギーは 1.0
1.5 GeV である。2000 年1
月に供用を開始し、SPring-8
の大型放射光施設の硬X線施
設とリサーチコンプレックス
を形成している。

現在、ニュースバルでは 9 本のビームラインが稼働して おり、産業利用や学術利用に 供している。この内 3 本が



EUVL 基盤技術開発を目的にしたビームラインである。

これまでニュースバルでは SPring-8 の入射器を共用していたが、2016 年から 5 年間かけ て、ニュースバル専用の入射器建設を進めてきた。2018 年に s-band (約 3 GHz の高周波) お よび c-band (約 6 GHz の高周波) 加速管用クライストロン・ギャラリー(通称、「附属棟」) を建設、2019 年に加速管用高周波電源を設置し、従来の電子ビーム輸送用トンネル内に 50 m 長(従来の長さの半分)の新入射器を設置した。2021年4月20日に新入射器によるニュース バルの供用を開始した。その結果、ニュースバル独自の運転スケジュールで運転が可能にな った。さらに、電子ビームの電流値および放射光の強度がそれぞれ約17%向上した。

3. EUVL 用露光機および EUV 光源

半導体微細加工技術はリソグラフィー技術とエッチング技術から構成される。この中で最 も重要な技術がリソグラフィー技術である。リソグラフィー技術は、フォトマスク(以降、 「マスク」)上の半導体電子回路原版を露光光学系をとおしてフォトレジスト(以降、「レジ スト」)である感光性フィルムが形成されたシリコンウエハ上に写真転写する技術である。そ こで、形成されるレジストの線幅はエッチングにより電子回路として忠実にシリコンウエハ に金属の配線として形成される。

リソグラフィーで形成される線幅は露光波長に比例し、露光光学系の開口数の大きさに反



ともに微細加工を実現してきた(図4)。露光波長はこれまで水銀ランプのg線(波長438 nm)、 i線(波長365 nm)、KrFエキシマレーザー(波長248 nm)、ArFエキシマレーザー(波長193 nm)が用いられてきており、EUVLではEUV光(波長13.5 nm)が用いられてきた。さらにこの先の技術に波長6.7 nmのBEUV光を用いることが検討されている。

極端紫外線である EUV 光の物質に対する屈折率がほぼ1であるため、露光光学系に屈折レ ンズが使用できない。このため、反射面が多層膜から成るミラーを用いる。また、マスクも 低膨張ガラスを基板の上に多層膜が形成された反射型マスクを用いている。何れの場合も多 層膜の材料は Mo/Si 多層膜を用いており、現在、直入射の EUV 光の反射率は約 70%であり、理 論反射率に近い値となっている。

我々は EUVL 用露光機の開発[9,10]は 1998 年から 2001 年にかけて、非球面 3 枚鏡で構成し た露光光学系から成る ETS-1 露光機を開発し、世界で初めて大面積で 60 nm のパタン形成を 確認した。この技術が現在市販されている ASML の NXE シリーズの EUV 露光機開発に繋がって いる。この露光光学系は 6 枚の非球面鏡から構成されている。ここで、非球面鏡が用いられ ている理由は像歪みを低減するためである。

光源には溶融 Sn のドロップレットをターゲットとするレーザープラズマX線源が用いられており、現在の市販されている露光装置の EUV 光源のパワーは 250W である。現在、600W を 目指して開発が進められている。

一方で、このレーザープラズマ X線光源に代わる光源としてさらなる高強度 EUV 光が生成

可能な自由電子レーザー光源である EUV-FEL の開発の検討を進められている。

4. EUV レジスト

EUV レジストの3つの技術課題は相反関係にある (a)_{3.5} が、この技術課題で最も重要な課題は低LWR の実現で ある。LWR の主要因はレジストの材料に起因する。こ の主な要因はレジスト薄膜中のレジスト構成物の濃 度分布である[10]。現在、線幅の大きさが 10 nm に迫 っており、このディメンジョンでの濃度分布の均一性 が課題になっている。これまではこの濃度分布を測定



図5. 軟X線共鳴散乱法(a)吸収分光法により散乱実験の入射エネルギーを決定、(b) 散乱プロファイルをCMOSイメージセンサーにて取得、(c)散乱プロファイルから散乱ベ クトルを算出、(d)パワースペクトルからレジスト構成物の濃度均一性を評価

軟 X線共鳴である軟 X線吸収分光法により特徴的な 化学構造を有する X線のエネルギーを探索し、散乱 実験の入射エネルギーを決定する(図5(a))。そし て、このエネルギーごとの散乱プロファイルを軟 X 線の2次元検出器である CMOS イメージセンサーで 観測する(図5(b))。得られた散乱プロファイルか ら散乱ベクトルを算出(図5(c))し、パワースペク トルからレジスト構成物の濃度均一性を評価(図5 (d))することができる。現在は反射法による方法の 開発も進めている[12]。

この手法は散乱法による評価であるため、濃度分



Scattering vector (nm⁻¹)

図 6. 光電子顕微鏡装置

布は平均的な評価となる。一方で、そのものの空間的評価が可能な手法として、図6に示す 光電子顕微鏡を用いた手法の開発を進めている。

5. EUV マスク

EUV マスクは ULE6025 の低膨張ガラスレチク ルを基板に Mo/Si 多層 膜上に TaN の吸収体が 半導体回路パタンとし て形成され、3次元構造 を有する。マスクに欠陥 があるとシリコンウェ ハに回路パタンが転写



図7. (a) 強度欠陥および(b) 位相欠陥

される際に回路の断線やシュートが発生し、回路設計どおりに機能しない。このため、欠陥 の無い EUV マスクが必須である。図7に示すように多層膜上に発生する強度欠陥と多層膜中 に発生する位相欠陥に大別される。兵庫県立大学をはじめ[13-19]、ローレンスバークレイ国 立研究所等ではこれらの欠陥検出を目的に研究開発が進められて来た。現在、明視野および暗 視野 EUV 顕微鏡がレーザーテックから販売されている。2017年に EUV ブランクス欠陥検査/レ ビュー装置を市場に投入されたのに続き、2019年にはパタン付きマスクのアクティニック検査が 可能な「ACTIS A150」が市場に投入されている。

また、ASMLの露光機はミラーやマスク上の付着するカーボンコンタミネーションを低減さ せることを目的に真空環境下で水素ガスが導入されている。マスク多層膜材料や吸収体は金 属が用いられており、水素脆性の対策が必須となる。また、ペリクルも然りである。そこで、 図8に示すように、ニュースバルではこの水素脆性評価が可能なビームラインを整備[20,21] した。このビームラインの光源に10.8 mの長尺アンジュレータを用い、試料上で30 W/cm²の 高強度 EUV が照射できるとともに、70 Pa にまで水素ガスが導入できる装置となっている。 この装置を用いて、マスクやペリクル材料の水素脆性評価が可能となった。



図 8. (a) 強度欠陥および(b) 位相欠陥

6. 今後の展開と日本の半導体復興に向けて

ニュースバルでは2025年の量産化を目標にNA=0.55のHigh NA EUVLの開発を進めている。

また、さらに先の 2031 年の量産展開を目指し、露光波長 13.5 nm の約半分の露光波長 6.7 nm を用いた BEUVL (beyond EUVL) の開発を進めている。

現在、世界半導体市場統計によると半導体市場は約60兆円であり、シリコンサイクルの中 でその市場は拡大している中で、日本の半導体市場は全体の 10%足らずとなっている。1980 年代後半は最大で 50%超のシェアを持っていたことから比べるとその衰退が著しく、2030 年

には1%程度まで落 ち込むと予想され ている。半導体は 経済や国家安全保 障上重要な技術で あり、筆者は何と か日本の市場拡大 を目指したいと考 えている。これに は、国内の半導体 需要を高め、日本 の先端半導体が必 要な環境を構築す ることが重要であ



図 9. 世界の半導体市場と日本の半導体市場の推移と今後の予測

る。これに並行し

て、先端半導体製造が必要である。

以下が、私が考えている内容を列記にした。参考になれば幸いである。

- 日本はこれまで、幕末の頃以来欧米から様々な干渉を受けてきた。例えば日清戦争、 日露戦争、大東亜戦争、そして、高度経済成長でのドルショック、石油ショック、繊 維産業の衰退、沖縄返還にからむ化学繊維産業の衰退、日米半導体協定に起因した半 導体の衰退であり、そして、次は自動車産業がターゲットにされている。
- 半導体は経済安全保障および安全保障の観点で非常に重要である。
- 日本が世界において技術覇権に向けその課題克服のため、世界に通じる先端半導体技 術開発を推進する必要がある。
- 産学が共同で取り組み、国、産業界から出資金を募り、民間主導のプロジェクトを立 ち上げることが必要である。
- 半導体の各現場を理解した上でのプロジェクト
- 日本の企業・大学が一丸になって、出口側の戦略を含めて議論を継続し、純日本の半 導体ファンドリを設立・運営する。
- プロジェクトの企業、大学、国研の役割は、それぞれ「経営・技術戦略」、「企業の課 題に対するサイエンス」、「国とのかかわり方」を明確にする。

2022 年 11 月 10 日の日本の企業 8 社連合により、2 nm 世代のロジック半導体製造を目的に 新会社「Rapidus」の設立のニュースが飛び込んできた。この製造技術として EUVL が使用さ れ、日本の半導体復活に繋がることを期待している。

7. おわりに

ニュースバルでの EUVL の基盤技術開発の最新の現状および今後の展開について述べた。さ

らに、日本半導体復興に対する施策および期待について述べた。

現在、先端半導体であるロジックデバイスおよびメモリはデータセンター用の大型コンピ ユータに多く使用されている。そこで、日本の半導体を復活させるためには、今後の国内の 半導体需要を高め、日本の先端半導体製造が必要な環境を構築する必要がある。このため、 データセンターの利活用がキーとなる。これには、国民や県民へのマイナンバーカードと自 動車の自動運転に絡めた保険、医療、教育等の新たなサービスでソフトウェア開発、半導体 製造、半導体素材等の企業全体で儲けを出すことができる、日本ならではのおもてなしの精 神が詰まった大きなビジネスモデルの構築が重要と考えている。

以上の思いが少しでも理解いただけると幸いです。

参考文献・資料

- [1] H. Kinoshita, T. Kaneko, H. Takei, N. Takeuchi, and S. Ishihara, Presented at the 47th Autumn Meeting of the Japan Society of Applied Physics, Paper No. 28-ZF-15, 322 (1986).
- [2] H. Kinoshita, K. Kurihara, Y. Ishii, and Y. Torii: J. Vac. Sci. Technol., B7, 1648 (1989).
- [3] IRDS 半導体ロードマップ:<u>https://irds.ieee.org/editions</u>.
- [4] Jan Van Schoot, Eelco van Setten, Kars Troost, Sjoerd Lok, Judon Stoeldraijer, Rudy Peeters, Jos Benschop, Joerg Zimmerman, Paul Graeupner, Lars Wischmeier, Peter Kuerz, Winfried Kaiser, Proc. SPIE, 11323 (2020) 1132307.
- [5] T. Watanabe, T. Harada, and S. Yamakawa, J. Photopolym. Sci. Technol., 34 (2021) 49.
- [6] 渡邊健夫、2021 年度印刷・情報・電子用材料研究会講座予稿集、高分子学会 印刷・情報・電子用材料研究会、2022 年 1 月 28 日.
- [7] A. Ando, S. Amano, S. Hashimoto, H. Kinoshita, S. Miyamoto, T. Mochizuki, M. Niibe, Y. Shoji, M. Terasawa, and T. Watanabe, *Proc. of the 1997 Particle Accelerator Conference*, 757 (1998).
- [8] S. Hashimoto, A. Ando, S. Amano, Y. Haruyama, T. Hattori, J. Kanda, H. Kinoshita, S. Matsui, H. Mekaru, S. Miyamoto, T. Mochizuki, M. Niibe, Y. Shoji, Y. Utsumi, T. Watanabe, and H. Tsubakino, *Trans. Materials Research Soc. Japan,* 26, 783 (2001).
- [9] T. Watanabe, H. Kinoshita, H. Nii, Y. Li, K. Hamamoto, T. Oshinio, K. Sugisaki, K. Murakami, S. Irie, S. Shirayone, Y. Gomei, and S. Okazaki, *J. Vac. Sci. Technol.*, B18, 2905 (2000).
- [10] T. Watanabe, H. Kinoshita, K. Hamamoto, M. Hosoya, T. Shoki, H. Hada, H. Komano, and S. Okazaki, Jpn, J. Appl. Phys., 41, 4105 (2002).
- [11] (a) T. Watanabe, Y. Fukushima, H. Shiotani, M. Hayakawa, S. Ogi, Y. Endo, T. Yamanaka, S. Yusa, and H. Kinoshita, *J. Photopolym. Sci. Technol.*, 19, 521 (2006). (b) J. Tanaka, T. Ishiguro, T. Harada, and T. Watanabe: *J. Photopolym. Sci. Technol.* 32, 327 (2019). (c) J. Tanaka, T. Ishiguro, T. Harada, T. Watanabe, *J. Photopolym. Sci. Technol.* 33, 491 (2020).
- [12] A. Nakamoto, S. Yamakawa, T. Harada, T. Watanabe, "Grazing-Incidence Soft-Xray Scattering for the Chemical Structure Size Distribution Analysis in EUV resist," to be published to *Photopolym. Sci. Technol.* 35 (2022).
- [13] T. Watanabe, T. Haga, T. Shoki, K. Hamamoto, S. Takada, N. Kazui, S. Kakunai, H. Tsubkino, and H. Kinoshita, *Proc. SPIE*, 5130, 1005 (2003).
- [14] K. Hamamoto, Y. Tanaka, T. Yoshizumi, N. Hosokawa, N. Sakaya, M. Hosoya, T. Shoki, T. Watanabe, and H. Kinoshita: Jpn. J. Appl. Phys., 45, 5378 (2006).

- [15] K. Takase, Y. Kamaji, N. Sakagami, T, Iguchi, M. Tada, Y. Yamaguchi, Y. Fukushima, T. Harada, T. Watanabe, and H. Kinoshita, "Imaging Performance Improvement of an Extreme Ultraviolet Microscope," Jpn. J. Appl. Phys., 49 (2010) 06GD07.
- [16] H. Kinoshita, T. Yoshizumi, M. Osugi, J. Kishimoto, T. Sugiyama, T. Uno, and T. Watanabe, *Microelectronic Engineering*, 86, 505 (2009).
- [17] T. Harada, J. Kishimoto, T. Watanabe, H. Kinoshita, and D. G. Lee, J. Vac. Sci. Technol., B27, 3203 (2009).
- [18] T. Harada, Y. Tanaka, T. Watanabe, H. Kinoshita, Y. Usui and T. Amano, J. Vac. Sci. Technol., B31, 06F605 (2013).
- [19] H. Hashimoto, T. Harada, and T. Watanabe, Proc. SPIE, 9985, 99850K (2016).
- [20] T. Harada, A. Ohgata, S. Yamakawa, T. Watanabe, *Proc. SPIE*, 11908, 119080U (2021).
- [21] T. Harada, S. Yamakawa, M. Toyoda, and T. Watanabe, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 60, 087005 (2021).

講 演 者 略 歴



渡邊 健夫(わたなべ たけお)

所 属 兵庫県公立大学法人 兵庫県立大学
 学長特別補佐(先端科学技術・異分野融合研究推進担当)
 高度産業科学技術研究所 極端紫外線リソグラフィー研究開発センター長
 放射光ナノ工学研究分野 教授

住 所 〒678-1205 兵庫県赤穂郡上郡町光都3-1-2

連 絡 先 TEL:-0791-58-0249 (代表)、E-mail: takeo@lasti.u-hyogo.ac.jp

学 職 歷 1986年 関西医科大学 教養部 物理学教室 非常勤講師

- 1990年 大阪市立大学大学院理学研究科物理学専攻 後期博士課程修了
 - 1990年 理学博士(大阪市立大学) 素粒子物理学
 - 1990年 シャープ株式会社中央研究所に入所 DRAMの研究開発に従事
 - 1996年 姫路工業大学(現、兵庫県立大学)高度産業科学技術研究所 助手
 - 2004年 兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 助教
 - 2008年 兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 准教授
 - 2015年 兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 教授

同研究所 極端紫外線リソグラフィー研究開発センター長

- 2016年 兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 所長・教授
 - 同研究所 極端紫外線リソグラフィー研究開発センター長
- 2021年 兵庫県立大学 学長特別補佐(先端科学技術研究担当) 同大学 高度産業科学技術研究所 所長 同研究所 極端紫外線リソグラフィー研究開発センター セン ター長・教授

1997 年 兵庫県立大学 学長特別補佐 (先端科学技術・異分野融合研究推進 担当)

同大学 高度産業科学技術研究所長特別補佐 同研究所 極端紫外線リソグラフィー研究開発センター センター長・教授 現在に至る

- 研究・活動 極端紫外線リソグラフィーの基盤技術の研究開発(レジスト、マスク、光学系、
- 分野など 光学素子等)に従事

受賞歴

キーワード:半導体微細加工技術、EUV リソグラフィー、レジスト、マスク、 放射光科学、半導体市場

- ① International Conference on Photomask Japan 組織委員会委員長
- International Conference of Photopolymer Science and Technology 学会長、理事、EUVL Symposium Chai
- ③ フォトポリマー懇話会運営委員
- ④ EIPBN 国際会議プログラム委員
- ⑤ IRDS 半導体国際ロードマップ委員
- ⑥ 一般社団法人 次世代日本半導体製造協会会員
- ⑦ 兵庫県 次世代電池·半導体技術開発拠点推進協議会座長
- ① 第7回日本物理学会論文賞,渡邊健夫他、3月26日,2002.
 - ② Best Poster Award 1st Place, 2008 International Workshop on EUV Lithography, 2008.6.12.
 - ③ 2013 International Workshop on EUV Lithography, Best Paper Award, 2013.6.14.
 - ④ 大阪ニュークリアサイエンス協会賞, 渡邊健夫, 2016.5.26.
 - ⑤ 兵庫県立大学令和4年度研究活動教員表彰最優秀賞, 2022.7.27.