



半導体，強い日本へ

—EUV リソグラフィ基盤研究が規定する技術主権の実体—

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所
渡邊健夫 WATANABE, Takeo

1. はじめに

半導体は国家安全保障および経済安全保障の中核を成す基盤技術である。生成 AI の急速な進展により、GPU、CPU、高帯域幅メモリ（HBM）といった先端デバイスの重要性は飛躍的に高まっている。これらの性能は前工程における微細加工および後工程における三次元実装によって規定されている。その中で前工程の微細加工の中核に位置するのが極端紫外線リソグラフィ（EUVL）¹⁾である。

EUVL の技術の課題は、レジスト、マスク、光源であるが、個別要素の性能向上に単純に還元できるものではなく、各種確率的揺らぎ、表面汚染、光学劣化などの要因が相互作用し、プロセス全体としての不確実性が顕在化する。このため本質的な課題は各要素の最適化ではなく、複合系としての因果関係をいかに記述し、制御可能な形で理解するかにある。

すなわち、半導体技術の競争力は装置性能の優劣のみではなく、重要なことは観測された現象に対して説明を与えられる能力によって規定される点にある。本稿では、ニュースバル放射光施設における EUVL 基盤研究の経験をもとに、この「理解の内製化」こそが技術主権の実体であることを論じる。

2. ニュースバルにおける EUVL 基盤技術の体系化

ニュースバル放射光施設²⁾(図 1)は 1998 年に竣工し、2000 年より供用が開始された。筆者らは同時期より EUVL 露光装置の研究開発に着手し、三枚非球面ミラーによる縮小投影光学系を構築した³⁾。この光学系により、56 nm ライン・アンド・スペースおよび 40 nm 孤立パターンを確認し、さらに同期走査露光により 60 nm パターンの大面積形成を実現した⁴⁾。これらは ASET 国家プロジェクトにおいて、EUVL が量産技術へ展開可能であることを実証する成果であった。その後、SELETE, EUVA, EIDEC へと研究は継承され、20 年以上にわたる基盤研究の蓄積が形成された。しかし、実際の量産導入は 2018 年以降であり、研究開始から 30 年余りを要している。この長期性は、EUVL が単一技術ではなく、複数の物理現象が結合した複合系であることを明確に示している。



図 1 ニュースバル放射光施設の全景。EUVL 基盤研究を支える光源施設として 2000 年より供用開始。専用入射器による高安定運転により、露光・材料評価・表面科学解析を統合的に実施可能。

ニュースバルにおける特徴は、露光装置開発に加えて、レジスト反応解析、マスク欠陥観察、多層膜ミラー評価、表面汚染挙動、水素脆性評価といった複数の評価系⁵⁻⁹⁾を統合し、単一の知識体系として構築した点にある。これらは個別性能を測るための装置ではなく、因果関係を抽出するための装置群として設計されている(表 1)。

重要なのは、最終のレジストパターン形成結果に対して、「どの物理現象が支配的であったか」を分離・同定できる構造を持っている点である。EUVL においては、評価対象・測定物理量・技術課題は一対一対応を持たず、多対多の関係を形成する。このため、単一の評価では本質に到達できず、複数の観測を統合して初めて因果構造が浮かび上がる。

このような体系化は、単なる技術開発ではなく、「現象を説明可能にするための知識構造の構築」であり、ここに基盤研究の本質がある。

表 1 EUVL 基盤研究における評価対象・測定物理量・技術課題の対応関係 (ニュースバル)

評価対象	測定手法	測定物理量	対応技術課題
レジスト	分光・露光評価	感度, 反応収率, 確率的揺らぎ, 線幅粗さ (LER), 局所 CD 均一性 (LCDU), 欠陥密度	LER, 解像限界, 生産性
マスク	欠陥観察	欠陥サイズ・高さ・形状・分布	転写誤差
多層膜ミラー	反射率測定	反射率, 劣化挙動	光学性能低下
表面汚染	in-situ 分析	カーボン生成・除去速度	反射率低下, 寿命
材料 (水素脆性)	加速試験	劣化特性	信頼性 (ペリクル)

3. 基盤研究の欠如がもたらす構造的問題

EUVL のような複合系において基盤知識が欠如した場合、技術運用は不可避免的に経験則へと依存する。この状態では、表面的には動作しているように見えても、内部では因果関係が未解明のまま残存する。

その結果として、不具合が発生した際に原因の特定ができず、再現性あるプロセス設計が成立せず、トラブル対応を外部に依存する構造が常態化する。これは単なる技術力の不足ではなく、「理解が外部に存在する状態」であり、すなわち技術主権の喪失である。

この問題は特定の組織に固有のものではない。むしろ、装置性能の達成を優先する運用、短期的成果を評価軸とする制度設計において、構造的に発生しやすい問題である。すなわち、「結果が出ている限り内部を問わない」という姿勢そのものが、長期的には技術基盤を空洞化させる。

4. 探索型研究の必要性和制度的要請

Hyper NA EUV や EUV の短波長化といった次世代領域では、支配要因は単一ではなく、複数要因の相互作用として現れる。したがって問題は「どの要因が効いているか」ではなく、「どの組み合わせが支配条件を形成するか」という形に変化する。

このような領域において、「成功確率の高いテーマを選択する」という戦略は成立しない。なぜなら、成功確率は既知の因果関係を前提として定義されるものであり、未知が支配する領域ではその前提自体が成立しないからである。

ここで必要となるのが探索型研究である。すなわち、仮説空間を広く取り、要因分離を目的として体系的に検証を行う研究である。この研究は本質的に非効率であり、短期成果を前提とする企業活動とは整合しない。

したがって、この領域は国家および公的研究機関が担うべきであり、評価指標もまた短期成果ではなく、知識蓄積の質と量に基づいて設計される必要がある。特に重要なのは、失敗を排除するのではなく、失敗を通じて因果関係を特定する仕組みを制度として内包することである。併せて可能性があ

るものは全て探索をすることである。

5. 結論 — 技術主権とは何を持つことか

日本の半導体復興において最優先されるべきは、装置投資でも短期成果でもない。必要なのは、現象を自ら説明できる知識体系を国家として保持し続けることである。

技術の本質は、装置を操作できることではない。なぜその結果が生じたのかを記述できることである。この能力を内製化できるか否かが、技術保有国と装置依存国を分ける決定的な分岐点となる。

EUVL 基盤研究は、その典型例である。30 年余りにわたる研究の蓄積は、単なる技術開発ではなく、因果関係を記述する能力の構築過程であった。この蓄積こそが、未知の問題に対しても自律的に対応可能な技術基盤を形成し、失敗を恐れずに可能性のあるものは全て試してみることである。

したがって、今後の技術戦略においては、短期的成果の最大化ではなく、知識体系の継続的蓄積を中心に据えた制度設計が不可欠である。半導体が国家基盤であるならば、その競争力を規定するのは装置ではなく理解である。すなわち、技術主権とは、現象を説明できる能力を自らの内部に保持し続けることである。

参考文献

- 1) H. Kinoshita, T. Kaneko, H. Takei, N. Takeuchi, and S. Ishihara: “Study on x-ray reduction projection lithography,” Proc. of the 47th Autumn Meeting of the Japan Society of Applied Physics, Paper No. 28-ZF-15 (1986) pp.322.
- 2) A. Ando, S. Amano, S. Hashimoto, H. Kinoshita, S. Miyamoto, T. Mochizuki, M. Niibe, Y. Shoji, M. Terasawa, and T. Watanabe: “VUV and soft x-ray light source “NewSUBARU”, Proc. of the 1997 Particle Accelerator Conference (1998) 757-759.
- 3) 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 (2000) 2905-2910.
- 4) T. Watanabe, H. Kinoshita, K. Hamamoto, M. Hosoya, T. Shoki, H. Hada, H. Komano, and S. Okazaki: Jpn. J. Appl. Phys. 41 (2002) 4105-4110.
- 5) T. Watanabe and T. Harada: “EUVL Research Activity at Center for EUV Lithography,” J. Photopolym. Sci. Technol. 29 (2016) 737-744.
- 6) T. Watanabe, T. Harada, and S. Yamakawa: J. Photopolym. Sci. Technol. 34 (2021) 49 - 53.
- 7) T. Watanabe, T. Harada, and S. Yamakawa: Proc. SPIE 11908 (2021) 1190807.
- 8) T. Watanabe, T. Harada, and S. Yamakawa: Proc. SPIE PC12751 (2023) PC127510N.
- 9) T. Watanabe, S. Yamakawa, and T. Harada: Proc. SPIE PC12750 (2023) PC1275008.