焦　点

半導体微細化の動向と AI（人工知能）を用いた計測技術

国立大学法人　山口大学大学院 技術経営研究科 副研究科長・教授
（大阪大学　ナノサイエンスデザイン教育研究センター 招聘教授）
岡本和也
OKAMOTO, Kazuya

はじめに

1965 年，機能あたりの要素数の時間軸 4 点プロットから生まれたのがムーアの法則[1)]である。これが半世紀以上にわたり続き，同時にエレクトロニクス産業も収穫加速の法則に沿って進化を遂げてきた。ムーアの法則の基盤はトランジスタの微細化にある。そのゲート長など基本要素を 1/k に縮小化することでデバイス特性が向上するとともに，Si ウエハ上でのチップ取れ数が k^2 となる。これにより製造コスト削減という経済原理が働く。資本主義の思想そのものである。

この微細化は米インテルの事業戦略と見事に合致し半導体産業は加速した。その応用として指数関数的に進化した代表格はコンピューターである。これは個人レベルまで浸透し高度なネットワーク環境が構築され，現在の第三次 AI（Artificial Intelligence：人工知能）技術とも融和し産業構造に大きな変革を起こしている。事実，自動運転化技術やロボット化技術，画像および音声認識システムは人類の生活を変えるだけでなく，産業界におけるモノづくりや研究開発のあり方までを変革させつつある。

微細化をもたらした第一の鍵は光リソグラフィの革新である。LSI のパターン形成に縮小投影露光という世界最高峰の技術が適用され，28 nm 以下の半導体パターンの超微細化が進んだ。2019 年現在，設計ルール（Logic Industry “Node Range” Labeling）1.0 nm（2033 年）のトランジスタの議論がなされている（ただし，当該トランジスタの物理ゲート長は 12 nm である）。しかしながら，微細化の指導原理であるデナードのスケーリング則[2)]に基づく半導体技術は事実上破綻し，高度半導体技術は設計を含む複雑性から本来の経済性を中心に岐路にある[3)]。このために，半導体プロセスにおける高度な計測と AI の適用性が重要な位置づけにあると考えられる。

本稿では，1)産業の成長曲線から半導体の微細化の先端状況を概観し，主軸である光リソグラフィの延命化と全体最適について述べる。次に，2)そのための計測技術の重要性と統合計測の概念を提起し，3)統合計測の AI 化による新しい世界について考えてみたい。

１．産業の成長曲線と微細化における光子の活用・光リソグラフィ

図 1 に示すように，産業は萌芽期・成長期・成熟期からなる S 字型成長曲線（ロジスティック曲線）を描く。この曲線に沿って産業インフラが整うため，この流れは物理限界に至るまで続く。成熟期に至った後，物理限界近傍では多くの新技術が提案され，その中の一つがイノベーションとして採用され産業は高度化する。これにより，産業界のほぼ全ベクトルが揃い新たな仕様をもとに社会需要が拡張し，この新技術は浸透してゆく。

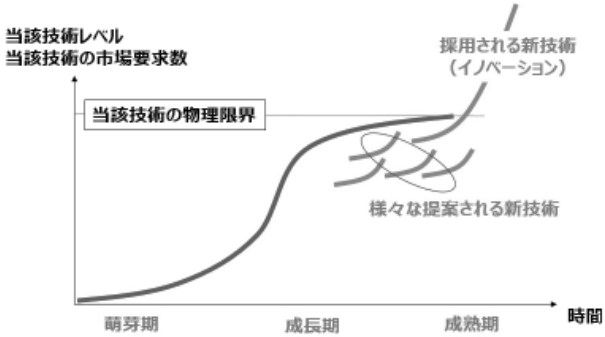

図１　産業の成長曲線

これを微細化の主題であるパターン形成・露光技術にあてはめてみる。X 線露光，電子線露光，自己組織化（DSA : Directed self - assembly），ナノインプリントなど多くの提案がなされたものの，成長曲線にのっている光の活用が未だ主流である（もちろん，他の技術も研究開発による技術進化はすさまじい）。この光リソグラフィは成熟期にあるものの，様々な創意工夫により延命化されており，筆者には未だイノベーションは見えていない。そのパターン解像度（Resolution）は光学顕微鏡の 2 点分解能を示すレイリーの式に半導体プロセス固有の係数を加えた式(1)に沿う。結像レンズの NA を上げる，露光波長 λ を短かくする，プロセス係数 k_1 を小さくする，といった明確な指針のもと，高解像度化に向けての研究開発は進められてきた。

$$\mathrm{Resolution} = k_1 \frac{\lambda}{\mathrm{NA}} \qquad (1)$$

（λ：露光波長，NA：開口数，k_1：プロセス係数）

レチクル（マスク）パターンを 4 : 1 に縮小投影露光する技術は，量子論での「ボーズ粒子（Boson）」である光子を利用した光リソグラフィ技術として構築され，光学性能のみならずシステム性能（ステージ制御技術など）の向上，周辺技術の高度化といった様々な技術が並行して進化することにより達成された。光子の代替として古くから期待された「フェルミ粒子（Fermion）」である電子は原理的にクーロン相互作用が生じ，処理能力向上に向けて露光量増大のためのビーム電流を上げることができない。そこで，マルチカラムやマルチビームなど電子ビーム露光数を並列的に増やす工夫がされてきたものの，露光システムとしての複雑性から実用化には至っていない。要は，光リソグラフィはシンプルなのである。さらに，現在の露光波長 193 nm（ArF エキシマレーザー）では純水は屈折率 n が 1.44 であることから，NA(=n・sinθ)>1（n：屈折率，θ：開き半角）の液浸露光が実現し，さらに k_1 を 1/x（x：露光回数に相当）にできる多重露光（SADP : Self-Aligned Double Patterning など）も実用化された。また，微細化の促進に向けて，パターン形成後のエッチングやデポジション等の周辺技術も高度に整備された意義も大きい。2018 年より露光波長 13.5 nm の EUVL（Extreme Ultraviolet Lithography）の量産実用化の機運が高まり，Fab 導入累積数 40 台（2019 年 7 月，ASML 公表値）に達し，一部の先端プロセッサに適用されている。しかし一方では，Stochastic Effect（露光のための光子数が十分ないために生ずる確率的影響）なども顕在化しており，課題解決のための技術開発と量産実用化とが並行して流れるという状況にある。

２．全体最適化の傾向と計測技術の重要性

この nm スケール半導体は微細化の延伸とともにデバイス特性を維持するため，図 2 に示すようにトランジスタ構造も変化した [4]。従来の 2D（プラーナー）構造から 3D 構造にシフト，かつ FinFET 構造から Lateral/Vertical GAA（Gate-All-Around）構造に変化している。また，トランジスタおよ

び構成される IP（Intellectual Property）ブロックを繋ぐ多層配線特性も重要になり，材料は Al から Cu，最近では Co の適用も開発されている。この中で効率的・効果的に製造を行うために発案されたのが，製造を考慮した設計コンセプト DFM（Design for Manufacturability）である。光リソグラフィの分野では SMO（Source Mask Optimization）および CL（Computational Lithography）として展開し，露光パターンを作るレチクル（マスク）および露光条件最適化が図られた。さらに，ベルギーの IMEC は微細化製造コストと歩留り向上を設計側から支援した DTCO（Design Technology Co-Optimization），それに加え実装を含む IC のさまざまな因子を包括的に考慮しデバイスシステムまで拡張した STCO（System Technology Co-Optimization）を提言している。時代は個別の要素技術の部分最適から，システム全体を俯瞰してなすべきことを行う全体最適にシフトしている。このような全体最適への進化の背景のなか，計測技術の重要性が見出された。

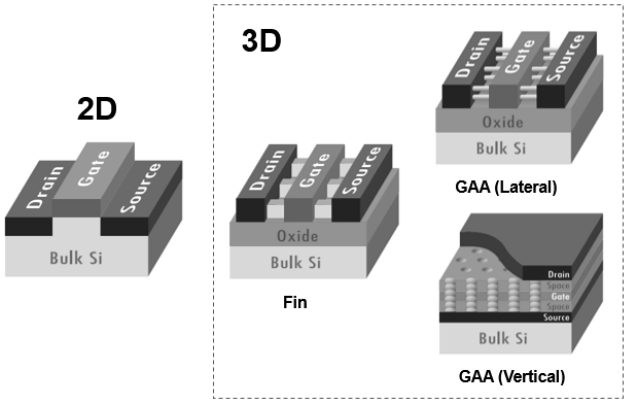

図 2　トランジスタの構造変化

さて，本稿ではここから計測技術に主題を移す。従来は検査・計測工程は付加価値を生まない不要なものとみなされていたが，高度な nm スケール半導体においてはこれを製造プロセスに積極的に取り入れ，半導体の歩留まり向上と高い生産効率が求められた。ここでの主眼は次の 2 点である。(A)製造プロセスの安定性:トランジスタ微細構造における構造のモルフォロジー,パターン寸法の分散性,構成材料の組成，安定性，チャネル領域のドーピング量，欠陥，歪などを計測し，デバイス特性の相関性を抽出すること，(B)製造ラインの安定性：各装置・工程に多くのセンサーを配備し常に状態を計測し，製造から技術まで半導体工場内のあらゆるデータを「見える化」すること。(B) においては，膨大なデータ（Big Data）の因果関係処理が求められ，AI の適用が不可欠にある。さらに，先端の半導体工場では AI 適用領域を予測・判断まで強化し，製造システムの自動制御に至っている。

３．統合計測と AI 適用による新しい波

nm スケール半導体の微細構造をつくりだす半導体プロセスの計測技術には，次の 3 つの分野が存在し，いずれも日本は高い競争力を誇っている。第 1 が検査技術（Inspection）であり，製造工程の欠陥検査や品質検査など，第 2 の計測技術（Measurement）はデバイスの 2 次元・3 次元形状計測やクリーンルームの環境計測など，第 3 の分析技術（Analysis）には界面偏析やドーパント分布，重金属汚染のような特性に影響を及ぼす微量元素挙動に関する物理分析や化学分析がある。本稿では，この 3 領域を合わせた包括的なシステム形態を「統合計測」と称することとする [5]。これはそれぞれの技術から供給される膨大なデータに対して最適な AI 技術の開発が必要であり，さらには AI 技術が自然に計測･分析装置の中に組み込まれた形での運用開発も重要となる。統合計測においては，従来は個別装置の性能向上が競争軸であったが，各装置を統合計測システムとして繋げることによる新しい価値を考える必要がある。具体的には，AI が組み込まれた装置に加え，システムとしての自動化や学習機能，さらには従来見えなかった領域のデータ抽出等，測定装置の枠を超えたソリューションとして

新しい価値創造の世界で競争優位を発揮する必要がある。これはまさに，計測分野でのパラダイムシフトのトリガーとなりえる。

従来の計測分野で考えた場合，電子顕微鏡や放射光・中性子などの粒子線利用分野，NMR や質量分析等の分野，走査顕微鏡や光学顕微鏡等，いずれも「波形，画像，信号」という各データの共通視点での AI 適用の議論が求められる。すでにオープンソースを用いて個別の研究者・研究拠点での適用が開始されている。しかしながら，統合計測に対する社会ニーズへのソリューションに対し，最適なアルゴリズムの検討やデータ収集・結果の妥当性に関する議論は，ライブラリとしての AI の未熟性も含めベクトルも定まっておらず，基礎・基盤的な課題抽出が重要と考える。

日本学術振興会研究開発専門委員会[5]では，上記に対して nm スケール半導体の進化に伴う日本独自の視点から世界標準を求め，国内の識者とともに産業界への有効活用を視野に入れた学術的検討を進めている。一般に，計測技術はそのデータの信頼性と信憑性が鍵である。この点では日々進化する AI の機械学習や深層学習はブラックボックス化された性格を持ち，計測・分析プロセスを明確にする統合計測指向とは必ずしも合致しない。画像解析においては最初に正解が必要であり，波形解析においてもノイズよりも真値が勝っている状況が必要である。そこには人の判断が入るが，統合計測の結果の信憑性と信頼性の観点からの AI 運用に対する最適解と具体的処方箋を与えるための課題抽出が求められる。さらに，統合計測を考える上では，各産業もしくは各企業の規模における特徴なども考慮する必要があり，単に最新の計測装置を導入するだけではなくシステムとして考える上で，どのようなことを論点として取り上げるべきかを，当専門委員会では議論している。

終わりに

半導体微細化の進化について最新情報をもとに概観し，全体最適の方向性から計測技術の重要性を述べた。ここでは，統合計測という新たな思想を加え，かつここに AI を組み合わせることでの新たな価値創造に関する取り組みを紹介した。半導体市場は，SEMI（Semiconductor Equipment and Materials International）によると 2017 年に初めて 400B 米ドル（～44 兆円）を超えた。日本の半導体産業は斜陽化しているとの考えは半ば誤りであると筆者は考えている。それは，高付加価値の半導体デバイス（CMOS イメージセンサーなど）に加えての 2 つの分野，すなわち半導体装置分野（57B 米ドル（～6.3 兆円）），半導体材料分野（50B 米ドル（～5.5 兆円））はいずれも日本が競争優位にあると判断されるからである。IoT・Big Data・AI のさらなる進化による半導体の需要拡大は自明であり，例えば本稿で述べた統合計測を基軸に新たな活性の道も考えられる。いずれにせよ，全世界に向けて本質的な価値を見出すことが大切であり，日本がこの分野で先駆的であり続けることを期待している。

参考文献

1） G. Moore: “Cramming more components onto integrated circuits,” Electronics, Vol. 38, No. 8, pp. 82-85, 1965.

2） R. H. Dennard, F. Gaensslen, H.-N. Yu, L. Rideout, E. Bassous, and A. LeBlanc: “Design of Ion-Implanted MOSFET’s with Very Small Physical Dimensions,” IEEE J. Solid State Circuits, Vol. SC-9, No. 5, pp. 256-268, 1974.

3） 岡本和也, 佐藤了平: “【解説・総説】半導体産業とシステムデザイン・インテグレーションの重要性 －先端微細化・3 次元化と実装技術の統合化に関する一考察－”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 21, No. 6, pp. 531-541, 2018.

4） システムデバイスロードマップ委員会（SDRJ）: https://www.sdrj.jp/.

5） 日本学術振興会研究開発専門委員会「自律型・複合型 AI 先端計測の新しい価値創造」: https://jsps-ai-imat.mot.yamaguchi-u.ac.jp/.