

半導体光露光装置は技術的限界を乗り越えたのか?*

経営学輪講 Henderson (1995)

Henderson, R. (1995). Of life cycles real and imaginary: The unexpectedly long old age of optical lithography. *Research Policy*, 24, 631–643.

田口 洋[†]・高橋 伸夫[‡]

要約：かつて、半導体の光露光装置は、「物理的法則」によって技術的限界を迎えると考えられていたために、次世代技術として、X線や電子ビームを用いた装置の開発が進められていた。しかし実際には、ユーザーの要求や選好の変化、部品性能の向上、および補完技術の進歩によって、光露光装置は「物理的法則」が示していた技術的限界を乗り越え、依然としてドミナント・デザインであり続けていると Henderson は主張する。果たして、本当にそうだったのか？

はじめに

Henderson (1995) によれば、多くの技術は、初期の揺籃期から、ドミナント・デザインの採用を経て成熟期を迎え、やがてドミナント・デザインが燃え尽きる (exhaustion) という結末に至ると考えられている。このライフサイクルの規則性は、人々が物理学の法則の知識から技術の限界を予言しうることを暗示している、と一部の研究者は考えている。しかし、技術がときどきその「自然の」限界を大幅に超えてきたという証拠もあると

* この経営学輪講は Henderson (1995) の解説と評論を田口・高橋が行ったものです。当該論文の忠実な要約ではありませんのでご注意ください。したがって、本稿を引用される場合には、「田口・高橋 (2010) によれば、Henderson (1995) は…」あるいは「Henderson (1995) は (田口、高橋, 2010)」のように明記されることを推奨いたします。

[†] 東京大学大学院経済学研究科 denkouyou_1027@hotmail.com

[‡] 東京大学大学院経済学研究科 nobuta@e.u-tokyo.ac.jp

いう。そこで Henderson (1995) は、半導体製造装置のひとつである露光装置の発達史をとりあげ、1977 年からずっと、今にも廃れると信じて疑われなかった光露光技術が、いまだに (1995 年当時、実は 2010 年現在でも) ドミナントであり続けているということを示し、技術の限界は、ドミナント・デザインの構造や物理的法則のみで決まるのではなく、①ユーザーの要求や選好の変化、②部品性能の向上、③鍵となる補完技術の発達によっても決まると、社会構築主義的な匂いのする結論で締めくくられる。

しかし、果たして本当にそうだったのか?

光露光装置の技術的限界

Henderson (1995) によれば、光露光装置のドミナント・デザインは、1966 年の Kulicke and Soffa 社の 686 モデルで確立した。しかしすでに 1970 年以前に、電子ビームや X 線を光源とした技術開発への投資が始まっており、1977 年までには、少なくとも 1 社が、電子ビームを用いた露光装置を限定的とはいえ使用していた。IBM 社単体でも、X 線を用いた露光装置に 10 億ドル以上を投資している。そして、1977 年から電子ビームや X 線の露光装置に関する記事が雑誌で掲載されるようになるのである。

Henderson (1995) によれば、専門家たちが光露光装置の死 (death) を最初に予測したのは、光よりも X 線や電子ビームの方が、波長 (wavelength) がはるかに短いからであった。なぜなら、露光装置の解像度 (resolution) は、「レーリーの式」(Rayleigh criterion) :

$$\text{解像度} = k_1 \times \text{波長} / \text{NA} \quad (1)$$

によって決まるので、波長を短くすれば、解像度が改善する (= 解像度の値が小さくなる) からである。

しかしよく見れば、このレーリーの式は、解像度が波長だけではなく、NA (numerical aperture)、¹ k_1 によっても決まることを示している。ここで k_1 は、様々な要因から決まる定

¹ Henderson (1995) では一貫して “numerical aperture” と表記されているが、今は「NA」と記されることの方が多い。日本語では「開口数」と訳される。もともと “aperture” はレンズの口径の意味もあり、Henderson (1995, p. 636) では、“numerical aperture” は「レンズのサイズ」と説明されているが、「レンズの明るさ」の方が正しい。NA を正確に定義すると、空气中 (「ドライ」と呼ばれる) で、ウェハ上のある 1 点に結像する光束の広がり (最大入射角) を θ としたとき、 $\text{NA} = \sin\theta$ と定義される。したがって、ドライの場合には、NA は 1 を超えることはない。近年の「液浸」ではレンズとウェハ (正確にはレジスト) の間を空気よりも屈折率の高い水 (純水) で満たすことで、ドライでの臨界角を超えて、より大きな角度の光をレジスト内に形成できるので、 $\text{NA} = 1.436 \sin\theta$ と NA はドライの 1.436 倍になり、1 を超えることも可能である。実際、

Henderson (1995)

数 (constant) で、1977 年には $k_1 \doteq 1.0$ だと信じられていた。NA についても、1977 年当時は、大きくしても 0.167 が限界だと考えられていた。つまり、解像度 = 波長 / 0.167 ということなので、1970 年代末期の光源であった g 線の波長が 436 nm (=0.436 μm) であったことから解像度は 2.6 μm ということになる。より波長の短い光源もありうるが、Henderson (1995) によれば、当時の専門家は i 線 (365 nm) よりも短い波長を使うことは難しいと信じていたので、すると光露光装置の解像度は 1.44 μm が限界² ということになってしまったという。

では、なぜ NA は 0.167 が限界だと考えられていたのか？ Henderson (1995) によれば、光学技術が比較的成熟してしまっているのに、NA をもっと劇的に大きくすることは見込みがないと専門家が考えていただけではなく、焦点深度 (depth of focus) との間にトレードオフの関係があったためだという。焦点深度とは、ウェハ上に正確に結像するために要求されるウェハ表面の凸凹の許容限界を表わしているもので、次のような式で求められる。

$$\text{焦点深度} = k_2 \times \text{波長} / \text{NA}^2 \quad (2)$$

ここで k_2 は定数 0.5 とされている。つまり、(1)式で解像度の値を小さくするために NA を大きくすると、今度は(2)式の方で焦点深度が小さくなってしまおうという問題があったのである。Henderson (1995) によれば、1980 年代初め、半導体デバイスメーカーは、解像度の 3 倍の焦点深度を求めていたという。つまり、解像度 $\times 3 =$ 焦点深度 に(1)式、(2)式を代入して、

$$3 \times (k_1 \times \text{波長} / \text{NA}) = k_2 \times \text{波長} / \text{NA}^2$$

ここに、定数 $k_1 = 1.0$ $k_2 = 0.5$ を入れて、この方程式を解くと、 $\text{NA} = 1/6 \doteq 0.167$ が得られるというわけである。³

ArF 液浸では NA は 1.35 と 1 を超えている (社団法人電子情報技術産業協会, 2009, p. 216)。

² Henderson (1995, p. 636) に記された i 線の波長 240 nm は、365 nm の間違いである。仮に i 線の波長が、Henderson が間違った通りの 240 nm だったとすると、 $k_1 \doteq 1.0$ 、 $\text{NA} = 0.167$ の条件下で、解像度の限界を算出すると 1.44 μm となり、この数字が p. 636 にも明記されている。しかし i 線の本当の波長は 365 nm なので、正しい波長を使って計算すると、それ以外の条件が同じならば、解像度の限界は 2.19 μm ということになる。つまり後述するように、「2 μm より微細化は難しい」ということになる。

³ この方程式を立てて解く部分は Henderson (1995) の p. 637 の脚注 7 にあるが、なぜか $\text{NA} = 0.170$ とされてしまっている。しかし、簡単に出てくる答なので、 $1/6 \doteq 0.167$ が正しい。それに、

こうして光露光装置の解像度の限界が予測されるようになってしまい、1980年代の終わりまでには、X線や電子ビームが光露光装置に取って代わるものと期待されていたというのである。

変化した技術的限界

ところが、実際には、光露光装置は長期間にわたり、ドミナント・デザインであり続けた。Henderson (1995) は、その理由として、次の三つを挙げている。

①解像度と焦点深度の比率の変化【ユーザーの要求や選好の変化】

解像度の3倍の焦点深度を要求していた半導体デバイスメーカーは、焦点深度の制約をなんとかするために取り組み、焦点深度は解像度の1倍にまでなり、その結果 $NA=0.5$ まで限界が上がった。⁴

②反射レンズから屈折レンズへの移行【部品性能の向上】

1974-1980年の間、光露光装置は、反射鏡 (reflective lens) を用いた scanning projection alignment 技術⁵ による光露光装置であった。たとえ焦点深度の制約による NA の限界が 0.167 から 0.5 まで上がったとしても、実際に 0.167 以上の NA を実現することは、反射鏡では非常に困難だった。こうした中で、1978年に屈折レンズ (refractive lenses) を用いた光露光装置が登場し、⁶ 1980年代初めに日本のニコンとキヤノンが参入すると、レンズ・デザイン (lens design) でブレークスルーが起きた。

③補完技術の進歩による k_1 の引き下げ

k_2 は定数 0.5 とされているが、 k_1 の値の方は、実は補完技術によって変ってくるものだった。制御技術の進歩、レジスト・システムの改善、アライメント技術の高性能化によって、⁷ それまでほぼ 1.0 と考えられていた k_1 の値は約 0.8 に下がり、さらにコントロー

0.170 では、もともと NA の限界として p. 636 で挙げられていた数字 0.167 とも合わなくなってしまう。

⁴ この 0.5 という数字も、前述のような簡単な方程式を解けば得られる。

⁵ 後述する等倍ミラー・プロジェクション露光方式。

⁶ Henderson (1995) には明記されていないが、米国 GCA による「ステッパ」(stepper) のこと。ステッパについては後述する。

⁷ Henderson (1995) には詳しい説明がほとんどないが、 k_1 の値の改善には、光露光装置だけでなく、

ルされた状況下においては0.5程度まで引き下げることが可能であるとされている。

こうして Henderson (1995) は、光露光装置の解像度が、従来考えられていた技術的境界をはるかに超えて改善されたために、電子ビームや X 線を使った代替的な露光装置の開発にもプレッシャーとなり、⁸ 光露光装置は現在でもドミナントであり続けているとするのである。

Henderson (1995) が見ていたもの

以上のような技術的境界が変化するという部分の Henderson (1995) の記述は分かりにくい。それは、変化をレーリーの式(1)式に登場する変数のうち、波長を除く、NA、 k_1 によって整理しようとしているからである。それでは、実際にはどのような技術的变化があったのだろうか？ 実は、今では岡崎他 (2003) のような半導体製造装置に関する入門書でも歴史として説明されている。それを簡単に整理しておこう。

半導体の光露光装置は、最初、実際のシリコンのウェハと同寸のマスク⁹ を作り、それをウェハに密着させて光を全面に照射するという「コンタクト露光」方式から始まった。解像度よりも位置合わせ（アライメント）に重きが置かれ、「アライナ」と呼ばれていた。実は Henderson (1995) は、光露光装置のことを一貫して“optical photolithographic aligner”つまりアライナと呼んでいるが、この頃の名残なのである。このコンタクト露光方式では、解像度は10–5 μm で、1 kb、4 kb、16 kb の DRAM はこの方式で作られていたといわれる。ただし露光ごとにウェハと密着するために、次第にマスクが痛んで歩留まり

様々なプロセス技術の改善が含まれる。たとえば、ウェハ上に塗布するフォトレジストに関連した技術、ポスト・バイクと呼ばれる露光プロセス後の熱処理プロセス技術、さらに、1990年代に一気に導入が進んだウェハ表面の凹凸を研磨粒子や研磨圧の物理的な作用と薬液の化学的な作用で平面化させる平坦化（CMP）技術（佐藤，2010）がある。また、マスク技術として、位相シフト法や変形照明法などの開発もプロセス技術の改善に含まれる。なお、Henderson (1995, p. 641) はアライメント技術の高性能化も k_1 を改善するとしているが、筆者の一人（田口）が半導体製造装置メーカーをインタビューしたところ、 k_1 の値に影響を与えないとのコメントを得たので、注意が要る。

⁸ 実際、電子ビームを用いた装置は、光露光装置と比べてスループットが悪いことから、半導体露光装置としては普及しなかったが、マスクを製造するための装置としては使用されている。

⁹ マスクあるいはフォトマスクとは、表面の遮光膜にごく微細な回路パターンが描かれた透明なガラスまたは石英の板で、回路をウェハに焼き付けるときのいわばネガ（原版）にあたるものである。この頃のマスクは、10倍の大きさの1個分のIC回路パターンを搭載したレチクルの像をレンズでマスク基板上にステップ・アンド・リピート方式で縮小露光して製作していた。このマスク製作技術が、後のステッパの基礎になり、ステッパ以降は、ウェハの露光に使われる原版はレチクルと呼ばれるようになる。

が下がったり、密着時に位置がずれたりするという欠点があった。このためマスクとウェハを密着させずに 10–30 μm 程度の間隙（プロキシミティ・ギャップ）を空ける「プロキシミティ露光」（近接転写露光）方式も開発されたが、実用上の解像限界は 4 μm 程度だった。

そこで 1970 年前後に発表されたのが、凹面鏡と凸面鏡を組み合わせた「等倍ミラー・プロジェクション露光」方式である。ただし、結像性能の良い位置に限られるので、マスクとウェハを同期させて動かして（後で登場するスキヤナのコンセプトの原型）、ウェハの一括走査露光を行っていた。この光露光装置は 1980 年前後には主力となり、64–256 kb の DRAM はこの方式で作られていた。解像度は 3–2 μm だったが、ただし 1980 年代中頃には、高 NA 化は 0.17 前後が限界で、2 μm より微細化は難しいといわれていた（脚注 2 も参照のこと）。Henderson (1995) が技術的限界云々を言っていたのはこのことだったのである。

そして、ここで光露光装置のアーキテクチャは大きく変わることになる。ここまでの光露光装置は等倍であり、またウェハ全面を一括露光するという方式であったために、ウェハ全体の平面度の管理が難しく、焦点深度を大きくしておきたいという要望はどうしても強くなってしまっていた。また光学系もミラー系だったので高 NA を実現することは難しかった。

それに対して、これ以降の光露光装置は、光学系として高 NA 化が可能なレンズ系を採用した（等倍ではない）縮小投影露光方式であり、レンズ系では画面の大きさが限られるので、一括露光ではなく分割露光となった。そのため、それまでマスク製作に使用していたステップ・アンド・リピート技術を今度はウェハ露光に応用することになり、こうして登場したのが「ステッパ」である。分割露光にすることで、ウェハ全体ではなく、1 回分の露光領域だけ平面度を気にすればよくなるので、焦点深度に対する制約は格段に緩和された。さらに、「スキヤナ」（走査型縮小投影露光装置）になると、個々の露光領域をスリットでスキヤンしながら焼き付ける方式なので、画面サイズがさらに小さくて済み、焦点深度に対する制約はさらに緩和された。こうして、Henderson (1995) は触れていないが、一括露光から分割露光へと変わったことが決定的に効いて、NA が大きくなると焦点深度が小さくなるという(2)式の問題点を回避して、飛躍的な高 NA 化の可能性が生まれたのであった。そして実際に、レンズ系の採用が高 NA 化を実現していく。

要するに、Henderson (1995) は、等倍ミラー・プロジェクション露光方式の光露光装

置からステップに切り替わる際に起きたことを、光露光装置の技術的限界が変化して、光露光装置のライフサイクルが延びたと主張しているのである。しかし、その理解は正しいのだろうか？ むしろ、等倍ミラー・プロジェクション露光方式がドミナント・デザインだったライフサイクルは一旦終了、次にステップ/スキャナがドミナント・デザインとなったライフサイクルが始まったと理解した方が自然ではないだろうか。これだけアーキテクチャが異なる装置を、X線や電子ビームを使っているわけではないから「光」露光装置であると、光源の波長のみで同じものに分類してしまったことが、ライフサイクルが伸びているように見えた原因ではないだろうか？

さらに Henderson (1995) は、技術の限界は、ドミナント・デザインの構造や物理の法則のみで決まるのではなく、①ユーザーの要求や選好の変化、②部品性能の向上、③鍵となる補完技術の発達によっても決まるとしているが、実際には、少なくともステップ/スキャナの登場時には、ドミナント・デザインの構造の変化と物理的法則によって新しい技術の限界が決まった（緩和された）と考えるのが自然だろう。また Henderson (1995) は、①ユーザーの要求や選好の変化を理由に挙げているが、実際には光露光装置のユーザーである半導体メーカーの要求や選好が変化するというよりも、光露光装置自体が、ウェハの平面度をあまり必要としないアーキテクチャに変化したのであり、そこに社会構築主義的な匂いはない。

そして、おそらく一番の基本的な問題点は、波長が光露光装置のドミナント・デザインを決めるという暗黙の前提であろう。確かに、光露光装置の世界では、波長の選択が研究開発の第一歩といわれている。なぜなら、波長を変えると（変更すると）、レンズの硝材やレジスト・プロセスといった物理、化学までも変える必要が出てきて、システム全体の開発の負荷が大きいためである。それゆえ、光露光装置の歴史は、光源の波長によって分類され、あたかも短波長化の歴史のように並べられることになる。しかし、よく考えてみると、それと光露光装置のアーキテクチャはあまり関係がないのである。

たとえば、Henderson (1995) が扱っていた時期のコンタクト/プロキシミティ露光、等倍ミラー・プロジェクション露光の光露光装置では超高圧水銀灯を光源に、十分な強度を持つ輝線スペクトルの中から、可視光域で最も波長が短い g 線 (436 nm)、紫外域の h 線 (405 nm)、i 線 (365 nm) が用いられていた。ところが、ステップは、レンズ系の紫外域の硝材の未成熟から g 線に戻って始まるのである。やがて、レンズ系の紫外域の硝材開発が進んだことで、次は i 線にスキップした。そしてその次は、どうせこれ以上短波長

になると硝材は石英になるということで、石英と相性のいい紫外レーザを光源としたフッ化クリプトン KrF エキシマレーザ (248 nm) にまで波長はスキップし、さらに硝材として蛍石が開発されたことで、フッ化アルゴン ArF エキシマレーザ (193 nm) へと移行した。つまり、ステッパの登場前とステッパ以降とは、明らかにアーキテクチャが異なるのであり (別のドミナント・デザイン)、しかも、波長がドミナント・デザインを決めたのではない。ステッパ/スキャナでは、ドミナント・デザインがレンズ系の硝材との関係で波長を決めてきたのである。

つまり本稿の結論は、Henderson (1995) とは異なる。1980 年前後にドミナント・デザインであった等倍ミラー・プロジェクション露光方式は、結局、その技術的限界を乗り越えることはできずに、そのライフサイクルを終えたのである。かつ、それに取って代わった次の世代のドミナント・デザインは、1970 年代の大方の専門家の予想が外れ、【可視光・紫外線】→【X 線・電子ビーム】という波長的なパラダイム・シフトではなく、【ミラー系/等倍/一括露光】→【レンズ系/縮小/分割露光】というアーキテクチャ的なパラダイム・シフトで生まれたものであったということである。そして、2010 年現在でもその【レンズ系/縮小/分割露光】パラダイムの中で、短波長化・高 NA 化が進んでいる。

参考文献

- Henderson, R. (1995). Of life cycles real and imaginary: The unexpectedly long old age of optical lithography. *Research Policy*, 24, 631–643.
- 岡崎信次, 鈴木章義, 上野巧 (2003) 『はじめての半導体リソグラフィ技術』工業調査会.
- 佐藤淳一 (2010) 『よくわかる最新半導体製造装置の基本と仕組み』秀和システム.
- 社団法人電子情報技術産業協会 (2009) 『IC ガイドブック』日経 BP 企画.

赤門マネジメント・レビュー編集委員会

編集長 新宅 純二郎

副編集長 天野 倫文

編集委員 阿部 誠 粕谷 誠 高橋 伸夫 藤本 隆宏

編集担当 西田 麻希

赤門マネジメント・レビュー 9巻8号 2010年8月25日発行

編集 東京大学大学院経済学研究科 ABAS/AMR 編集委員会

発行 特定非営利活動法人グローバルビジネスリサーチセンター

理事長 高橋 伸夫

東京都文京区本郷

<http://www.gbrc.jp>