



Hitotsubashi University
Institute of Innovation Research



一橋大学イノベーション研究センター

東京都国立市中2-1
<http://www.iir.hit-u.ac.jp>

光リソグラフィの技術進化^a

- 相変化プロセス一般化の試み -

龜山 雅臣

一橋大学イノベーション研究センター 客員研究員^b

^a [謝辞] 本稿を執筆するきっかけとなったのは、一橋大学イノベーション研究センターの科研費プロジェクト：「産学官連携によるイノベーション過程の研究」に研究担当として参加する機会が与えられたことによる。本稿を執筆する機会を提供して頂いた一橋大学イノベーション研究センターに深く感謝致しますと共に、本稿完成のためご指導頂いた一橋大学イノベーション研究センター中馬宏之教授に心から御礼申し上げます。

^b 現在の所属は一般社団法人日本半導体製造装置協会、及び一橋大学イノベーション研究センター客員研究員

光リソグラフィの技術進化

- 相変化プロセス一般化の試み -

龜山 雅臣

一橋大学イノベーション研究センター 客員研究員

1. はじめに

1947年に米国のBell研で生まれた半導体素子は、現在までに驚異的な進歩を遂げてきている。その進歩の根幹を占めるのが、“トランジスタをより小さく作り、より多く集積する”技術であり、それを可能にしてきたリソグラフィ技術の進歩である。実際に、半導体素子を製造する技術としてのリソグラフィは半導体素子が実験室レベルにあった1950年代から現在までの約60年間にわたり微細化を推進し半導体素子の進歩を支えてきた。

半導体素子の進歩に伴い、リソグラフィへの要求は高度なものとなり、その時々において最善と思われる技術が選択されてきている。しかし不思議なことに、ごく初期を除き、その時々で選択されたリソグラフィ技術は世界中で同じであり、また、量産を対象として過去に選択されたリソグラフィは全て光リソグラフィである。また、光リソグラフィの技術的な変遷を歴史的に振り返り、微細化を実現してゆく過程に注目すると、それぞれの要素技術が集約するタイミングに、或いは前提としていた制約条件が取り除かれることにより新規の可能性(技術)が生じた時に変化が生じている。

図8に示したが、1960年に\$30/1個で販売されていたトランジスタは、今年中か来年には10億分の1ドルにまでトランジスタ1個の価格が下がる。更に、1億個のトランジスタを組み合わせ機能を持たせても1cm四方に楽に入れられることから、“全ての物の中に存在する、なくてはならない物”のようにすることが可能となる。この半導体素子の進歩を支えている光リソグラフィの開発に伴う技術の選択に本稿では注目している。

光リソグラフィ開発の歴史を辿ると、初期のころは歩留まりの追求が主な露光装置開発の競争要因であり、露光装置の構成・概念が問われていた。しかし、1970年代中ごろから、このような競争要因に変わり、ひたすらに微細化が追求される時代が訪れ、1980年代に入ると、歩留まりの追求に最適な露光装置の構成が固まり選択されたことにより、“微細化→同じものが安く作れる→高機能化”→微細化の成長の方程式が起動し、半導体産業の躍進につながって行く。微細化をひたすらに追及する過程で、露光装置・マスク・材料・CAD/EDA等のリソグラフィを構成する要素が単独では開発の方向を決められなくなり、各要素技術を同期して開発する必要性が増した。情報と時間軸の共有が必要となり、IMEC, SEMATECH等のコンソーシアム活動の設立やITRS(ロードマップ活動)に繋がっている。

さらに、半導体産業の初期には差別化の手段として考えられていたリソグラフィが、現在では巨額の開発費と、上述した広範な技術の同期を必要とすることから業界内で“規格化”された技術として扱われ始めたことを指摘したい。8節、9節で詳しく述べるが、開発費を考えると、単独で開発するには規模が大き過ぎることもある。しかし、半導体産業にとってより重要なのは、微細化のスケジュールを順守(Mooreの法則の順守)することである。

エンドプロダクツに対し、より高性能或いはより安い半導体素子を提供し続けるためには継続的な微細化が欠かせず、微細化で差別化するよりも、微細化を前提にした半導体素子の機能の提供での差別化を半導体産業は選択している。半導体産業も、技術から何を作るかの企画に差別化の対象を変えていることを示した。

本節に続く2節から6節に半導体素子とリソグラフィ技術の変遷をまとめた。更に、7節の初めにリソグラフィに要求される3点を示し、引き続き、7節から9節に議論と考察とまとめを示した。3節で何故微細化が重要かを説明することで、4節から6節に書かれた光リソグラフィの開発の背景を示すことで、時期を守りながら微細化を達成するようにと懸かる半導体産業からの圧力を示している。

2. 半導体の進歩

世界最初^cの汎用デジタルコンピュータ「ENIAC」は1946年に真空管17,468本と70,000個の抵抗器、10,000個のコンデンサ等を使用してペンシルベニア大学で完成した。10進法を採用し、プログラムは配線を変更することで行い、消費電力174kW、大きさは24Wx2.5Hx0.9D(m)で重量は30トンと記録されている^d。後に、このENIACは1995年にCMOSトランジスタでチップとして再現されている^e。

1947年にBell研のWilliam Shockley, John Bardeen, Walter Brattainにより、ゲルマニウムを使った点接触型の最初のトランジスタが発明され、シリコンを使用した最初のトランジスタは1954年にテキサス・インスツルメンツ(TI)のGordon Tealにより開発された。1959年にテキサス・インスツルメンツのJack St. Claire Kilbyが半導体集積回路の回路を構成するもつとも基本的な特許を出願した^f。(電子部品を1個ずつハンダで取り付けて電気回路を構成するのではなく、それらの部品が果たす機能を全部まとめて一緒に一つの電気回路として製造する技術で集積回路の考え方となる。)この特許はKilby特許としてとして後々まで名高い。同年、1959年にRobert Noyceも半導体集積回路の考え方の特許を出願した^g。KilbyとNoyceは別個にそしてほぼ同時に集積回路の概念を発明したと現在は考えられている。図1にNoyceの特許の中に記述されている図を示したが、そこには結晶シリコンの表面を酸化膜で覆う、酸化膜を食刻する(エッチング)、不純物の導入など、現在の半導体製造の基礎となる技術が書かれている。

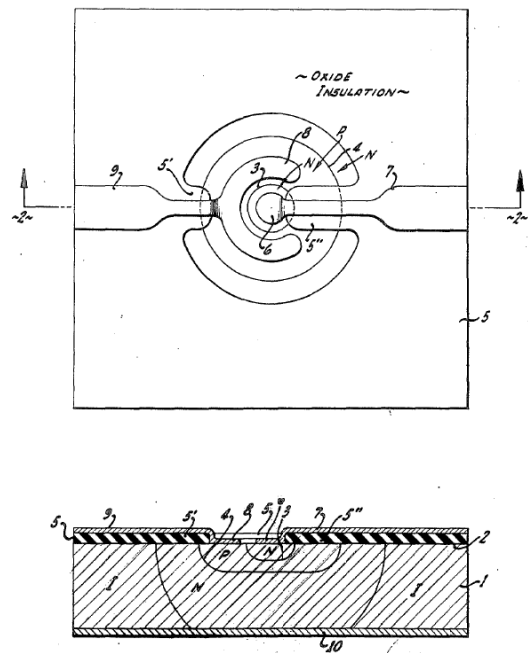


図1. U.S. Patent 2,981,877, Robert N. Noyce^d

^c 世界最初のコンピュータは定義により異なる。1939年に試作されたアイオワ州立大学の「アタナソフ&ベリー・コンピュータ: Atanasoff-Berry Computer (頭文字をとってABCと呼ばれることもある。)」が世界最初とする意見もある。

^d Gregory C. Farrington, "ENIAC: The Birth of the Information Age", Popular Science Mar 1996, p.74

^e 1995年にペンシルベニア大学は「ENIAC」を0.5μmのCMOSプロセスで再現した。チップサイズは7.44mm x 5.29mmで、174,569個のトランジスタを集積している。

Jan Van Der Spiegel, "ENIAC-on-a-Chip",

<http://www.upenn.edu/computing/printout/archive/v12/4/chip.html>

<http://www.seas.upenn.edu/~jan/eniacproj.html>

^f テキサス・インスツルメンツ(TI)のホームページに特許や実験の写真がある。

http://www.ti.com/corp/graphics/press/image/on_line/co1034.jpg,

Kilby, U.S. Patent 3,138,743, "Miniaturized Electronic Circuits"

^g Noyce, U.S. Patent 2,981,877, "Semiconductor Device and Lead Structure"

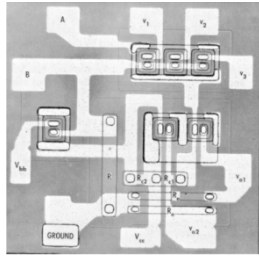


図 2. Motorola 1966^e.
Bipolar Logic, ECL 3-input gate

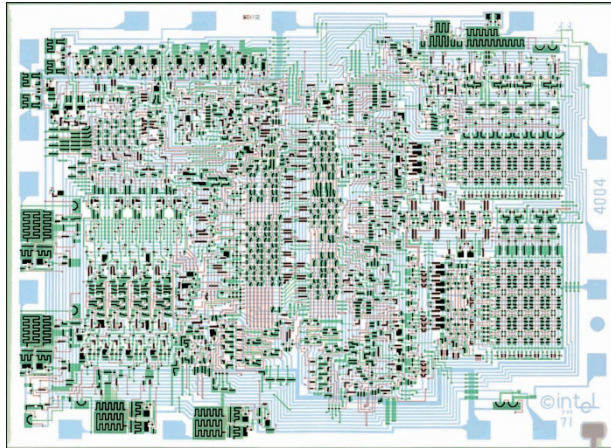


図 3. Intel 4004 Micro Processor^f (1971)
2,300 p-MOS, 108kHz Operation → 図 3.

Kilbyの特許は1964年に、Noyceの特許は1961年に特許発効日を得て、この技術は瞬間に実用化され、1966年には、モトローラが図2に示すようなバイポーラトランジスタ6個を1チップに集積したロジックを商品化している^h。更に1971年にはインテルが図3に示す2300個のp-MOSトランジスタを集積したLogic(4004 Micro Processor)を開発し市場に投入しているⁱ。

1965年にインテルのGordon Mooreは論文¹⁾上に後に“ムーアの法則”として知られる将来予測を示している。前述したように、1959年にKilbyとNoyceによって1つの基板に複数のトランジスタを作る方法が示された。1962年に6個、1963、4年に16~32個、そして1965年には64個のトランジスタが集積された実績値が報告されていた。Mooreはトランジスタの集積度が1年で倍になると想定し、単純な外挿から、1975年には64,000個のトランジスタが集積されても不思議ではないと予測し、1975年のIEDMで彼は自らの予測が正しかったことを図4のデータ²⁾で示している。この時、同時に、今後は2年で2倍のペースになると見通しを修正している。

現在、ITRSなどの議論ではトランジスタの集積度が2年で2倍になるとしている。インテルのマイクロプロセッサでは1970年から2011年の現在まで、集積度(トランジスタの数)の向上^jは図5に示すような挙動を示してお

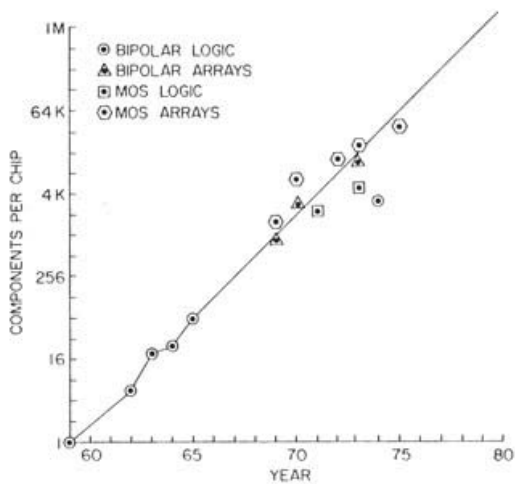


図 4. Moore's Law (1975)²⁾

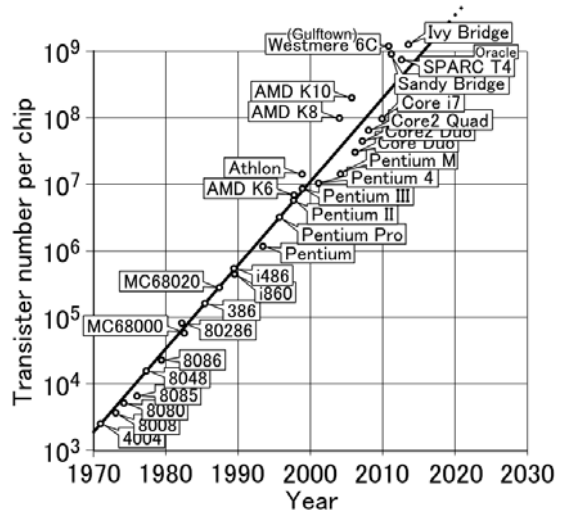


図 5. Transistor number's trend (Moore's Law)^j

^h Jan M. Rabaey, Anantha Chandrakasan and Borivoje Nikolic, “Digital Integrated Circuits”,
http://didattica.arces.unibo.it/file.php/4/Elettronica_dei_sistemi_digitali/Slides/chapter01.pdf

ⁱ インテルは世界最初のマイクロプロセッサの情報公開を開始、ホームページを立ち上げている。
<http://www.4004.com/>

^j <http://pc.watch.impress.co.jp/docs/column/>

http://www.ieee.org/portal/site/sscs/menuitem.03b952adb138c3fce828105bac26c8/index.jsp?&pName=sscs_leve1_article_list&TheCat=2165

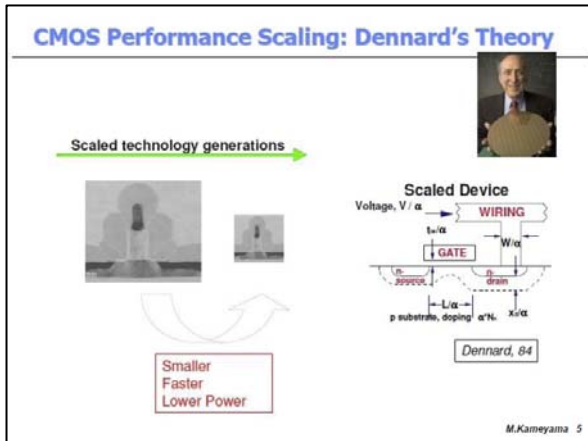


図 6. トランジスタのスケーリング³⁾

<u>Device or Circuit Parameter</u>	<u>Scaling Factor</u>
Device dimension t_{ox}, L, W	$1/k$
Doping concentration N_a	k
Voltage V	$1/k$
Current I	$1/k$
Capacitance eA/t	$1/k$
Delay time per circuit VC/I	$1/k$
Power dissipation per circuit VI	$1/k^2$
Power density VI/A	1

表 I: Scaling Results for Circuit Performance (from Dennard)

り、Mooreの法則に従っていると言える。また、図5に示されているように、チップ上のトランジスタの集積度は10億個を超えている。図5に示されている、インテルが2012年に発表した最新のマイクロプロセッサで開発コード名 "Ivy Bridge" はデザインルール 22nm で 160mm² のチップ上に 14 億 8 千万個のトランジスタを集積して作られており、Moore が予測した線に乗っている。

さらに、2013年のISSCC(IEEE International Solid-State Circuits Conference)でIBMが27億5千万個のトランジスタを598mm²のチップに集積したメインフレーム用のプロセッサを発表している。

このような半導体素子の高集積化は以下の三点に集約される長所を進展させるために推進されてきた。一点目が微細化である。MOSFET トランジスタの信号をデジタルとして扱う限り、微細化をしても信号の性質は変わらず、微細化を許容した。二点目はトランジスタの性能向上である。Robert Dennard³⁾は1974年に図6に示すようにMOSFET トランジスタの微細化は同時にトランジスタ密度の向上、スイッチング速度の向上そして消費電力の削減をもたらすことを表1のように示した。そして三点目はトランジスタの製造原価低減である。Noyceが示したトランジスタの製造方法は、図7に示したように原理的に単位面積当たりのトランジスタの個数が異なってもウェハ1枚の製造コストは同じになる。シリコンウェハ上にMOSトランジスタを1個作ろうと1億個作ろうと製造工程が同じであればウェハ1枚あたりの製造コストは変わらない。しかしトランジスタ1個の価格は1億分の1になる。

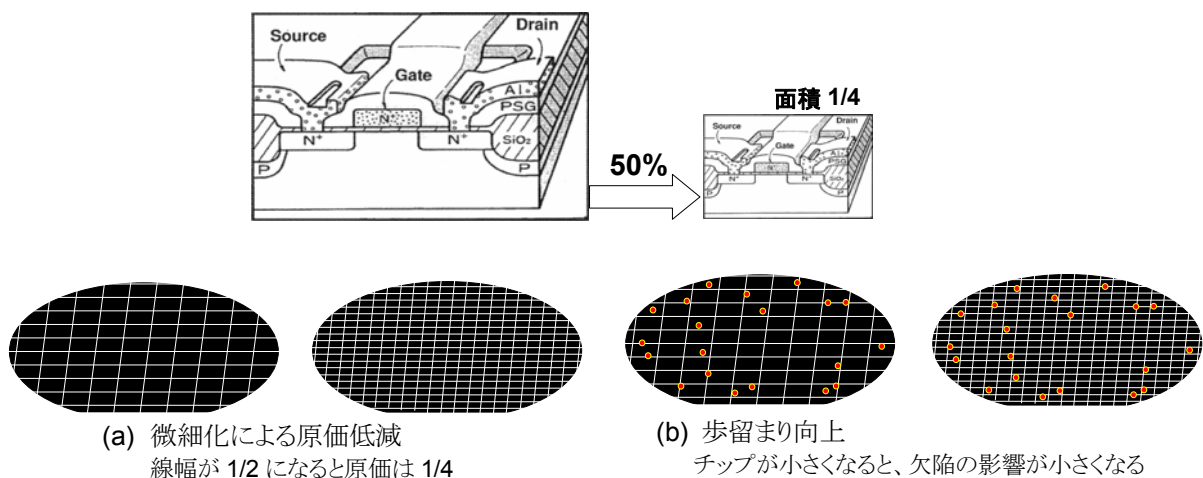


図 7. 微細化による原価低減

例えば、A4の紙にプリンタでバラの花を1輪大きく印刷する。バラの花1輪の印刷費用は紙代含めて10円だったとする。同じくA4の紙にプリンタでバラの花を100x100入るように縮小し、1万輪のバラを印刷する。1枚の印刷費用は同じなので紙代含めてやはり10円になる。縮小したバラは1輪が1/1,000円となる。この考え方は大きさが無いと価値を感じられないバラの場合には気になるが、大きさに価値がない、機能だけが必要となる用途では、大幅なコスト削減手段と考えることができる。

1970年代から80年代に掛けて、微細化は3年で線幅が0.7倍になる速さで進んでいた。これは集積度が3年で2倍になるのに相当する。これにチップサイズの拡大と設計上の工夫が加わり、3年で4倍の集積度の増加があった。90年代の半ばから微細化のペースは上がったが、同時にコストを抑える必要から、チップサイズの増加は抑えられ、結果として現在まで集積度の向上は2年で倍ペースが続いている。

1953年にゲルマニウムの単体トランジスタは\$12.5で売られており⁴⁾、また1957年にはTIからシリコンを使用した最初の単体トランジスタ(バイポーラトランジスタ, npn)が市場に出されている。1960年のシリコン単体トランジスタの販売価格は\$30であった^k。その後、トランジスタはICとして集積されたので、ICの価格をICに含まれるトランジスタの数で割ったものを、トランジスタ1個の価格として年毎にプロットしたデータをインテルが発表している^l。更に将来の価格推移が期待値としてITRSに示されている。2011年のデータを見ると、トランジスタ1個の価格は 3×10^{-9} ドル前後になっている。更にITRSのロードマップではメモリ用のトランジスタ1個の価格が2013年には 10^{-9} ドル(1 Nano \$)になると予測している。10億個のトランジスタを集積してもチップの原価が1ドルにしかならない時代になっている。更に、ITRSの予測を外挿すると2030年以前(2027-8年頃)にメモリ用のトランジスタ1個の価格は 10^{-11} ドル(1 Nano ¢)になると予測することができる。

このトランジスタの価格の推移を示すグラフ(図8^l)に、それぞれの世代のトランジスタ寸法を3乗したものを重ねると、興味深いことに、二つのグラフはほぼ平行となり、トランジスタの価格はトランジスタの体積と相関がある。

一チップあたりの加工費が多少変化しても、一チップに十数億個のトランジスタが載っているのだから、トランジスタ一個当たりの価格は割る数、すなわちどのくらい小さなトランジスタを作ったかでほとんど決まると考えることができる。

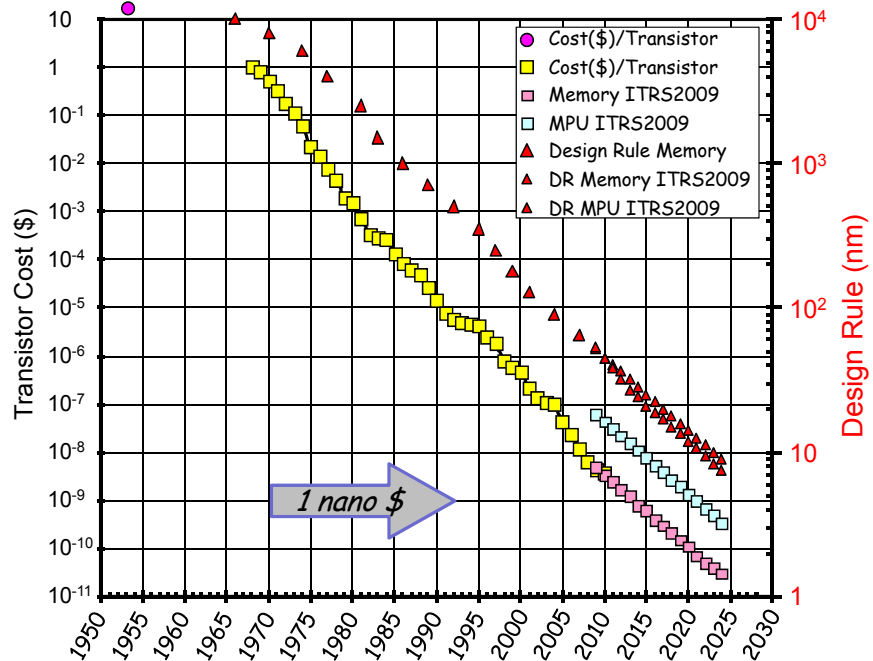


図 8. 半導体素子の微細化とコストの変遷 ^l, ITRS

^k Transistor Museum, 2N343 Fact Sheet:

http://www.transistormuseum.com/MuseumStore/MuseumStore_2N343_FactSheet.pdf

^l Semicon West 2011, Intel/ WSTS

http://semiconwest.org/sites/semiconwest.org/files/Paolo%20Gargini_Intel.For%20posting.pdf

3. トランジスタの微細化とリソグラフィ

前述したように、トランジスタを小さく作ること、微細化を行うことにより、半導体の市場は拡大していった。トランジスタの大きさが $10\mu\text{m}$ の時には数 mm^2 のシリコン基板の上に数百個のトランジスタの集積が行われていた。現在トランジスタを 22nm のデザインルールで作り、 160mm^2 のチップ上に 14 億個を超えるトランジスタが集積されている。また、トランジスタを小さく作ること、トランジスタの性能は向上し、多数のトランジスタを組み合わせることで機能を向上すると共に新規アプリケーションに対応し、新規市場を作り出してきている。

微細化は歴史的に光リソグラフィにより推進され、光リソグラフィの進歩により Moore の法則が現在まで順守され続けていると言える。光リソグラフィの進歩は着実に露光波長を短くすることにより達成されて来た。波長は可視光から現在の遠紫外光にまで変わり、さらに軟X線領域の光を実用化し使用する試みが世界中の英知を集めて行われている。過去から現在まで短い波長を使いこなすための挑戦は新しい材料を使いこなす戦いであり、また光を制御するために波長の数十分の一の加工精度と均質性を追求してきている。レンズ材料には高い透過率が要求され、光源には波長の均質性の他に強い光が要求され、そして高分子でありながら十分に短い光を透過する材料がレジストを作るために要求されてきた。光リソグラフィを構成するためにはその他にも多くの材料が必要とされ、必要とされるすべてが揃うことにより初めて実際の半導体プロセスに適用される。

リソグラフィ手法を変更する目的は常に解像力、如何にしてより小さなパターンを作るかである。短波長の光リソグラフィが実用段階に入っても、光以外のリソグラフィがより小さなパターンを作るポテンシャルを持っていることが原理的に明らかになれば、提案され検討される。生産性や安定性、そして製造装置としての使いやすさなどが厳しく比較され、今までは光リソグラフィが選択されてきている。歴史的に電子線(以下EB)、イオンビームなどの荷電粒子ビームを使用する技術やX線を使用する技術が提案されて来たが、最近ではインプリントと呼ばれるテンプレートマスクを使用し、型押しのようにしてパターンを転写する方法なども提案されている。ここでは、光リソグラフィに注目し、技術の選択が行われた背景について述べる。

4. 光リソグラフィの歴史 – リソグラフィシステム⁵⁾

光リソグラフィの起源と歴史をここでは詳しく述べないが、アスファルトの感光性を用いて太陽光でパターンを転写した 1800 年代初頭に遡る。半導体集積回路の開発が始まった初期、すなわち 1959 年に Kilby や Noyce が集積回路の基本特許を示した時には、光リソグラフィに不可欠なレジストが存在している。1935 年に Eastman Kodak 社がネガレジストの原料となる poly(vinyl-cinnamate)の合成に成功し、ネガレジストは 1940 年代後半には商品化されている。また最初の diazoquinone 系のポジレジストも 1940 年に Hoechst AG 社により開発されている。

同様にフォトマスクもこの時期には、ハロゲン化銀を含んだ感光乳剤をガラス板に塗布した写真乾板、エマルジョンマスクを使用することが可能であった。またマスク製作用のフォトリピーターは 1961 年の非常に早い時期に、後に GCA に買収される David W. Mann 社から世の中に出されている^m。従って、回路パターンを映したエマルジョンマスクと半導体の基板にレジストを塗ったものを重ね、密着し露光することにより、回路パターンを転写することは技術的に可能となっていた。

後に述べる 1965 年にコンタクトプリンティング装置が市販されるまでの間は、半導体素子を製造するため、各社は自社製の露光装置を使用していたと考えられる。この節ではコンタクトプリンティングから現在のスキャン露光までの露光方式について述べる。露光方式とウェハサイズの変遷はリソグラフィの生産性向上と、原理的な重ね合わせ精度の向上を示している。

^m <http://life.lithoguru.com/index.php?itemid=38>

4.1. コンタクトプリンティング – 密着露光

半導体素子製造が産業として発展するに従い、リソグラフィの装置が必要となり、各社は独自にマスクパターンをウェハ上のレジストに転写する装置の開発を行った。市場の拡大に伴い、専用のコンタクトプリンティング装置(コンタクトアライナー)が開発され、1965年に Kulicke & Soffa 社が最初に市販を行っている。Cobilt 社、Kasper 社、などがこれに続き、2 インチウェハ(後に 3 インチウェハ)用の装置を供給した。マスクは 4 インチのエマルジョンマスクが当初用いられたが、コンタクトによるマスクの損傷を防ぐため後にクロムマスクに置き換えられている。アライメント精度は公称 2~3 μm であったが、アライメントの良否はオペレータの技量に依存した。

コンタクトアライナーは当時として必要な精度を持っていたが、マスクとウェハを密着させるため、マスクの損傷(特にエマルジョンマスクの場合)や、ウェハからのレジストの破片(カス)がマスクに付着して共通欠陥となる、或いは密着させる時に間に挟まった空気の影響でウェハが動きアライメント精度が落ちるなどオペレータの技量に依存する欠点を持っていた。これを避けるため、全自動露光装置の開発が推進されている。

4.2. プロキシミティプリンティング – 近接露光

1973 年になると Kasper 社からプロキシミティプリンターが発売された。近接露光のコンセプトによりコンタクトアライナーの持つ欠点は原理的に緩和されたが、同時に原理的に解像力が低下した。しかし、この解像力の低下はマスクをクロムマスクに変えパターンエッジのコントラストを高めることと、ポジレジストの導入によるコントラストの向上により克服され、大きな問題とはならなかった。ほぼ同時期にキヤノンからもプロキシミティプリンターが発売された。性能と安定性で Kasper との競合で優位に立ったキヤノンは大きなシェアを獲得している。

近接露光では解像力に原理的な限界があり、パターンが 5 μm 前後になると解像力に余裕がなくなり、歩留まりが問題となった。時期的には 1977 年前後に当時の最先端デバイスが 5 μm の解像力を必要とし、解像力の高い新規の露光装置が求められるようになった。また、近接露光で解像力を向上するために、ウェハとマスク間の距離を小さくする試みが日常的に行われたが、マスクやウェハの平坦性が十分でないことから偶発的なウェハとマスクの接触が生じやすくなり、密着露光で問題となったマスクの損傷や、ウェハからマスクへのレジストが付着することによる共通欠陥が再度問題となった。また、当時の半導体プロセスではプロセスの低温化がまだ適用されておらず、プロセスで熱処理を行うとウェハがポテトチップのように歪み、リソグラフィの工程では、真空チャックでウェハを強制的にチャックに張り付け、平面度を取り戻すことが行われていた。しかし、真空チャックでウェハの平面度を補正する方法には限界があり、上記のマスクとウェハの接触の原因ともなった。

密着露光或いは近接露光でも解像力を追求することが行われ、遠紫外線(Deep UV)をリソグラフィに使用する試みが、1975 年に IBM の B.J.Lin⁶⁾により行われ、翌年には遠紫外線の密着露光に PMMA レジストを用いて 0.25 μm の磁気バブルメモリの作成を試みている。日本でもソニーの中根等⁷⁾が 1976 年に重水素ランプを用い微細パターンを露光している。この技術を発展させ、キヤノンは 1978 年に Xe-Hg ランプを光源とする遠紫外専用コンタクト/プロキシミティ露光装置 PLA-520FA⁸⁾を開発している。

プロキシミティ露光装置の市場投入直後に、後述する 1:1 投影露光装置が発売されたが、装置価格に大きな差があったため、長期間使用されている。

4.3. 1:1 プロジェクションリソグラフィ – 1:1 投影露光 – (1:1 ミラープロジェクション)ⁿ⁾

1969 年に米空軍からの資金を得て、Perkin-Elmer 社は 1:1 投影露光装置の開発を開始し、NA=0.167 の等倍投影レンズを持つスキャナが“Micralign”の商品名で 1973 年に商品化された。装置価格は\$100,000を超え、

ⁿ⁾ 近接露光までの技術はマスクとウェハ間に光学系を含まないため、波長の持つ意味が小さく歴史的に波長の記載はない。1:1 プロジェクションリソグラフィになると波長により解像力が変わる。しかし、ミラー光学系で色収差の影響を受けないため、初期には光量を稼ぐために広い範囲の波長を使用していた。従って、波長の記載はない。後に、解像力を必要となるに従い、露光波長が明確になっている。縮小投影露光になると縮小投影レンズを使用するため、色収差の補正が必要となり、波長を明確にすることが必要となる。また、波長が短くなると解像力を向上できるため、波長を明確にすることが重要となる。

プロキシミティプリンターの3倍以上の価格であった。しかし、ボジレジストと組み合わせることで、欠陥が減り、非接触であることからマスクの寿命がプロキシミティプリンターに比べてほとんど無限であることが知られ、Perkin-Elmer社は瞬間に、当時の半導体製造装置業界最大の会社に成長した。Micralignは改良を続け、1981年には5インチウェハ対応で100枚/時間の処理能力を持つMicralign 500が\$675,000(カタログ価格)で発売された。マスクにはクロムマスクが用いられ、5インチのマスクか、5インチウェハ用には6インチのマスクが使用された。

Micralignの弱点は、非常に安定した結像性能が得られる光学系の中にあつた。プリズムとミラーから構成されるMicralignの光学系は、光学系の構成によりNAが0.167に限定されてしまい、解像力を2~3 μm より向上することが難しかった。

キヤノンも1976年に通産省のプロジェクトとしてミラープロジェクションの開発を開始し、1980年に市販を開始したが、Perkin-ElmerのMicralignと同様に光学原理に起因する解像力の限界があつた。このため、微細化を続ける半導体業界は次の装置を求めた。

1:1投影露光の解像力を向上するため、Perkin-Elmerは短い波長を導入し1 μm の解像力を達成している。キヤノンも1979年にXe-Hgランプの遠紫外線を光源とする1 μm の解像度を持つ反射投影露光装置MPA-520FA⁹⁾を開発している。この時期に多くの遠紫外線用のレジストが開発されているが、感度、解像力、安定性、耐エッチング性を兼ね備えた実用レベルのレジストは生まれなかった。また光源の出力も十分でなく量産に展開されることはなかった。

1:1投影露光装置のもう一つの弱点はアライメント精度にあつた。時代が進むにつれ、解像力への要求が厳しくなり、その解像力に比例して重ね合わせ精度の要求は厳しくなる。同時に生産性の向上を求める産業界はウェハの直径を3インチから4インチ、5インチと大きくしていった。ウェハ上の数箇所を高精度に重ねるのはいつの時代でも時間さえ掛ければ可能であるが、面と面、ウェハとマスクの全面を高精度に重ねるのは時間だけの問題ではない。ウェハとマスクが歪の無い状態で、更に熱膨張率の差による倍率誤差が補正できないと高精度に重ねることは難しい。3 μm の解像力で素子を製造するときには、重ね合わせは最悪でも線幅の1/3である1 μm が要求される。1:1投影露光では、4インチのウェハを用いると、100mmの幅で全面を1 μm 以下の精度で合わせる必要があり、5インチウェハで1 μm の素子を製造する場合には、125mmの範囲を少なくとも0.3 μm でアライメントする必要があつた。1:1等倍投影露光ではウェハプロセスの熱処理工程に起因するウェハの歪みを補正する手法が見出せず、弱点を克服できなかった。

次に述べる縮小投影露光装置が採用されるようになった後も、5インチウェハが使用されている間は1:1ミラープロジェクションが当時として圧倒的な生産性、100枚/時間(5インチウェハ)、によりラフレイヤと呼ばれる精度が要求されない工程で使用され続けた。しかし6インチウェハの導入と共に、7インチマスクが必要となり、新規のマスク投資を嫌う業界はラフレイヤにも縮小投影露光装置を採用し、この結果1:1等倍投影露光装置は最先端半導体製造装置市場から姿を消した。

4.4. n:1 プロジェクション露光(Step & Repeat) - 縮小投影露光

縮小投影露光装置(ステップ)はマスク(レチクル)上に金属膜(クロムの蒸着膜)で書かれたデバイスの回路パターンを、縮小投影レンズを介してウェハ上に転写する装置である。原型はマスクを作るためのフォトリピーターとして開発され、やがてウェハに使えるように進化したものである。

最初の縮小投影露光装置(ステップ)は1975年にIBMで作られ、1 μm の解像力を実証している。露光波長はh線(405nm)でNAは0.32であつた¹⁰⁾。しかし、最初に市場を確保したのはGCAで、1978年にDavid W. Mannのフォトリピーターを発展させたDSW4800(g線, 10倍, NA=0.28, 10x10mm Field, 定価\$450,000)を発表した。更に、1978年にニコンが超LSI技術研究組合にステップの試作機を納め、1980年にはNSR-1010G(g線, 10倍, NA=0.30, 10x10mm Field, 5インチレチクル)を市販した。ステップは、解像力、重ね

合わせ精度そして欠陥密度の低さで 1:1 ミラープロジェクションに勝り、多くの会社に試験的に導入された。しかし、当時の量産現場では、まだそこまでの解像力は必要とされず、生産性で劣り、高価格のステッパの導入は先送りされた。

ステッパが量産用の主力露光機として使われるようになったのは 1981 年にニコンが NSR-1505G(g線, 5 倍, NA=0.30, 15x15mm Field, 5 インチレチクル)を市場に投入してからである。レンズを大きくし、倍率を 10 倍から 5 倍に変更し、画角を 15mm 角に広げたことで、1 枚のウェハ当りのショット数が減り、量産に耐えうる生産性が提供できるようになったことによる。

1983 年に始まった 256kDRAM の量産で、米国企業は生産性が高く装置価格の安い 1:1 ミラープロジェクションを露光装置として選択し、日本企業は装置価格が高いが高性能のステッパを選択した。結果は歩留まりで日本勢が圧勝し、米国では DRAM から撤退する企業も現れた。

その後も解像力向上の要求はとどまることがなく、3 年ごとに 70% の解像力向上の要求が続き、時には 2 年で 70% の要求の時も出てきた。この要求に応えるため、露光装置メーカーは装置のコンセプトを変えずに、露光波長を短くすることを選択した。露光波長は g 線、i 線、KrF、ArF と短波長化されたが、その変遷については後述する。また、解像力向上の要求が性急なことから、RET^o とも呼ばれる各種超解像技術の導入も急速に進んだ。

生産性の向上も求められ、時間当たりの処理枚数も年々増加した。1989 年に行われた縮小投影レンズの 5 倍、17.5x17.5mm Field、5 インチレチクルの採用、引き続いて 1990 年に行われた 5 倍、22x22mm Field、6 インチレチクルの採用により、ウェハあたりのショット数を減らすことが可能となり、生産性も大きく向上した。

4.5. ステップ・アンド・スキャン(Scanner) — スキャン露光

1980 年代の解像力向上の要求にはステッパ技術の成熟と RET の導入で応えてきたが、1990 年代に入ると、さらなる解像力の向上と生産性の向上が要求され始め、1989 年に SEMATECH が露光装置各社に対しスキャンのコンセプトでの装置開発を要求した。1990 年に SVGL が光学系にプリズムが挿入された図 9 に示すような反射屈折タイプの投影レンズを搭載した、解像度 0.5 μ m のスキャン露光機を発表している。この装置の開発には SEMATECH が多額の資金を提供している。スキャン露光機は投影レンズを使用し、スリットを介し、レチクルの像をウェハ上に像を動かすことでレチクルのパターン全面をウェハ上に転写する。この時、ウェハとレチクルの倍率が 4:1 であることから、レチクルをウェハの 4 倍の速度で動かし同期させる必要がある。装置の制御技術として、ステッパよりも難易度が大幅に上がった。しかし、CPU の進歩には目覚ましいものがあり、従来理論的には可能でも実現できなかったことを可能にしている。投影レンズが反射屈折タイプで色収差補正が可能であること

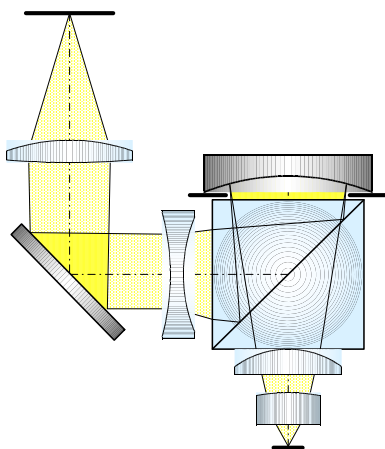


図 9. Catadioptric Design
Polarized Beam Splitter

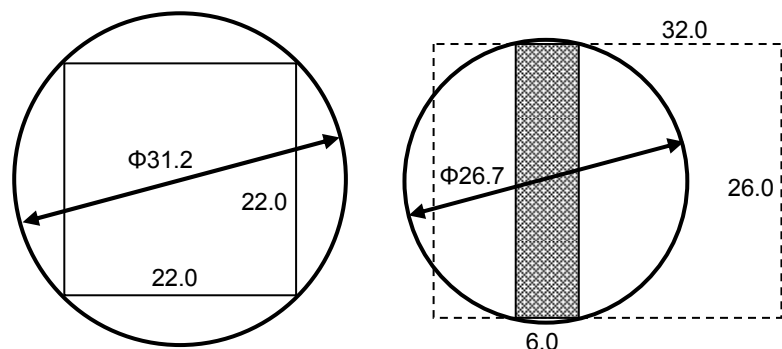


図 10. 投影レンズのレンズ径と露光フィールド

^o RET: Resolution Enhancement Technology

から、開発初期には 250w のエキシマランプ(～250nm)が使用された。しかし光源の光強度が十分得られず、KrF(248nm)に短期間で変更されている。

IBM の要求を受け、ほぼ同じ時期に、露光装置メーカ各社は従来の縮小投影レンズを使用するスキャン装置の開発を行い、1998 年から KrF の露光波長を使用したスキャン露光機の量産ラインへの大量導入が始まった。

KrF スキャン露光機は従来の露光装置に比べて、光源にエキシマレーザを使用し、レンズの材料が石英なのはもちろん、レチクルとウェハを異なる速度で同期させ、動的制御が必要になるなど複雑で、装置価格が非常に高価になってしまい、生産性の向上が導入のため必須となった。スキャンの導入により、図 10 に示すように、ステップより小さな縮小投影レンズで大きな露光視野 26x33mm(4 倍、6 インチレチクル)を確保し、ショット数を減らすことにより生産性が大きく改善した。2000 年に始まった 300 mm ウェハの量産ラインへの導入を露光機としての生産性の高さから後押ししている。また、小さな縮小投影レンズを可能にしたことで将来の大 NA 化に対し、レンズ製造時のレンズ径の制約への余裕度を増すという成果を得ている。スキャン露光装置はその後、波長を ArF、ArF 液浸と発展させ、更に現在の Double Patterning でも主力の露光装置として使用されている。

4.6. まとめ - ウェハサイズ、歪みと重ね合わせ精度

コンタクト露光からスキャン露光まで、半導体産業の初期から現在まで、リソグラフィは光を用いて発展してきた。この間、ウェハサイズは図 11 に示したように直径 25mm から 300mm に大きくなり、450mm の採用が検討されている。時代の進展と共に技術が進歩したことにもよるが、産業の初期の頃に 25mm のウェハを 1 枚処理する時間と、現在 300mm のウェハを 1 枚処理する時間は同じか或いは現在の方が早い。ごく早い時期から、リソグラフィ装置にはウェハの処理速度として 60 枚/時間が常に求められてきた。現在の最先端の光リソグラフィ露光装置では 250 枚/時間以上の処理能力がある。ごく初期から現在まで、単位面積を露光するリソグラフィの費用は、技術が高度になり、装置価格が上昇してもほとんど変化していない。

図 12 に露光時に一度に露光されるエリアを示した。初期の密着露光や近接露光ではマスクとウェハが密着或いは近接して一度にウェハ全面が露光される。ウェハが小さくパターンが粗い内は問題が生じなかったが、3 インチウェハが採用されパターンが 7 μ m に近くなると、必要とされる重ね合わせ精度も 2.5 μ m になる。アライメント精度は一般的に線幅の 1/3 がずっと要求されてきた。ウェハは熱処理を繰り返すことにより歪んで来る。コンタクト露光が使用されていた時代にはプロセスの低温化が十分でなく、ウェハはポテトチップのように歪んでいた。これを真空吸着により平面に補正しマスクとウェハをアライメントするので、特にウェハ周辺では歪が大きくなり、アライメントが大きな問題となり、密着露光や近接露光は使えない技術となっていった。

1:1 投影露光は図に示すように、スリット状に光が当たる。非接触のため、安定したアライメント精度が得られた。しかしウェハが 3 インチから 4 インチに大きくなるとスリットの長さが長くなり、やはりウェハの熱処理による歪みに対応できなくなり、図 12 に示す縮小投影露光の 15x15mm の露光面積を小さく分割するアライメント精度に差をつけられ、生産性では有利であったが、量産では使われなくなった。



図 11. ウェハサイズの変遷

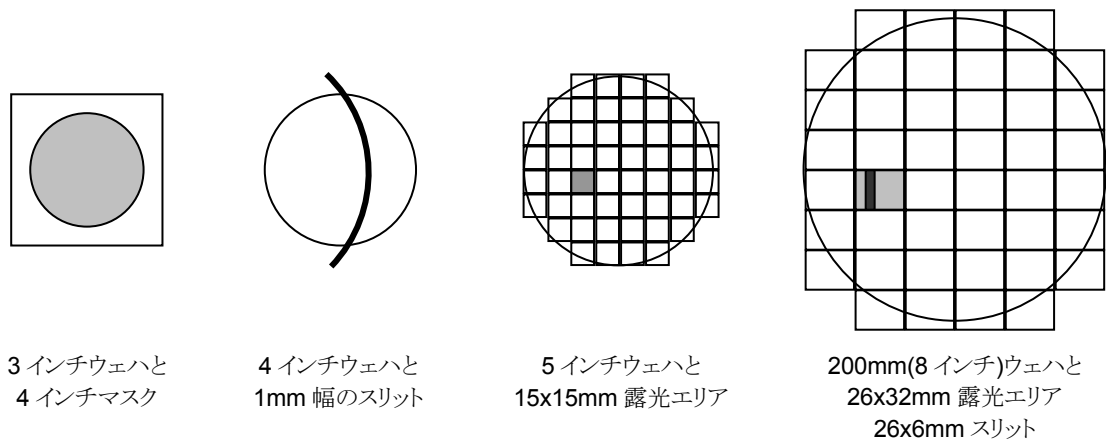


図 12. 一度に露光される露光エリアの変化

高い解像力が要求され、アライメントも線幅に比例して高い精度が要求されるようになると、縮小投影露光、ステップの分割ですら十分でなくなる。一回ごとの露光エリア毎に、最適な倍率制御を掛けても、露光フィールド内の歪が大きくなると補正が利かなくなり、必要なアライメント精度が得られなくなる。このため、露光フィールド内をスリットの大きさに分割できるスキャンの概念が必要となり、現在は数 nm のアライメント精度が達成されている。より小さな面積に分割し露光することでウェハの歪に追従することが可能になり精度は上がる。しかし、生産性の確保や向上には制御系の進歩が必須である。CPU 等の半導体の進歩と高速化により、アライメントの高機能化と高速化が実用可能になっている。

安定したアライメント精度は量産用の装置を選別する時、リソグラフィに必須な要素であるが、解像力の議論に比べて地味なためか、リソグラフィの選択時に話題になることが少ないのが不思議である。

光リソグラフィの長所として、マスク(レチクル)の安定性は非常に大きい部分を占めている。検査、修正等の管理も含めて、マスクを必要とする他のリソグラフィのマスクに、光リソグラフィのマスクよりも安定したものは見当たらない。

5. 光リソグラフィ — 解像力の追求

光リソグラフィにおいて短波長化と波長の選択は解像力を向上するために避けて通れない道である。光リソグラフィを議論する時、露光装置の光学系と光源が議論の中心となるが、マスクとレジストも動向を決める重要な要素となっている。マスクと露光装置で作成した光の強弱のパターンを樹脂の中に潜像として再現し、現像プロセスを経て実体化させるレジストの進歩が光リソグラフィを支えてきたと言える。

密着露光から近接露光を経て 1:1 投影露光まで、露光波長は図 13^P に示した超高圧水銀灯のいくつかの輝線をまたがって使用する広波長帯域で、レジストにはネガレジストが使用されていた。この当時、解像しなくてはならない線幅は 3~10 μm であり、波長選択の議論も盛んではなかった。むしろ生産性向上のために強い光と感度の良いレジストが求められていた。波長も広波長帯域であったが、実際には光学系(マスクを含む)の加熱を防ぐために長波長カットのフィルターが挿入され、初期には短波長側はマスク基板がガラスであったため、実際的にはマスクに吸収されていた。従って実際に露光に寄与していたのはg線とh線である。

1:1 投影露光ではノボラック系のポジレジストが使用されるようになったが、g線とh線に対し同程度の感度があり、特に波長を意識する必要はなかった。しかし、縮小投影露光が導入され、光がレンズの中を通過してから結像され露光が行われるようになると、レンズの色収差を補正しなければならず、波長の範囲を超高圧水銀ランプの輝線の極めて狭い波長領域に限定することが必要となった。

^P http://www.ushio.co.jp/technology/glossary/glossary_ta/super-high_pressure_mercury_lamp.html

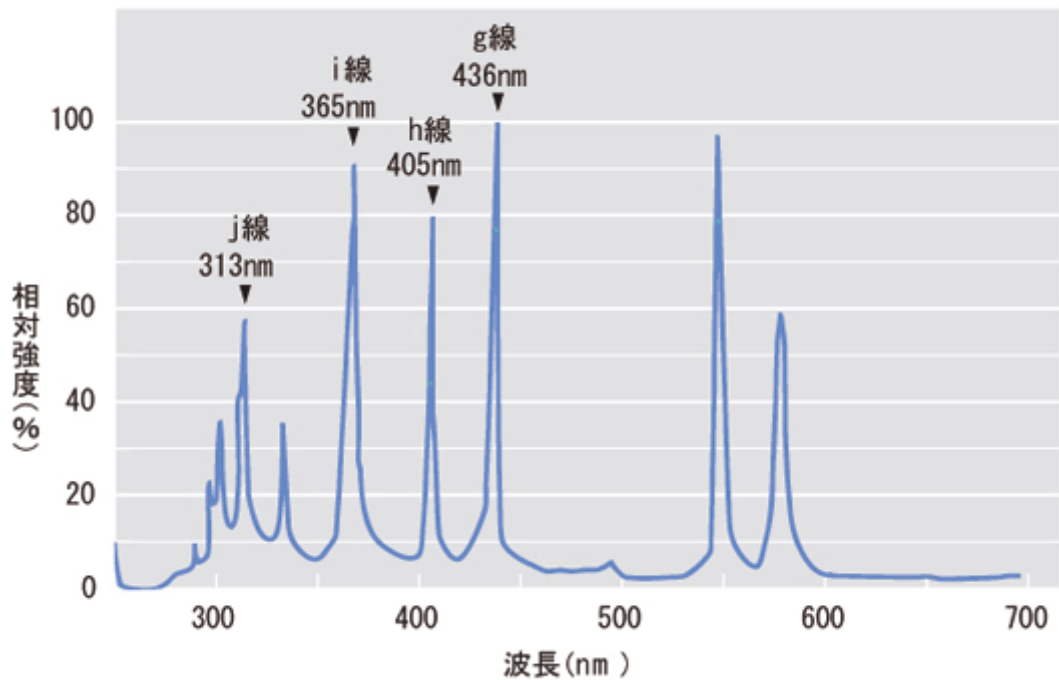


図 13. 超高压水銀ランプの分光分布図^P

光リソグラフィの結像系の解像力は以下の式で示される。

$$Resolution = k_1 \cdot \frac{\lambda}{NA} \quad (1)$$

$$NA = n \cdot \sin \theta \quad (2)$$

ここで λ は波長、 NA はレンズの開口数、 k_1 は Process Factor(k_1 係数とも呼ばれる。) n は媒体の屈折率で大気中では 1.0 となる。

式(1)で示されるように、解像力を向上するには三つの方法がある。一つは波長で、波長が短くなると解像力が向上する。1:1 投影露光までは広帯域の光を使っていたため、解像力が広帯域の光の長波長側で制約されていた。しかし縮小投影露光以降、波長が厳密に選択されるようになり、波長の選択は解像力の面からリソグラフィの選択と同じように重要になった。

光リソグラフィの解像力を上げる他の手段として NA がある。式(1)から NA を大きくすることでも解像力の向上が達成できる。しかし大気中では、 $n=1.0$ であるため NA は 1 より大きくできない。更に第 3 の手段として k_1 を小さくすることが上げられるが、 k_1 は原理的に 0.25 より小さくはできない。(繰り返しパターンでは結像の原理で決まる限界である。)

図 14 にステップが市場に出された後の露光装置(ステップとスキャン)の解像力の変遷を示した。

5.1 露光光の短波長化

5.1.1. g線(436nm)

前述したが、最初の縮小投影露光装置(ステップ)は 1975 年に IBM で作られ、露光波長は h 線(405nm)で NA は 0.32 であった。当時のポジレジストは h 線でも g 線とほぼ同等の感度があり、レジストは選択の要素としては大きくなかった。後に、ステップに進化するフォトリピーターはマスクの製造装置として開発されその当時すでに実際に使用されていたが、そこでは g 線が採用されていた。

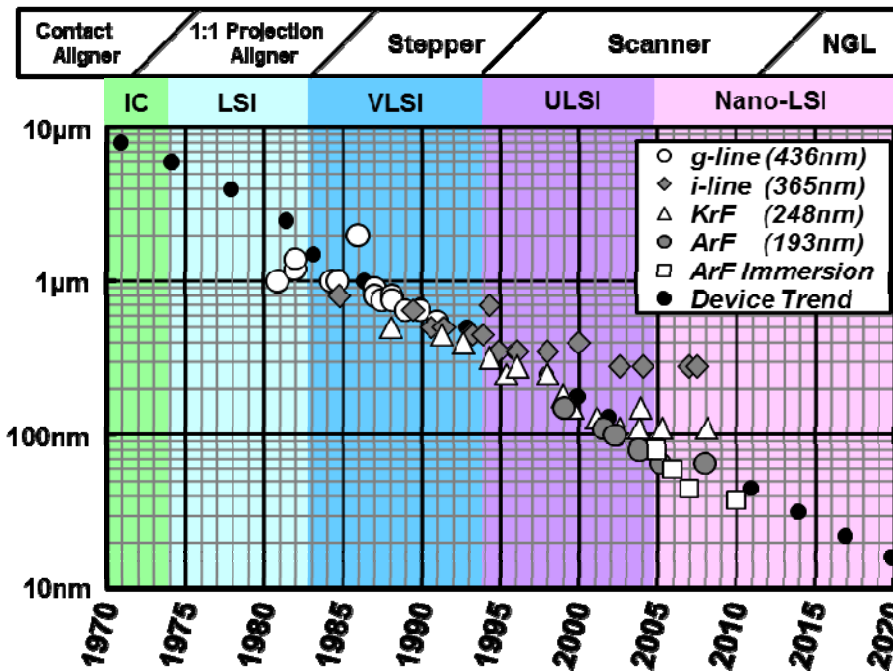


図 14. Nikon の露光装置の進歩 (株ニコンのご好意による)

縮小投影レンズのようにレンズ系の中を光が通り結像する場合、色収差の補正が必要となる。g線あるいはh線のレンズでは数種類の屈折率と分散の異なる均質性の良い光学ガラスを組み合わせ、水銀の輝線スペクトルの幅に合わせた色収差補正を施した設計が行われる。h線の場合、g線より短い波長となり、光学ガラスの吸収が大きくなり使用できる光学ガラスの種類が少なくなり、光学設計に制限を与えたが、設計は可能であった。

1970年代末から、量産用縮小投影露光装置(ステッパ)の開発競争が激化した。開発では解像力や重ね合わせ精度に注目が集まったが、その次に要求されたのが生産性である。1:1 投影露光装置に比べて性能は解像力も重ね合わせ精度も十分に高かったが、量産用の生産性装置として価格が 3 倍高く生産性が低かったので、余計その生産性は注目を集めた。1981年に Perkin-Elmer 社は 1 時間に 100 枚の 3 インチウェハを処理する Micralign 500 を定価\$675,000 でアナウンスしていた。これに対し、重ね合わせ精度や解像力の余裕度を高く評価し、ステッパの導入を望んでいた日本のデバイスメーカは、装置メーカに対し、導入の最低条件として 60 枚/時間の生産性を要求している。

当時使用できるポジレジストは限定されており、h線とg線で感度はほとんど変わらなかった。また、後にi線で問題となるレジストの透過率に関しても、h線では吸収がそれほど大きくなり話題になっていない。生産性を高めるためには、露光時間を短くする必要があり、光源の強度が必要となった。光源として検討された超高压水銀灯の輝線スペクトル(図 13)はh線とg線の 2 本であったが、g線の強度の方が強く、h線が選択される可能性はなかった。

1978年に GCA 社から発表された DSW4800 は生産性が低く、量産装置として認められるまでには至らなかった。1980年にニコンも 10x10mm のステッパを出荷したが、これも同じ理由で量産装置として認められず、ステッパが量産装置として認められたのは、翌年の 1981年にフィールドサイズが 15x15mm、NA=0.30 の縮小投影レンズを搭載し生産性が向上してからである。1984年に 15x15mm、NA=0.35 のレンズで解像力 1.0µm の仕様が達成され、6 インチウェハが導入されると、1:1 投影露光装置からステッパへとリソグラフィの主流が交代し、g線ステッパが市場を押さえた。この時、ステッパは性能として、1:1 投影露光装置に処理能力で多少劣っていたが、解像力と重ね合わせ精度で勝っていた。

1985年当時、g線ステッパが主流となったにもかかわらず、或いは NA=0.35 のレンズで 1µm の解像力を実証しても、光(g線)の実用限界は 1µm までと言われていた。当時のデバイスプロセスでは、平坦化が十分でなく

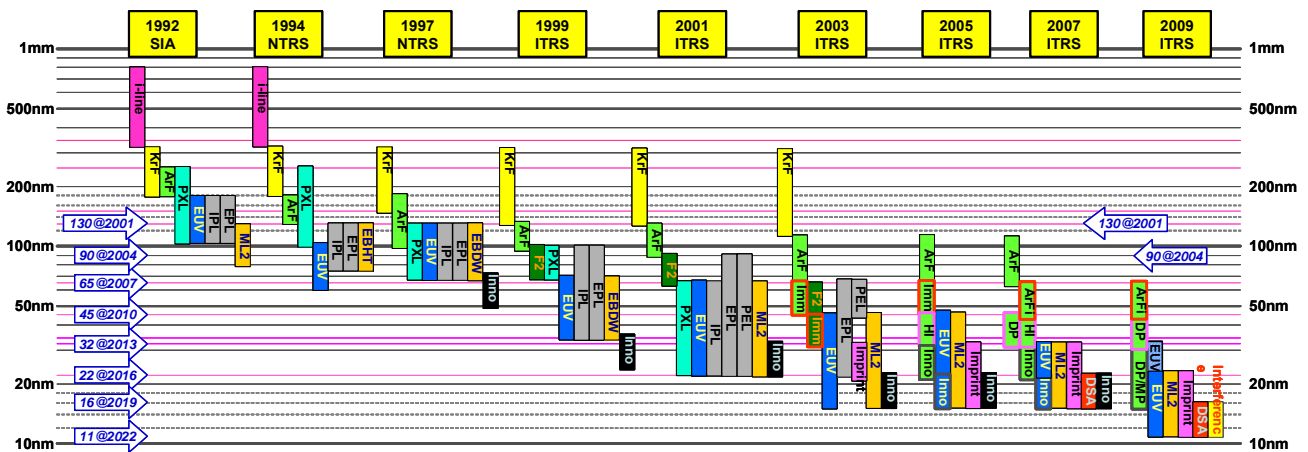


図 15. History of ITRS Potential Solutions in Lithography.¹²⁾

(いろいろな試みはなされていたが、CMP が可能にした平坦度には遠く及ばないものであったが)、プロセスにより生じる段差(1 μ m 以上ある)を乗り越えて配線するため、露光機には 1.5~2 μ m の焦点深度(DOF)が要求された。このため、異なるマスクレイヤごとに達成可能な解像力が異なる状況であった。平坦な基板上では問題なく達成される解像力も、実プロセスには適用不可との判定になることが実際に生じている。

更に、当時は CAD の能力が低く、回路設計図からマスクパターンを作成する作業も人間が行っていた。このため、例えば密集線と孤立線を露光した時に生じる線幅差の補正をマスク設計時に自動で行うことはできず、僅かに DRAM のメモリーセル部の露光結果の修正を、露光されたレジスト像を見ながら、マスクパターンを人間が補正する程度であった。従ってマスク設計時の密集線と孤立線のオフセットを最初からかける事は無く(結果を見てからのマスク修正は可能だった)、孤立線と密集線が同じオフセットで露光できることが望まれた。このことから、実プロセスでは $k_1 \geq 0.8$ が必要とされていた。

g線、 $k_1 \geq 0.8$ 、 $NA=0.35$ を式(1)に代入すると 1.0 μ m となる。NA=0.35 の縮小投影レンズの時代には光の限界(g線の限界)は 1.0 μ m と言われ、NA=0.45 が出ると 0.8 μ m と言われ、焦点深度を維持しながら解像力を確保することが困難であるから、直ぐにi線が必要になるといわれ続けた。別の議論では、光は 1 μ m まで、0.5 μ m まで、或いはある特定の線幅までで、その後光リソグラフィは困難な技術開発が必要となるので、使用が困難となる。その後、リソグラフィ技術は軟 X 線リソグラフィ、電子ビーム露光或いは他のリソグラフィ技術が後続として採用されると議論が続いていた。1977年の「光リソグラフィの終焉は何時も7年後に来る」という、John Sturtevantの冗談が Sturtevant's law¹¹⁾として知られるようになってはいるが、状況は最近まで変わっていない。図 15に ITRS の”Potential Solution”の変遷¹²⁾を示している。世界でも著名なリソグラファーが集まり、その時その時に将来のリソグラフィを展望した変遷を示している。技術の限界を予測し、次のリソグラフィの必要時期を予想しているが、常に技術の限界を控えめに見ているのがわかる。

g線ステッパは最先端露光装置として、i線が台頭するまで使われ続けた。g線の導入(1984)から、i線に主力の座を譲る(1990年)まで、解像力について多くのコメントがなされたが、他のリソグラフィ技術に比較して、圧倒的にアライメント精度が良く、他のリソグラフィに付け入る隙を与えなかった。

当初、1 μ m までと言われたg線ステッパの解像力であるが、1990年に入る頃には 0.65 μ m の解像力(NA=0.54, $k_1=0.8$)をg線で提供している。NA を大きくすることにより解像力を上げているが、焦点深度の確保は課題であった。この課題はレンズの NA を可変にして、解像力が必要な時には最大 NA で露光を行い、焦点深度が必要な時には、NA を小さくする方法を採用して対処していた。

	g-line	<i>h-line</i>	i-line	<i>KrF</i>
n: n·sinθ	1.0	←	←	←
λ: Wavelength	436 nm	<i>405 nm</i>	365 nm	<i>248 nm</i>
λ: Reduction ratio	-	<i>7%</i>	16%	<i>43%</i>
Light Source	Hg Lamp	<i>Hg Lamp</i>	Hg Lamp	<i>Band Narrowing Excimer Laser</i>
Imaging Spaces	Air	←	←	←
New Lens Materials	Glass materials	<i>Glass materials</i>	Limited Glass Materials, Development Required	<i>Quartz CaF₂</i>
Lens Type	Dioptric	←	←	←
Resist Materials	Novolac Resin	←	Highly transparent Novolac	<i>New High Sensitivity Resist polyhydroxy-styrene + CA</i>
Other New Materials		←	Coating Pellicle	<i>Coating Pellicle</i>
Fluid Handling	-	-	-	-

表 2. Selection of Post g-line wavelength

5.1.2. i線(365nm) – Post g線

縮小投影露光でg線が限界に来たら、次はg線より短い光を使えば良いと、式(1)から光リソグラフィの技術者は考えていた。g線の後継として検討された波長を表 2 に示した。表には検討した当時の課題(現在では解決されていて課題と思えないものもある。)、開発が必要な項目、そして懸念事項が示されている。1984 年にニコンから解像力 0.8μm のi線縮小投影レンズ(NA=0.35)を搭載した NSR-1010i3 が発売されている。しかしこの装置は 10x10mm の露光フィールドしか持たず、α-model の位置付けであった。また、この当時のi線硝材で作ったレンズの透過率は十分でなく、レンズを通過する露光光がレンズに吸収され熱に変わり、熱歪によりレンズの曲率が変化してフォーカス変動を生じるなどの不具合があった。この時点で光の吸収の少ない硝材が存在したh線(405nm)も検討されたが、g線からの解像力の波長優位性⁹(Reduction Ratio)が 0.93 と小さく、i線の波長優位性が 0.84 と大きな差があったので、i線が選択されている。

しかし、量産用のi線露光装置の開発は順調ではなかった。まずi線用の光学材料の新規開発が必要となった。当時、i線領域で使用可能とされる光学性能を持つ光学ガラスはすでに存在したが、縮小投影レンズに使えるような飛びぬけた物性を持っていなかった。当時評価尺度として用いたのが、ガラスの透過率である。最低でも 99%の透過率が要求され、達成するために光学ガラス原材料の高純度化が繰り返し試みられている。更に、投影レンズを完成させるためには光学設計上の色収差補正のために複数の異なる屈折率と分散を持ち均質性の良い光学ガラスが必要であり、かつ透過率の条件を満たすことが求められていた。このi線用光学材料の開発は、材料開発であり、開発には時間が掛かった。

同時期、量産に適用するために不可欠なレジストの開発も遅れ、結果がなかなか出なかった。当時、g線レジストのビジネスで東京応化工業が大きな成功を収めていたため、他の化学メーカーが新規ビジネスを目指し、i線レジストの開発に参入してきた。従来g線で使われてきたレジストにはノボラック樹脂が用いられていたが、g線用の樹脂をi線に適用しても、ノボラック樹脂の透過率が悪く、露光現像後のレジストの断面形状が台形になり、デバイスの量産プロセスに適用できないとの判定を受けた。このため、i線で透過率の高いノボラック系樹脂の開発が求められた。このi線用レジストの開発も材料開発であり、開発には時間が掛かった。

⁹ 波長優位性 (Reduction Ratio): 解像力の式(1)に同じ NA, k₁ を仮定し、波長だけを変えたときに解像力がどの位向上するかを示している。g線(436nm)→i線(365nm)だと、365/436=0.84 となる。

開発の遅れから、h線の採用が再度検討された。また、1986年のSPIE[†]でBell研のVictor Pol等¹³⁾からKrF露光の発表があったが、この発表の持つ意味は大きかった。h線の議論はこの発表で消滅し、その代わりに、i線開発をスキップし、一気にKrFを採用する議論が始まった。更に、露光装置メーカー各社は翌年の1987年のSPIEまでにKrFの実験機を作り、その結果を報告している。1987年のSPIEの後、露光装置各社はi線かKrFの選択を迫られながら装置開発を行っている。この時の選択をまとめると、h線は波長優位性が弱すぎ必要な短波長効果が得られないとされ、KrFはチャレンジが過激すぎるのと準備不足(現実にはKrFエキシマレーザが光源として使用できるレベルに程遠かった。)と敬遠され、次の光リソグラフィの波長としてi線が残った。

i線用光学ガラスの開発は予定よりも遅れたが、1988年には量産に適用できるレベルまで品質が向上した。また懸案のi線レジストも、1989年に長瀬産業が透過率の問題を解決したノボラック系-ポジレジストを開発し、断面形状が矩形のレジスト断面形状が得られるようになった。開発の方向性が定まったことにより、国内でのレジスト開発が一気に進み、レジストメーカー各社から性能の良いレジストが次々と発売され、良い意味でのi線レジストの性能競争が始まった。

1989年にニコンはi線ステップパ NSR-1505i6A(NA=0.45, 0.65 μ m 解像)を β -toolとして発売を開始している。同時期、g線ステップパはNA=0.54を達成しており、露光フィールドを17.5x17.5mmと広げることで、ウェハ1枚あたりの露光ショット数を減らし、生産性を高めることで、g線が量産装置の主力であった。半導体業界が200mmウェハの導入を決めたため、生産性の向上は必須の要求であった。1990年に入り、i線ステップパ NSR-1755i7A(NA=0.5, 0.5 μ m 解像、17.5x17.5mm)が発売され、量産性の問題が解決されたことにより、最先端の露光機の波長はg線からi線に移った。

i線ステップパは1989年から1996年になるまで、0.8 μ mから350nmのデバイス製造で最先端リソグラフィ装置として採用されている。この間、NAは0.54から0.63とあまり変わっていない。 k_1 を0.68から0.60に小さくし、後半ではCMPの採用により必要とされる焦点深度を軽減しながら、i線レジストの性能向上にも恵まれながら、解像力を追求している。露光フィールドを1990年ごろから20x20mmに広げ、生産性を追及するなど、生産性の追及を行っている。

同時にこの比較的開発が安定していたi線の時代に、その後、KrFから現在までの間に実用化された多くの

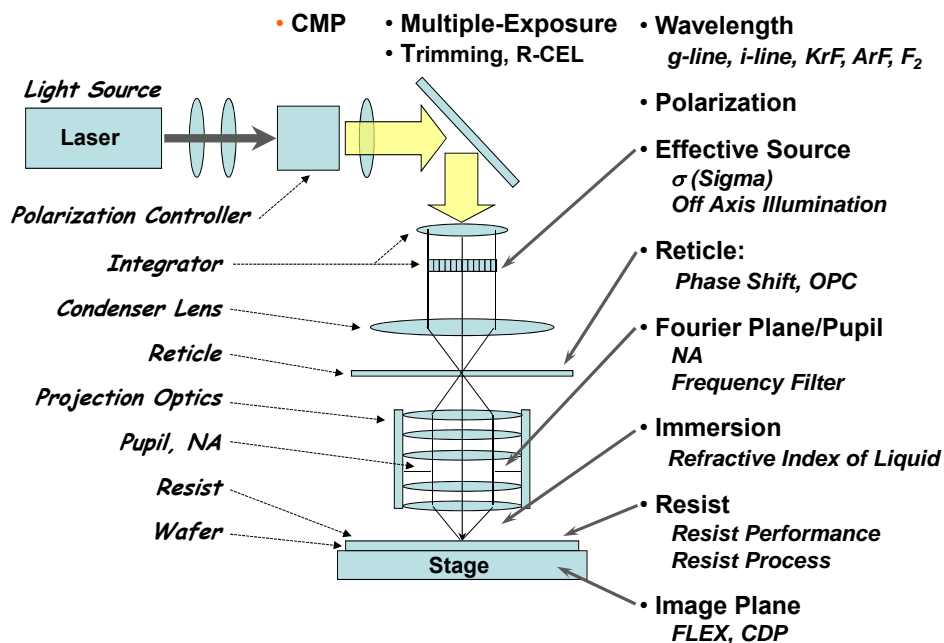


図 16 露光機の光学系とRET: Resolution Enhancement Technologies¹⁴⁾

[†] SPIE: The international society for optics and photonics. 毎年2月末前後にSPIE Advanced Lithographyを開催する。リソグラフィ関係者の最大の学会。

	i-line	<i>XeCl</i>	KrF
n: n·sinθ	1.0	←	←
λ: Wavelength	365 nm	<i>308 nm</i>	248 nm
λ: Reduction ratio	-	<i>16%</i>	32%
Light Source	Hg Lamp	<i>Band Narrowing Excimer Laser</i>	Band Narrowing Excimer Laser
Imaging Spaces	Air	←	←
New Lens Materials	Glass materials	<i>Quartz</i>	Quartz/CaF₂
Lens Type	Dioptric	←	←
Resist Materials	Novolac Resin	←	New High Sensitivity Resist Polyhydroxy -styrene + CA
Other New Materials		<i>Coating Material Pellicle</i>	Coating Material Pellicle
Fluid Handling	-	-	-

表 3. Selection of Post i-line wavelength

解像力を向上する技術が実証されている。図 16¹⁴⁾に露光装置の光学系と、解像力を向上するために、影響を与える場所と手法を示してある。この図の中で、CMP^sは唯一リソグラフィに関係の無い、リソグラフィ以外のプロセスである。1990 年ごろ、IBM が開発していたこの手法により、リソグラフィの前提条件、特にレンズ設計における NA の要求が 180 度変わった。プロセス中のウェハには膜を付けたりエッチングしたりするため、1μm 前後の段差が生じた。この段差の上と下に等しくリソグラフィをすることが求め続けられてきた。勿論、この段差を軽減する方法、例えばリフロープロセスなどが提案され、使われていた。しかし、段差部の壁の傾きが軽減され、見た目の段差は軽減されたが、段差の絶対値は大して変化せず、焦点深度は常に必要とされていた。

CMP はウェハ表面を完全に平坦にする可能性を持っていたため、この技術が採用されると NA の制約がなくなることを意味した。すなわち焦点深度の要素を軽減あるいは考えなくて良くなり、光リソグラフィの将来が大きく変わった。そして光以外のリソグラフィのチャンスは先送りされた。当時、実験用に手にしたウェハで、段差が検出できず、アライメントが不安定になったのは驚きであった。この CMP 技術の採用と進化は、光リソグラフィの延命に非常に大きな意味を持っていた。

CMP 技術の採用でリソグラフィのルールが変わったと言える。リソグラフィ技術の選定基準で重要な位置を占めていた焦点深度の要素がこの時に大幅に緩和されている。同時に、従来は段差の上下でレジスト膜厚が大きく変わるため、寸法精度の制御が非常に難しかったが、CMP により段差が解消され、レジスト膜厚に変化が無くなり、寸法精度も平坦基板上での値がそのまま実現できるようになりプロセス余裕が大幅に改善するという利点もあった。さらにレジストの薄膜化によって、解像度自体も飛躍的に向上したことは、実用上光リソグラフィの延命に大きな効果があった。

5.1.3. KrF(248nm) – Post i線

1984 年にi線ステッパの露光機が発表されたが、その前後にはi線より短い波長でのリソグラフィの研究が開始されている。i線がg線の後続になると決まっていなかった時期に、その当時から次(将来)として検討された波長を表 3 に示した。当時既に発振が確認されていた KrF エキシマレーザを光源とした装置開発がターゲットの一つとなった。最初の装置コンセプトは光源に KrF エキシマレーザを使用し、石英と蛍石の 2 種類の硝材を使用して縮小投影レンズの色収差補正を行うものであったが、後に普通に使われるようになった、露光波長の狭帯化の概念のものも検討されている。KrF エキシマレーザを使用してのリソグラフィの初期の応用として村原等¹⁵⁾が行った「PMMA ホログラフィック・グレーディングの作製」が知られている。

^s CMP: Chemical Mechanical Polish

KrF の露光装置開発の初期は材料開発が難しく、新規の性能評価を行うためには新規の材料開発が必要な状況であった。実験用の縮小投影レンズを開発しても、レジストがないため性能評価が出来ない状況が続き、唯一結像が行えることが知られていた樹脂、PMMA は感度が悪く、30 分近い露光が必要となり、30 分も DUV 光 (248nm) の光を通すと、レンズが光を吸収して熱膨張し、レンズ形状が変わり、レンズ性能が変わってしまう状況も生じた。レーザー開発においてもレーザーのビーム形状を測る手段がないなど、初期の開発は難航した。

1986 年の Bell 研の V.Pol¹²⁾ の SPIE での発表を受けて、KrF エキシマレーザを光源とするリソグラフィの研究開発が一気に広がった。まず、光源の KrF エキシマレーザの開発競争にレーザーメカとベンチャー企業が参入した。しかし、その技術を開発する困難さも瞬く間に知られるようになった。まず、光源はエキシマレーザで連続発振しない。パルスレーザで、安定しない。何よりもレーザーの運転コストが水銀灯とは比較できないほど高い等々である。

最初のレーザー開発は狭帯化を行わないエキシマレーザの開発であったが、レーザー寿命が 10^7 パルスを超えられず、レーザーの発振器を液体窒素で冷やすようなことまで行われた。過去に応用の用途が無かった遠紫外の波長(200nm 前後)だったため、物性値ですら信頼できる値が無く、反射防止膜の設計などに支障を生じた。また、生産性向上のためレーザー出力の向上も要求されていたが、発振器の性能に限界があり、繰り返し周波数を上げられず 1 パルス当たりのパワーを上げざるを得なかった。パルスのパワーを上げる弊害として、光学素子或いは光学薄膜への損傷が問題となった。凹レンズの凹面からの反射光が、他のレンズの内部で焦点を結ぶと、たとえ石英製のレンズであっても損傷・破壊し、コーティングはさらにデリケートであるなど、新規の経験を積み重ね光学設計にフィードバックすることが行われた。1987-8 年にはコマツと Cymer からリソグラフィ用の KrF エキシマレーザのプロトタイプ機が発売されている。

課題であったレーザー出力が安定したのは、エキシマレーザの発振器のスイッチング素子を真空管から固体素子に変えることにより、繰り返し発振周波数を上げることが可能となり、これによりピークパワー(瞬間的な出力)を抑えながら高出力が得られるようになったことが大きかった。

248nm の光は通常の光学ガラスを透過しないので、ガラスのレンズは使用できない。使える光学材料として石英と結晶材料の蛍石が検討された。それも不純物が入っていると光が吸収されてしまうので、高純度の物が必要となった。当初、熔融石英を使用することが検討されたが、熔融石英の光学的均質性を調べると、不純物が原因の吸収があり、使えるレベルに無く、更に不純物の少ない高純度石英を開発する必要もあった。また、縮小投影レンズに使用できるレベルの均質で透過率が高くさらに大型の蛍石がその時点で存在せず、開発も難航した。

光学レンズ材料としての石英の開発は、透過率の確保、カラーセンターの低減、均質性の向上そして大形硝材の確保等の課題が山積みであった。従来のレンズ硝材が熔融→固化→アニールのプロセスを経て作られていたのに対し、石英は気相反応(CVD 、 $SiH_4 + O_2 \rightarrow SiO_2 + 2H_2$)により SiO_2 の膜を積層して石英の塊を作り硝材としている。このため、均質性に関して従来のガラスでの経験では解決できない問題が生じている。更に石英材料は通常のガラス材料と比較すると“常軌を逸している”と思われる価格となり、同じ重さだと金より高いと言われた。また、縮小投影光学系が必要とするレンズの大きさは、従来の光学系が必要とするレンズよりもはるかに大きく、高い均質性と大きさの両方を満足することが要求されていた。

石英の開発は気相反応の利用で着実に進歩したが、蛍石の開発は進展せず、蛍石を使用しない縮小投影レンズ、色収差補正をしないレンズとレーザー波長の狭帯化の概念を組み合わせることが提案された。エキシマレーザの狭帯化は直ぐに大きな開発課題となった。レーザーの発振器の中に精密な光学素子であるエタロン或いはプリズムを挿入する必要があり、ダメージを如何に避けるかが具体的な課題となった。上述した発振周波数の向上と共に、パルス当たりの出力を下げることが可能になり狭帯化レーザー開発に目処がついてきた。しかしパルス間の出力の安定やミラーの汚れに起因する出力の低下をコントロールできず、 10^7 パルスと言うレーザーの寿命をなかなか更新できなかった。

レジストも従来のノボラック系のi線やg線レジストは透過率が悪くて使えないため、高分子樹脂から選択しなおす必要があった。更に、レーザの弱い出力光^tに対応するため、従来の10倍程度の感度が必要等々の課題が指摘されていた。

これらの課題に加え、レジストの開発も順調に行かなかった。従来レジストは248nmのKrF光に対し光の透過率が悪く使えず、新規ベースポリマーを、透過率を基準に選択していた。ここまでは力仕事なので順調に行くが、感度の向上と透過率の向上が両立できず、苦闘が続いていた。1982年に、IBMのH.Ito等が新しい化学増幅¹⁶⁾の概念を導入したレジストを発表する。IBMはこの新レジストの概念を利用し内製したレジストに、Micralignの露光波長にDeep UVを選択するフィルターを適用し、1MDRAMの生産に使用した。引き続き、発表は続いたが、使用された露光機がPerkin ElmerのMicralignやSVGのMicrascanと日本で使われていないものだったため、情報の評価が遅れた。1988年にIBMがShipley社にライセンスしたAPEXレジストが発表され、KrFリソグラフィがレジストに要求する感度と解像力を満たしていたため、化学増幅レジストの開発に火がついた。この状況でSVGLのMicrascanは存在感を示し、IBMが開発した化学増幅型レジストのAPEXと組み合わせ、IBMやインテルに導入されている。Micrascanはこの開発初期の段階で存在感を示したが、ワーキング・ディスタンス(レンズ最下面とウェハまでの距離)が短く、露光時に化学増幅型レジストから出る反応ガスでレンズ最下面が汚れる現象が生じ、先行したがシェアを伸ばせなかった。

これとは別に、化学増幅レジストに大きな欠点があることは、直ぐに知れ渡った。大気中に微量(~10ppb)の有機アルカリ、例えばアンモニアが存在すると、化学増幅レジストの表面で化学反応を生じ、レジスト表面に不溶性の膜を生じさせてしまう。有機アルカリは人間からも排出されるし、壁に塗った塗料からも微量が排出される等、不溶性膜が生成する条件が環境に依存したため、技術者は困惑した。レジスト塗布から露光現像の時間を短くする必要があるなどが対策として語られた。しかし、IBMが化学増幅レジストの開発初期にこの問題を把握し、化学汚染(Chemical contaminations)に起因すると原因を解明していたため、化学増幅レジストは救済された。化学増幅レジストに変わる高感度レジストは開発されず、最終的に化学汚染対策に、露光装置やレジスト塗布・現像装置は化学フィルタ(Chemical Filter)を用いて環境管理が行われるようになった。これにより化学増幅レジストのプロセスが安定した。また、1990年代半ばには各社から、多くの化学増幅レジストが発売され、1990年代半ばにはレジストの問題が解決した。

1986年にBell研のV.Polの発表で開発にトリガーのかかった露光機は、1988年にニコンからNSR-1505EX(15x15mm, NA=0.42, 解像力0.5 μ m)がプロト機として出荷され、上述のCymerとコマツのエキシマレーザが光源として採用された。デバイス各社には実験機或いはプロセス開発用として出荷された。当時量産されている最先端のデバイスの線幅は0.8 μ mであったが、その量産にはi線で十分であり、プロト機と言うこともありKrFが量産現場に導入されることはなかった。ニコンは1991年、1992年、1994年と量産対応のエキシマステップを市場に送るが、KrFレジストの性能(特に感度)が不十分で生産性を確保できず、またi線で量産が可能であることから、導入は常に見送られた。この間、生産性向上のため、i線を含む縮小投影レンズのフィールドサイズが15x15mmから17.5x17.5mm、更に22x22と代わり、これに対応せざるを得なかったこともある。また、量産への導入までに時間がかかり、開発費がなかなか回収できない状況も生じた。1988年の8年後の1996年にKrFステップNSR-2205EX12B(22x22mm, NA=0.55, 解像力0.28 μ m)が350nmプロセスの露光機として量産導入が開始された。350nmの解像力要求にi線での解像力追求の試みが追い付かなくなったのがトリガーとなった。量産導入迄に時間が掛ったのは、技術的にはレジストとレーザの安定性であり、経済的にはリソグラフィのコストであった。

^t パルスのレーザ光はパルス1発のエネルギー密度が非常に強い。注意して光を扱わないと(設計しないと)、レンズ材料、或いはレンズの表面コート膜に簡単にダメージを与えてしまう。ところがレジストを露光するのに必要な時間当たりのエネルギーはパルス光のため、生産性が確保できるほど強くなかった。

KrF エキシマレーザの安定性とレーザの寿命が 10^7 パルス程度で停滞していた時期に XeCl(308nm)エキシマレーザは安定しており 10^9 パルスのデータが示されていた。XeCl の検討は、もし十分な性能を持つ KrF エキシマレーザ或いは KrF レジストが完成しない場合を考えて行われ、XeCl(308 nm)の波長だと従来のノボラック樹脂系のレジストが使用できる可能性が有り、超高压水銀ランプのj線(313nm)でi線レジストをコンタクト露光した結果などを検討している。波長優位性から、XeClは KrF リソグラフィのバックアップとして位置付けられていたが、APEX レジストの出現と共に検討は自然消滅した。

KrF(248nm)は 1996 年に 350nm の量産を目的に量産導入が始まり、2003 年の 110nm 前後の当時の最先端素子製造まで、リソグラフィの主役となっている。この間、シリコン CMOS 素子はスケーリングに忠実で、微細化が新規のプロセス技術の導入を要求しなかったため、(微細化しても素子が動作し、新しい補正やモデルが必要とされなかった)、従来は 3 年毎 70%の微細化が普通であったが、この間は 2 年で線幅が 70%へと微細化が加速している。更にこの間に、ステッパからスキャンに方式が変わり、生産性が大幅に向上すると共に装置の精度も向上したが、装置が複雑になり装置価格の上昇も生じ、またレジストを含むプロセスのコストも効果になって行った。実績として顕著なのはレチクルのコストで、レチクル 1 セットの価格が 1 億円に近付いていった。これは OPC^u 等の近接効果補正のため、データ量が増加し、マスク描画機の描画時間が増加したことにより、レチクルの生産性が低下したことによる。この現象はこの後継続し、レチクルの価格は高止まりし、この後常に問題となる。

5.1.4. ArF(193nm) – Post KrF

ArF リソグラフィに関する最初の議論は“KrF リソグラフィの後に来るリソグラフィは何か？”であり、その候補の中に ArF は常に入っていたが、KrF で光リソグラフィは終わると主張している人もいた。同時に、KrF の後はやはり光リソグラフィで、光リソグラフィの中で考えると次は ArF と信じている人もおり、リソグラフィの選択肢は光以外のリソグラフィにも広がってきていた。

1986 年に KrF リソグラフィの開発にトリガーがかかったが、同時に KrF リソグラフィの解像力の限界についての議論も始まった。当時、波長を越える解像力を量産に適用することは難しいとされていたので、KrF リソグラフィは 250nm までは使えるが、それ以降は新規のリソグラフィが必要とされた。当時、光源として KrF エキシマレーザの開発が進められていたが、ArF も 193nm でエキシマレーザとして発振の可能性があることが早くから指摘されていた。更に、石英が KrF と同様に ArF でも透過率を持つことが分かっており、硝材としては石英と蛍石が使用可能なことから KrF の後の光リソグラフィは ArF と期待されていた。KrF の後継の波長として ArF が検討されたが、表 4 に KrF からの開発項目等を示した。

	KrF	ArF
n: $n \cdot \sin\theta$	1.0	←
λ : Wavelength	248 nm	193 nm
λ : Reduction ratio	-	22%
Light Source	Band Narrowing Excimer Laser	Band Narrowing Excimer Laser
Imaging Spaces	Air	←
New Lens Materials	Quartz / CaF ₂	Quartz / CaF ₂
Lens Type	Dioptric	←
Resist Materials	Polyhydroxy- styrene + CA	Alicyclic polymer Adamantylmethacrylates
Other New Materials		Coating Material Pellicle
Fluid Handling	-	-

表 4. Selection of Post KrF wavelength

^u OPC: Optical Proximity Correction

1989年にはH.Nakagawa等¹⁷⁾からArFリソグラフィについての発表が示されている。引き続き、1991年のSPIEでCymer¹⁸⁾がKrF用のレーザチャンバーでArFの発振に成功したと発表し、更に翌年1992年のSPIEでY.Kaimoto¹⁹⁾からArF波長(193nm)に十分な透過率を持つレジスト用のポリマーの発表があった。このポリマーは特殊な構造でなく、入手も容易であることから、i線やKrFでレジストの透過率の悪さが開発遅れを招いたことを知る開発者に、光源とレジストの開発要素が揃ったことでArFリソグラフィの開発は可能との印象を与えた。

しかし、現実の開発は難航した。縮小投影レンズの開発ではレンズ材料の石英の開発が再度必要となった。石英の透過率向上はもちろんであったが、石英にArFエキシマレーザ光を繰り返し照射すると、石英の体積が変わり、屈折率が変化してしまう、コンパクションと呼ばれる現象が生じる。KrFの光でも生じるが、ArFエキシマレーザのパルスのピーク強度(パルスの瞬間の強度)が強くなると、コンパクションが強くなる。また、弱いArFエキシマレーザ光を繰り返し照射しても、やはり屈折率が変化するレアファクションと呼ばれる現象も観察された。いずれも、縮小投影レンズの根本的な性能(寿命)にかかわることであり、合成石英の材料開発にまで戻ると同時に、ArFエキシマレーザにパルス(ビーム)・ストレッチ等のレーザのパワーを維持したままピーク・パワーだけを下げる技術の確立、あるいはレンズ設計で、光強度が強い部分のレンズ材料を蛍石に置き換える設計変更などが行われた。蛍石はレンズ硝材として要求される均質性をなかなか満足することができず、石英からの置き換えをいかに減らすかが課題となった。良質な蛍石の入手はArFの量産が始まってからも容易ではなく、蛍石の代替のために更に高純度で長寿命なコンパクション・フリーの石英を使用したArF縮小投影レンズの開発が続けられ、開発初期に使用されていた蛍石は使われなくなった。

反射防止膜に必要な光学材料の開発も困難に直面していた。193nmの波長は従来使われることが少ない特殊な波長であったため、信頼できる物性値が測定されている物質が少なく、材料開発と測定が繰り返し行われている。

また、ArFエキシマレーザを発振するのは可能であったが、レーザの窓材とコーティング膜の寿命と損傷防止、更には発振波長の狭帯化に伴う狭帯化素子(エタロンやプリズム)の損傷防止、レーザ出力の向上のため、パルス(ビーム)・ストレッチの開発と更には発振周波数の向上等々が要求された。

そして、結局時間がかかったのがレジストの開発であった。ベースポリマー等は存在したが、レジストを構成する全ての物質の透過率を、その機能を妨げることなく確保することが必要であった。このため、実際のレジストプロセスと互換性を持ち、十分な解像力を持つレジストはなかなか完成しなかった。1997年にIEDMのLate News²⁰⁾で90nmのArFレジスト像が初めて示され、レジスト開発の方向性に目処がつき、2001年に量産用のArF露光装置の導入が始まった。

1997年に250nmの量産がKrFの波長を用いて開始され、1999年には180nmの量産が波長よりも短い線幅にもかかわらずKrFで開始された。更に、2001年に130nmの量産が開始されたが、これにもKrFの露光装置が用いられている。頑張れば130nmのメモリデバイスをKrFで作ることが可能であり、ArFのリソグラフィ・コストを考えるとKrFを使い続けた方が安く作れることが明らかであったためArFリソグラフィの準備が完了しているにもかかわらず採用はされなかった。

130nmよりも微細なデバイス、例えば120nmのデザインルールを持つデバイスをKrFで作ることは、当時のOPC技術では難しく、これらのデバイスの開発や量産に向けてArF露光機の導入が始まった。2004年に90nmの量産が始まり、ArFリソグラフィが量産用露光機として採用された。KrFリソグラフィは90nmには現在まで適用できないでいるが、その後の技術の進歩に伴い120nmあるいは110nmの素子の製造に使用された。KrFのリソグラフィ・コストの方がArFのそれよりも安かったことによる。

1992年に米国でロードマップ活動が始まり、1998年からは国際ロードマップ活動となり、1999年には最初のITRSが刊行されている。2001年、2003年とITRSが版を重ねるごとに、リソグラフィの情報の共有化が世界中で進み、KrFの限界とArFの導入時の“ツボ”が共有されていった。

2004年に90nmの量産にArFが採用された時には、同じぐらいの熱心さでArFの限界論とPost ArFの議論がなされていた。実に、ArFの限界とPost ArFの議論は1999年に180nmの量産がKrFで開始された時には始まっていた。90nmはArFの波長の半分であり、リソグラフィにArFが適用できる最後の寸法と考えられていた。すなわちArFはワンポイントでしか使えず、直ぐにPost-ArFが必要になると予想されていたため、可能なら飛ばしたいとの考え方もあり、ArFの導入が遅れる理由ともなった。しかし、KrFに比べて多くの課題はあったが、ArFは世界中で量産導入され、90nm及び65nmデバイスの量産に使用されている。

ArFの開発の進展と共に、SEMATECHが中心となりArF開発を推進するWorld Wide Collaborationが始まり、その後のリソグラフィ開発ではコラボレーションはごく普通の物となった。SEMATECHの行ったのは開発状況の情報共有と問題点の抽出であったが、開発費の高騰に悩む各社から大きな支持を受けている。

5.1.5. ArF 液浸と F₂ – Post ArF/NGL

前述した図 15 の ITRS の "Potential Solution" の変遷¹²⁾を見ると、ArFへの期待度は大きくなかったことが読み取れる。Post ArFは世界中でリソグラフィの情報が共有化された議論であり、Post ArFのリソグラフィ技術の情報が溢れていた。更にSEMATECHが情報共有のための会議^vを定期的に行き、リソグラフィ開発に目を光らせ微細化に支障が生じないように業界を導いていた。光リソグラフィは三つの技術が議論され、それ以外に電子ビームやイオン・ビームを用いた技術もPost ArFとして提案され、光リソグラフィと同時に議論されていた。この議論の総称をNGL: Next Generation Lithographyと呼ぶことが多くなった。ここでは光リソグラフィを中心に述べる。EUVを光リソグラフィに入れるかどうか議論のある所であるが、ここでは光リソグラフィに注目して議論を進める。ArFの後継として議論された光の波長を表5にまとめ、課題や開発項目を示した。

最初にPost ArFと言うよりは光リソグラフィの後継者として存在感を示したのは、EUVLである。1986年にNTTの木下等^{21) 22)}が多層膜ミラーを使用した軟X線縮小投影リソグラフィを提案した。これを受けて、IBMやインテルなどが中心となり、1997年にEUV LLCと言う開発コンソーシアムを立ち上げ、開発を開始した。EUV: Extreme Ultra Violet (極端紫外)の名称は、軟X線リソグラフィの開発でDARPAなどからすでに資金を集めており、新たに軟X線を用いたリソグラフィの開発資金入手に問題が生じないように作り出した造語と言われている。日本にもEUV LLCから、「最初の50台或いは100台の予約は既に成立している。51台目或いは101台目の装置を予約するには数億円の手付金が必要」と売り込みがあった。開発費の捻出を目的とした売込みである。

	ArF	F ₂	ArF Immersion	EUVL
n: n·sinθ	1.0	←	1.44	1.0
λ: Wavelength	193 nm	157 nm	134 nm	13.5nm
λ: Reduction ratio	-	19%	31%	93%
Light Source	Band Narrowing Excimer Laser	Band Narrowing Excimer Laser	Band Narrowing Excimer Laser	Plasma Produce Light Source
Imaging Spaces	Air	N ₂	Air	Vacuum
New Lens Materials	Quartz	CaF ₂ Birefringence Homogeneity	Quartz / CaF ₂	Mo/Si Multi-layered Mirror
Lens Type	Dioptric	Catadioptric	Dioptric /Catadioptric	Catoptric
Resist Materials	Polyhydroxy-styrene + CA	F Contained Polymer	Polyhydroxy-styrene + CA	Similar to KrF Outgassing
Other New Materials	-	Coating Material Pellicle	-	No Pellicle
Fluid Handling	-	-	H ₂ O	-
Other Issues	-	-	Polarization Control	Many

表 5. Selection of Post ArF wavelength

^v SEMATECH 主催のリソグラフィ関連の会議の資料が集められている。
<http://www.semtech.org/meetings/archives/liitho/index.htm>

日本でも、ASET(超先端電子技術開発機構)厚木センターが 1998 年から要素技術の開発を開始し、2002 年 6 月に経済産業省と NEDO の支援を受け、EUVA(技術研究組合 極端紫外線露光システム技術開発機構)が発足している。また、研究開発を加速するため、SEMATECH や IMEC などを中心に研究のコラボレーションが行われ、情報の共有が進められていた。 EUVL は 13.5nm の光を使用するが、この領域の光を透過する物質が存在しないため、従来の光学系とは異なりマスクを含め全て多層膜反射鏡(ミラー)で構成される。大気にも光が吸収されてしまうため、光学系を含め全ての構成要素を真空中に保持する必要がある。光源を始めとして、露光光学系、マスク、レジストなどの全てが新規開発の位置づけであったが、2007 年 65nm ノードでの量産展開に適用することを目標として国際的な開発コラボレーションが組織され、開発を始めていた。現在も 2018 年 14nm を目標に開発が続けられている。

今現在も EUV リソグラフィの最大の課題は光源の強度の確保であり、これは 1980 年代に開発が検討された軟 X 線リソグラフィの時と同じ課題である。しかし、微細化を追求する半導体業界は要素技術や材料の新規開発が必要であることを承知で EUVL の開発にまい進し続けている。これは従来の ArF までに培った光リソグラフィのノウハウ、マスクパターンをウェハ上に転写するコンセプトから、パターンの近接効果補正等々までをそのまま応用できるからである。量産に導入されるためには、まず生産性を確保するための光源強度の向上が必要であるが、現状まだハードルは高い。更に、光源の強度が達成された後に浮上してくるレジストやマスクの問題、そしてペリクルが存在しないことで生じる問題も解決しなければならない。

EUV の最大の利点は、光には EB や Ion Beam に見られる粒子間の相互作用が無く、テラバイトを越すマスク上の回路情報を一瞬でウェハに転写できる生産性の高さにある。

同時に検討されたのが、従来技術の延長線上の短波長化を迫及した、157nm(F₂) である。光リソグラフィの延命を検討する際、短波長化を考慮するのは必須事項である。従来と同様の装置構成を考えるためには、光源が確保できることとレンズとして使用できる透明性が約束された硝材が必要になる。ArF より短い波長でレーザー発振する可能性がある波長をリストアップし、その波長で透過する可能性のある物質を付け加えたのが表 6 である²³。表から明らかなように選択肢は F₂(157nm)だけが残る。

1997 年に MIT LL から F₂ の可能性が発表され、早くも翌年 1998 年 10 月に F₂ は米国 SIA のロードマップに記載され、100nm の Potential Solution となる。日本はメーカーが個別に研究を進めるが、石英の F₂ 光透過率が悪いため、マスクを蛍石で作ることが前提となっていた。蛍石の熱膨張率が大きいため、マスクに問題が生じるとして、研究は限定的であった。1999 年初頭にフッ素を添加した石英が 157nm の光を透過しマスクとして使用可能であることが示され、開発状況が急展開する。1999 年 7 月には VUV ワークショップが日本で開催され F₂ の開発を加速し、ASET で 100-70nm のリソグラフィを目標に開発が始まる。1999 年から世界各極で F₂ のコンソーシアム活動(日本では Selete で行われた。)が急激に開始されているのは、国際的なコラボレーションに

Gas	Wavelength (nm)	Laser	Lens Glass	Lens Coating	Purge	Resist
ArF	193	Commercially available	Quartz	Available	Not required	Available
F ₂	157	Commercially available	CaF ₂	Requires development	N ₂	Requires development
Kr ₂	147	Oscillated*	CaF ₂	?	He	?
KrAr	134	Not oscillated	CaF ₂ ?	?	He	?
Ar ₂	126	Not oscillated	MgF ₂ ?	?	He	?
Ne ₂	80	Not oscillated	?	?	?	?

* The maximum laser energy at 148 nm was 150 μJ ²³⁾

表 6. Available gas based sources and constituent materials status for each.

より情報の共有が進んだことによる。コラボレーションの急速な進展には、開発費の増大で単独では F_2 と EUV の二つのリソグラフィの開発を支えきれない背景があった。

$F_2(157\text{nm})$ は真空紫外の光で、大気中の酸素により吸収されてしまうため、光路を窒素置換する必要があり、レンズ硝材は蛍石、光源として F_2 レーザ、そしてレジストはフッ素含有の高分子の開発が新規に必要であった。 F_2 レーザの半値幅とレンズが許容する色消しの波長幅に原理的に大きな差があることから、縮小投影レンズの大きな変更も必要で、反射屈折系レンズの新規開発も必要となった。

また、材料開発ではレンズ硝材の蛍石の開発が難航した。蛍石は結晶であり、投影レンズの大きさの結晶を育てるのには1ヶ月程度は掛かる。このため、結晶成長実験の繰り返し回数を上げるのが難しく、結晶内の光学特性の均質性を整えることが最大の課題であった。また、縮小投影レンズの性能を確保するために必要な反射防止膜も光学薄膜用材料の物性に限界があり、必要な性能を満たすことが出来ずにいた。

2001年5月に米国 NIST の J.H.Burnett²⁴⁾から可視光では問題ないのだが、真空紫外光を使用すると蛍石は複屈折を持つことを報告した。この問題は光学設計に大きな制約を与え、大きな話題となったが、光学設計上の工夫で解決できることが示されている。

レジストの開発も難航したが、ペリクル用の高分子膜でも F_2 に耐性のあるものが見つからなかった。2005年の量産展開を目標に開発を進めていたが、後述する ArF 液浸リソグラフィの開発提案とその進捗により、2003年5月にインテルが F_2 の開発を止め、開発リソースを液浸に向けてと発表した。その後、約半年で日本を除く全ての F_2 開発は停止した。インテルはペリクル材料が見出せないことを F_2 開発中止の理由としている。 F_2 の開発中止の決断は露光装置メーカーに痛手を与えた。露光機メーカー 2 社はそれぞれのプロト機をほぼ完成させるところまで開発を進めており、開発中止の理由が露光機や光源でなくインフラ(レジスト、ペリクル等)の開発見通しに合ったことに衝撃を受けた。

F_2 リソグラフィの開発過程で新規に開発された技術は、その後の装置開発に効率よく有効に使用され、また他のリソグラフィ装置に適用されている。蛍石均質性と安定性は、 F_2 波長の縮小投影レンズが要求する仕様を満たすことが出来なかったが、ArF の波長での光の透過率と ArF 波長の光に対する耐性(コンパクション・フリー)は、ArF 照明系用硝材として最適であり、量産用 ArF 露光装置に搭載されている。また、蛍石を研磨する技術は ArF 縮小投影レンズの研磨技術に適用され、生産性の向上に寄与するばかりでなく、EUV 光学系の研磨技術向上に寄与している。

最後に提案されたのが ArF 液浸リソグラフィである。液浸の概念は顕微鏡では標準的なもので古くから実用されている。対物レンズ(液浸用に設計された)と試料の間の空間を液体で充填することにより高い解像力を得てきた。液浸では投影レンズとウェハの間を液体で満たすことにより $NA>1$ を達成することが出来る。液浸リソグラフィは 2002 年の SPIE において TSMC の B.J.Lin²⁵⁾が開発の必要性を訴え、ArF (193nm)を液浸に適用するとき液体の媒体として水の使用を提案し、その屈折率が 1.44 であることを示したが、会場の反応は限定的なものであった。同年秋の SEMATECH 主催の 157nm シンポジウムでも ArF 液浸が議論されたが、注目を集めた割には液浸を肯定する意見は少なかった。

翌 2003 年の SPIE で従来の ArF レジストが液浸の状態でも結像可能であり²⁶⁾、レンズとウェハの間に水が保持できることが示された。これ以降、停滞する F_2 リソグラフィの開発を置き去りにし、世界の注目が液浸に集まった。2003年7月の SEMATECH の会議では ArF 液浸リソグラフィの開発に大きな課題(Show-stopper)は無いと結論付けられている。開発時の大きな課題はプロセス中に液体に含まれるパーティクルの問題であり、リソグラフィとして致命的なものにはならなかった。世界中のコラボレーションもあり、2005年には早くも ArF 液浸露光装置が出荷され、2006年末には量産用の露光装置が量産ラインに導入されている。

ArF 液浸リソグラフィは 65nm 及び 45nm の量産用装置として導入された。導入までの課題として、液浸用の水が集めてしまうパーティクルと欠陥の問題とレジストの安定性に問題があったが、量産までに解決されている。

この問題解決には情報の開示とコラボレーションが積極的に利用された。問題解決に係わる人を情報開示により多くして、問題が早期に解決されている。一つのコラボレーションの形が確立されている。

ArF 液浸が導入された背景として、65nm と 45nm の市場の存在が明らかで、デバイスの開発と量産スケジュールが議論されている時に、F₂ と EUV の開発状況が量産での実使用に程遠い状態であったことが上げられる。リソグラフィのマーケットは液浸の導入を最後には歓迎し、NA は 1 を超えることはないというルールをあっさり変更している。光リソグラフィ以外の手法の導入も検討されたが、非常におざなりであった気がする。

5.1.6. Double Patterning – Post ArF 液浸

ArF 液浸リソグラフィは比較的順調に短時間で立ち上がったが、その解像力の限界は水の屈折率が 1.44 であることから直ぐに計算できてしまう。直ぐに 32nm のリソグラフィの検討が始まる。光リソグラフィの候補は 3 方式である。最初はやはり EUV である。65nm 用の露光技術として検討するには時間が無く、進展が期待されたが、光源の開発が満足に行くものでなく、解像力には余裕が有ることから、2018 年 14nm を目標に開発が続けられている。

次に検討されたのは表 7 に示した高屈折率液浸と F₂ の液浸である。ArF の波長に対して水の屈折率は 1.44 であるが、1.65 或いは 1.80 を超える屈折率の液体の使用と開発が提案された。この高い屈折率を生かすため、ガラス材料も屈折率の高い LuAG(n=2.14)と呼ばれるガーネット系の結晶も提案されている。両方の材料は精力的に検討されたが、期待されていた n=1.65 の高屈折率の液体が石油のような可燃物であることが知られると、防爆対応の露光機は考えられず、期待度は一気に低下した。n>1.80 の液体はナノテクノロジー研究の一環として提唱されたもので、ある種のナノパーティクルを液体に懸濁することで屈折率を上げられることが計算で示されたことを根拠とした提案であった。実験的な実証が試みられたが、結果が出る前に、水を液浸液とした従来の ArF 液浸リソグラフィでのパーティクル欠陥の問題が大きくなり、いつの間にか話題とならなくなった。また、高屈折率レンズ材料として LuAG も開発を進められたが、結晶の透過率、均質性、大きさのいずれも投影レンズの要求から程遠い状態であった。F₂ の液浸は 1997 年に MIT が F₂ を提案したときにその延命方法として提示されている。リストには残ったが、F₂ の開発中止に伴い忘れられている。

最後に検討されたのが、Double Patterning である。アライメント精度があれば、従来の解像力を半分にできるため、リソグラフィ・コストの増大を無視して使われ始めた。特に微細化の追求を急いでおり、露光パターンに繰り返しが多くこの手法を受け入れることによる設計制約の少ない、Flash メモリの製造ラインは一気にこの方法を取り入れた。

Logic 系のデバイスは設計制約が生じることを嫌うことから、他のリソグラフィ特に EUV を望む声が出ている。しかし、EUV が未完成で間に合わず、32nm 以下の微細なパターンを作る方法が他に無く、(嫌々)受け入れら

	媒体 Media	屈折率 n Index	実効波長 λ/n Equivalent	等価波長比 Ratio
ArF (193nm) dry	Air	1.0	193nm	1.00
<i>KrF (248nm) immersion</i>	<i>H₂O</i>	<i>1.36</i>	<i>182nm</i>	<i>0.94</i>
<i>F₂ (157nm) dry</i>	<i>N₂</i>	<i>1.0</i>	<i>157nm</i>	<i>0.81</i>
ArF (193nm) immersion	H₂O	1.44	134nm	0.69
<i>ArF High Index Immersion (2nd generation)</i>	<i>Organic Fluid</i>	<i>~1.65</i>	<i>~117nm</i>	<i>0.61</i>
<i>F₂ (157nm) immersion</i>	<i>PFPE</i>	<i>1.37</i>	<i>115nm</i>	<i>0.60</i>
<i>ArF High Index Immersion (3rd generation)</i>	<i>Organic Fluid or Nano particle composite</i>	<i>>1.80</i>	<i><107nm</i>	<i>0.56</i>

表 7. 検討された液浸と実効波長

32nmと22nmのリソグラフィは Double Patterning であるが、早くも 15nm 以下のリソグラフィが議論されている。多重露光: Multi Patterning と EUV が候補になっている。EUV の光源のパワーが十分になり、そのほかの問題が解決することを期待し、EUV に対する期待は大きい。しかし今まで期待を裏切り続けていたため、多重露光とそのプロセスを工夫したものを現実解とする提案も多い。Multi Patterning の課題はプロセスの複雑さ、コスト、そして生産性である。

Si 半導体の集積度が何処まで進めるか、明確な方向が示されなくなり始めている。巨額のリソグラフィへの開発投資を続けるべきかの議論もこれから始まると共に、上記のリソグラフィ技術が、産業が必要とする生産性を確保できているか見守る必要がある。或いは真剣に光以外のリソグラフィを含め、更に二つ以上のリソグラフィを組み合わせるような、ハイブリッド・リソグラフィも検討する時期に来ている。

将来(今後)の露光装置に要求される解像力や精度を達成するためには極限の技術が要求され、膨大な開発費用が発生する。更に達成するために必要な技術の難しさを考えるとリスクも大きく、更に新規の材料開発を伴う。露光機メーカーが単独で、或いはデバイスメーカーと露光機メーカーが組んでも、その装置開発の或いはリソグラフィ全体を開発する巨額の費用を追い切れなくなっている。このため、リソグラフィ手法と装置の開発は世界のコラボレーションが前提となる。リスクが大きすぎるため、競争から外れる技術になってしまった。また、逆に、抜け駆けや単独での異なる技術を開発することも経済的に成立しない状況にリソグラフィはある。

5.2. 光学系の高 NA 化

$$Resolution = k_1 \cdot \lambda / NA \quad (1)$$

$$NA = n \cdot \sin \theta \quad (2)$$

前述した式を繰り返し示すが、式(1)で示されるように、NA は分母に入っているため NA を大きくすると解像力は向上する。NA は式(2)のように示されるが、ここで θ は図 17 に示す角度であり、NA=0.50 では $\theta=30^\circ$ であり、NA=0.93 では $\theta=68.5^\circ$ となる。また、液浸を想定し $n=1.44$ の水の屈折率を式(2)に代入し、更に式(2)に $\sin \theta=0.935$ の大気中で達成された値を代入すると NA=1.35 となり、 $\theta=69.5^\circ$ となる。

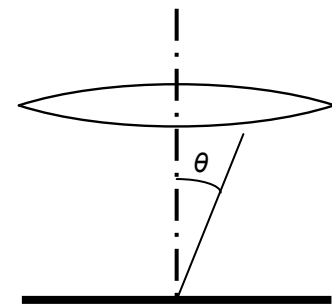


図 17 入射角 θ

1:1 等倍投影露光装置の NA は 0.167 である。その後縮小投影露光装置に方式が変わり、縮小投影レンズが採用された。投影レンズの NA は最初 0.3 程度から始まり、図 18 に示したように、縮小投影レンズの NA は時代と共に大きくなっている。NA が 0.60 前後になるまで、NA は順調に大きくなり受け入れられてゆく。しかし、NA が 0.6 程度になると焦点深度を確保する必要が生じ、NA の拡大は停滞する。CMP がプロセスに導入されると共に焦点深度の束縛が無くなり NA は大きくなり、最終的に 0.90 を超える NA が達成される。NA は 1.0 まで理論的に可能であるが、現実的な限界は 0.90 を超えたところで、当然のように NA の増大は停止する。その後、液浸が導入され、NA は 1.0 を超え、水の屈折率 1.44 に近付き、NA=1.35 が達成されている。

縮小投影レンズの設計ではウェハからレチクルまでの距離を一定に収めることが求められると共に、レンズの最大径にも制約がある。また、ウェハとレンズ最下面までの距離(ワーキング・ディスタンス)を確保することが必要となる。レンズの全長は露光装置の大きさ、特に装置高さに影響するため厳しく制限される。またレンズ径はレンズ材料を準備するレンズ製造プロセス全体の設備により決まり、変更はプロセス設備の新規投資を意味するので、設計上厳しく規制される。ワーキングディスタンスの確保は露光時のレジストからの反応生成物(アウトガス)でレンズが汚れることを防ぐために必須であるが、ワーキングディスタンスを大きく取るとウェハに近いレンズの径が大きくなるなど、バランスが必要となる。

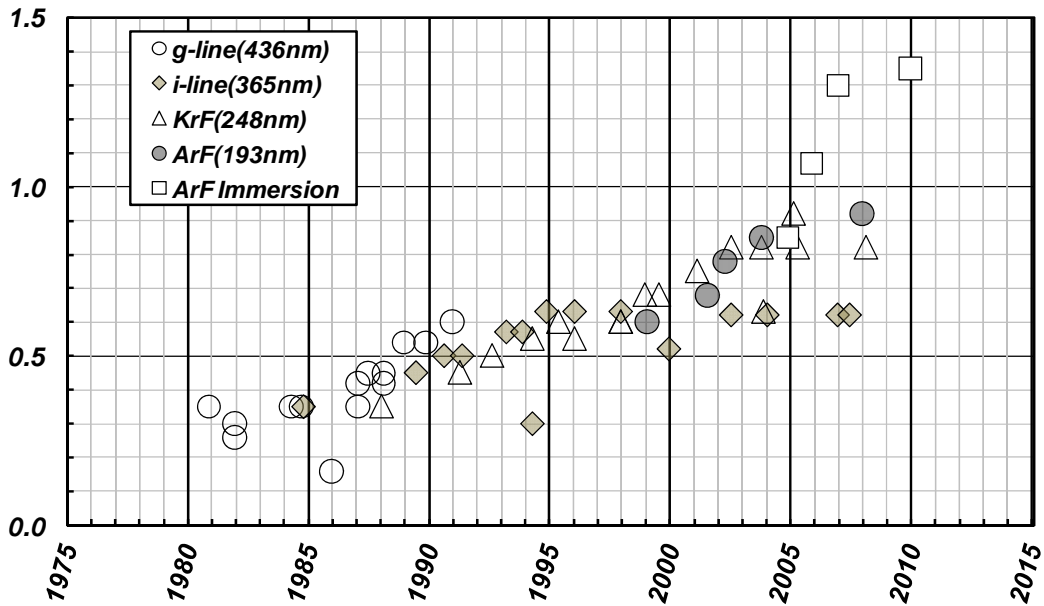


図 18. Progress of NA

NA が大きくなり、波長が短くなって解像力が向上するときに、レンズの反射防止膜の進歩、レンズの設計収差の低減、そしてレンズの組立てと検査調整技術の進歩(革新)が必要であった。更に NA が大きくなり対象線幅小さくなると焦点深度が小さくなり、線幅と同等の焦点深度しか得られなくなる。このためオートフォーカス精度の向上と露光フィールド内の焦点位置の均一性の確保などの収差の向上が更に重要となるが、ここでは専門的過ぎるので詳細な技術には触れない。図 18 に示されているように、レンズの NA の進歩に大きなジャンプは存在していない。NA を大きくし、収差を小さくし、波長を短くするのはいずれも技術的なチャレンジであり、結果をフィードバックしながら次の設計を行い、解像力を向上しているため NA は徐々に大きくなってきている。また、NA > 1.0 となる液浸用の縮小投影レンズでは、色収差を補正するためにレンズの中に反射ミラーが挿入された反射屈折(Catadioptric) のレンズが採用されている。

5.3. Low- k_1 による解像力の向上

式(1)で示されるように、 k_1 を小さくすれば解像力は向上する。1980 年代には k_1 は 0.8 でなければならないとされていた。±1 μ m の焦点深度の範囲内で密集線と孤立線に寸法差が出ないことが必要であったため、現在のように計算機で近接効果補正が簡単に計算できる環境が無かったことによる。図 19(a)にその当時の空間像を示した。0.8 μ m の密集線を g 線 NA=0.45 のレンズで露光している。式(3)に

$$k_1 = \text{Resolution} \cdot \frac{NA}{\lambda} \quad (3)$$

代入して k_1 を求める。 $k_1=0.83$ で k_1 は 0.8 よりも大きい。空間像を見ると Best Focus と 1 μ m 焦点がずれた位置での空間像の差異は小さく、僅かに先端が丸まっているだけで、孤立線の影響を示す両端の空間像の中心位置は動いていない。

これに対して図 19 (b)に ArF 液浸、NA=1.20 を用いて 45nm を露光したときの空間像を示した。 k_1 は 0.28 に相当する。線幅が密集線の 1/2 の幅の補助パターンを 2 本入れているが、ラインとスペースが等しくなる条件で、150nm 焦点をずらすと孤立線の性格を持つ 5 本線の両端はほとんど消えてしまうことが分かる。密集線と孤立線を別個に補正するような近接効果補正を前提とすれば、計算機を使い計算でパターン全面に補正を行う、 $k_1=0.28$ でもリソグラフィを行うことができるが、パターンの種類や配置、形状に対して厳しい制約条件を満たすことが求められる。

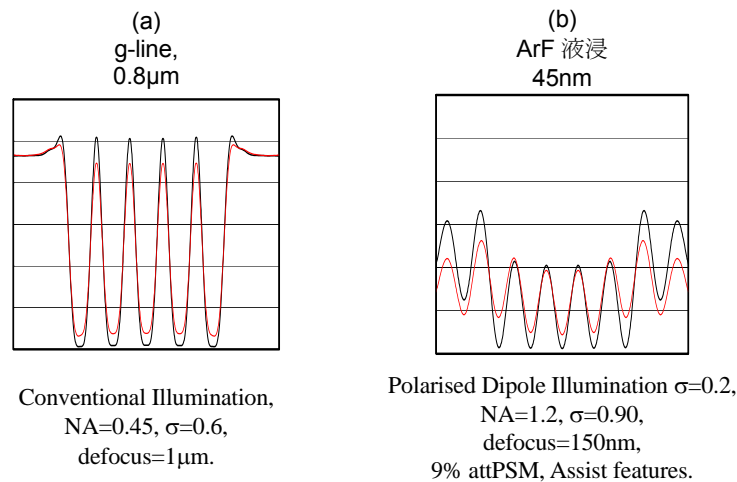


図 19. RET の導入と空間像の崩れ¹⁴

大事なことは図 19(a)、(b)に示した大きく差のある空間像から、寸法を制御したレジスト像を作ること、言い換えると、弱いコントラストの光強度分布から精度の高いレジスト像を作ることの出来る、高性能のレジストが存在することである。図 20 にリソグラフィにおける k_1 値の変遷を示すが、この図はレジストの性能の進歩を示しているとも言える。

前述した図 16 に Resolution Enhancement Technology が示してあるが、二光束干渉の結像や光の位相制御などを導入し、ダミーパターンを挿入して回折光の分布を操作することなどを行い、例えばコントラストを配分し、全体をしてコントラストを落としながら焦点深度を伸ばす、或いはコントラストを落とすことを前提に解像力を改善するなどを行うことができる。この種の操作はコントラストが落ちるので、技術的に難易度が高くなるが、従来の技術(波長)或いは装置を延命することが可能となる。(次の世代の解像度を生み出す装置となる可能性があることによる。)

初期には実験結果から、後に計算機の能力が向上してからは計算により、コントラストの低下によるパターン

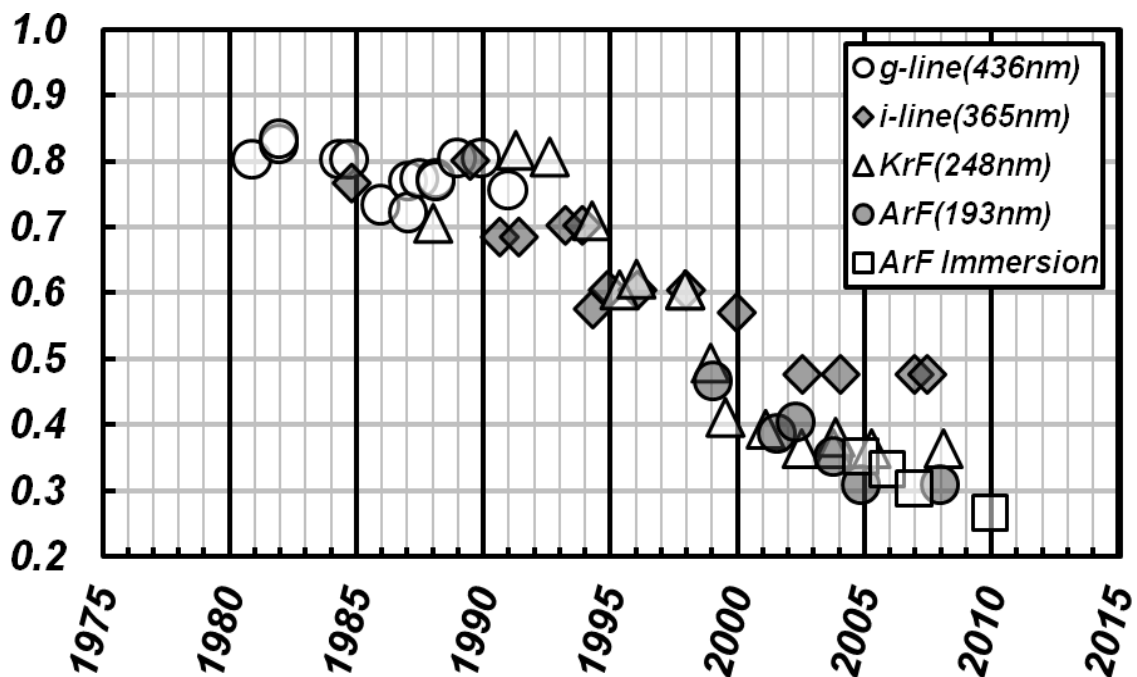


図 20. 光リソグラフィにおける k_1 値の変遷

の歪・変形の補正を行っている。半導体素子 1 個の全面に対して補正を行う必要がある。 k_1 値が小さいほど大規模な修正・補正が必要となる。更にパターンの数も計算量増大の要因となる。計算機の能力を向上させる CPU の計算能力の向上により、リソグラフィ用のパターン設計とマスク上のパターン補正に必須な技術となり、計算機の能力が $Low-k_1$ のリソグラフィを支えている。

しかし、この方式には代償があり、複雑なパターンを計算すると計算と現実のマッチングが難しく、計算時間も膨大となるため、デバイスパターンの単純化が必要となり、また解像力を確保する条件を優先すると、設計への制約が非常に大きくなる。効果を最大にするためにはパターンのピッチを固定する必要があり、レイアウト設計に大きな制約を与えることになった。また、空間像の測定が可能となり、直接計測技術の進展と共に(計算能力の向上)、縮小投影レンズの収差調整技術は著しい進化を見せている。縮小投影レンズのレンズ性能(収差)の向上が $Low-k_1$ リソグラフィを可能にしたとも言える。

KrF の量産展開が遅れ、i線の延命が必要になると共にこの RET の技術の導入は始まり、現在は光リソグラフィの原理的な限界を打破する手段として用いられている。すなわち、 k_1 は原理的に 0.25 よりも小さくできない。しかし、露光を 2 回に分ければこの限りでなく、2 回或いは複数回の露光を用いて k_1 を 0.25 よりも更に小さくすることがすでに行われている。Double Patterning 或いは Multi-Patterning としてすでに実用にされている。

6. マスクとレジスト — リソグラフィの欠かせない要素技術

リソグラフィを議論する時、リソグラフィ装置とリソグラフィ技術が主に話題となり、マスクとレジストは装置技術の一部としての扱いを受けることが多い。

6.1 マスク

初期のマスクはエマルジョン・ガラスマスクで大きさは使用するウェハの径よりも 1 インチ大きいものが使用され、ガラス基板の厚さは 1.5mm である。(3 インチウェハに対しては 4006:4x4x0.06 インチのガラス基板が使用された。) エマルジョン・ガラスマスクの膜面は銀乳剤(現像して黒化金属銀を作り遮光パターンにする)のため、ウェハとエマルジョン・マスクが強く接触したり、誤ってエマルジョンガラスマスクを他の物に接触させた場合、そのマスク表面にキズ等を発生させる場合が生じた。エマルジョンの遮光パターンを Cr(金属クロム膜)に置き換えたマスクは早くから提案されていたが、エマルジョンマスクとの価格差が無視できないほど大きく、特別な場合にしか使用されなかった。

1:1 等倍投影露光装置が導入され、コントラストを上げる必要が生じたため、エマルジョンの遮光パターンを Cr(金属クロム膜)に置き換えたマスクの使用が推奨された。置き換えにより、転写したパターンのコントラストが上がり、転写パターンのレジストのエッジがシャープになったことが知られている。また、重ね合わせ精度の要求が厳しくなったため、熱による膨張を避けるためマスク基板はソーダガラスから石英に変更されている。

ステッパが導入されると 2.3mm の厚さの 5 インチレチクル^W (5009 のマスク規格:5x5x0.09 インチ) が用いられるようになり、基板には熱変形を考慮して石英が継続して使用されている。Cr の遮光幕が使用され Cr 厚は OD3: Optical Density=3(透過率が 1/1000)以上の遮光率が求められている。1:1 等倍投影露光装置に対しステッパでは倍率が 5 倍であったため、パターンの描画精度の要求は 1/5 に緩和されたが、微細化の進行に伴い描画精度への要求は厳しくなっていった。Cr のパターンを描画するため、初期にはフォトリピーターが使用され、その後微細化の進行とともに EB 描画装置が先端デバイス用マスクの制作に用いられるようになった。一方で 1980 年代後半にはポリゴンミラーとレーザを使用したレーザ描画装置も開発された。レーザ描画装置は EB 描画装置に比べて解像力は劣るが、大気中で露光が可能で、光リソグラフィ用のレジストが使用可能であるなど使いやすさと生産性で勝り、現在も汎用マスクの製造に使用されている。

^W ステッパやスキャナに使用するマスクをレチクルと呼ぶ。

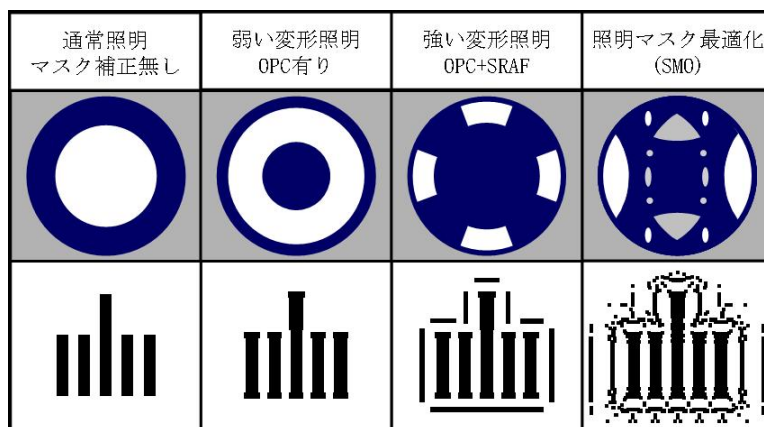


図 21 Low- k_1 対応の照明とマスク(OPC と SRAF)

上段:照明系2次光源面の開口。

下段:マスクパターンに OPC が付き、更に SRAF が付く。

ステッパやその後使用されるスキヤナでは、1枚のレチクルが描画するのはウェハのごく1部のエリアであり、それを繰り返し露光転写する。従って、レチクル上のゴミや欠陥は繰り返しウェハに転写されてしまうため、完璧なレチクルをゴミのない状態で使用することが求められる。欠陥は検査を繰り返し、パターンの修正を行うことでゼロにしている。またゴミはペリクル膜をレチクルに導入することで排除することに成功している。

ステッパの露光フィールドに 20x20mm が採用されると(後に 22x22mm になるが)、6インチレチクル(6025のマスク規格:6x6x0.25インチ)が採用された。後にスキヤナが 26x33mm の露光フィールドを採用すると、新たなマスク工場の投資を避けるため 6インチレチクルを維持したまま、倍率を 5倍から 4倍に変更した。これは 20%の精度向上を強いたが、マスク製造の製造精度に余裕があったことと(主に EB 描画装置の描画精度に余裕があったため)、マスク工場への新規投資の余裕がなかったこともあり、大きな議論にはならなかった。

Low- k_1 のリソグラフィの進展とともにマスクへの負荷は増大し、位相シフトレチクルが実際のデバイス製造プロセスに導入された。位相シフトレチクルでは露光光がレチクルを透過したときに位相を制御することを行うため、基板の石英を部分的に光の位相に相当する深さにエッチングし、或いは別の手法では遮光パターンの透過率を従来の 1/1000 から 6%前後の計算で指定された値に変更するなどが求められた。マスクの描画精度も要求が厳しくなり、Low- k_1 が進行するとともに MEF: Mask Error Factor のように、マスクの製造誤差がウェハ転写時に増幅される現象を数値化する手法も議論されている。

Low- k_1 リソグラフィの進展が進むと、所望のレジスト形状を得るためにレチクル上のパターンを修正することが日常的に行われるようになる。更にこの手法が進展するにつれて、パターンの修正はより細かくなり、パターンの変形も多くなり、結果としてレチクルパターンの情報量が増大する。光リソグラフィの解像力を“絞り出す”ために、レチクルのパターンと光露光装置照明系の 2次光源面出口での光強度分布を計算により最適化する SMO^x という技術が提案されている。この技術を適用した時のマスクパターンの例を図 21 に示した。半導体素子の進歩により計算速度は大幅に増大しているため、より精密なパターンの変形や修正が可能となり、その結果更にレチクルパターンのデータ量は増大する。この膨大なデータを元に EB 描画機でレチクルの描画を行うと、既に 1枚のレチクル描画が 1日で終わらない例がごく普通に報告されるようになってきている。更に検査や修正のコストは描画よりも高く、レチクルの検査や修正に負荷をかけ、レチクルコストの増大を招く要因ともなっていると指摘されている。

微細化の進行と共に、従来には問題とならなかった事象も管理することが求められるようになる。例えばマスクの平坦度である。マスク(レチクル)は露光装置に挿入して使用されるが、転写される回路パターンの部分は保

^x SMO: Source Mask Optimization

持できないし、光路を遮ることもできない。従って、マスクの周辺部を真空チャックして固定保持するのが一般的である。ところが、周辺しか持つことができず、浮いている状態となるマスク中心部、特に回路パターンの描画されている部分を正確な場所に保持する難しさは要求される精度に依存する。初期のミクロンの精度が要求されるときにはマスクの平坦度は簡単に対処でき問題とならなかった。しかしnmの精度が要求される100nm以下のリソグラフィでは、例えば、従来要求されなかったマスク周辺部(回路パターンが無く、真空チャックで保持する部分)の平坦度が問題となった。マスク周辺部を真空チャックで固定し保持するときに、僅かな平坦性の悪さが結像性能(フォーカスエラー)とアライメント(ディストーション)に影響を与えることが問題となった。光リソグラフィのマスクは非常に安定した構造、構成を持っているが、他のリソグラフィではマスクに弱点を持つものもあり、光リソグラフィの枠から出たときにはマスクに対して注意が必要となる。

6.2. レジスト

レジストは初期のノボラック系の樹脂を使ったg線領域から現在の波長まで、露光光に載せられたマスク情報の受け手として進歩してきた。レジストの進歩は露光装置や露光波長の進展と共にあり、前述したので、ここでは別の視点でレジストについて述べる。

レジストのウェハへの塗布には初期から現在までスピン塗布の手法が使用されている。初期のプロセスは、

HMDS^y 塗布→レジスト塗布→プリベーク→露光→現像→ハードベーク→(ウェットエッチング)
→レジスト剥離

の流れで、プロセスが一巡した。線幅が1 μ mを下回るようになると、PEB^zが導入され、現像後のレジスト像の側壁から定在波による凹凸が無くなり、 k_1 値0.8から0.7に引き下げるのに貢献している。現像後のハードベークはドライエッチングの導入と共に適用の有無は後のプロセスの要求に依存するようになる。従ってプロセスは

HMDS 塗布→レジスト塗布→プリベーク→露光→PEB→現像→(プロセス)

となる。PEBはi線以降ごく普通に用いられるようになっていく。この後、レジストプロセスは反射防止の向上に向かい、状況に応じてレジストは多層構造になってゆく。Si基板からの反射^{aa}を軽減するためのボトム反射防止膜の塗布、レジスト表面での反射を軽減するためのトップコート、更に液浸リソグラフィではレジスト表面の濡れ性を制御するためのトップコートが導入されることもあった。従って

HMDS 塗布→ボトムコート→レジスト塗布→トップコート→プリベーク→露光→PEB
→現像→(プロセス)

と複雑になり、更に反射防止を強化するために、ボトムコートを2層にすることなどが提案されたりしている。

1 μ m前後の線幅ではまったく問題が無かったが、微細化と共にレジストの厚さが徐々に問題になってきた。線幅とレジストの厚さの比をアスペクト・レシオと呼ぶが、レジストの膜厚が線幅の3倍(アスペクト比:AR>3)を超えると、ライン・アンド・スペース部分で現像やリンス時に表面張力によりレジストパターンが倒れる現象が生じる。このため、350nmのi線或いはKrFの導入時から、レジストの厚さは1 μ mから徐々に薄くなってゆき、リソグラフィの後のプロセスに影響を与え始めていた。また、レジストを薄くすると解像力が上げられた時代もあり、レジスト膜厚はエッチングとレジストプロセスのコストとのバランスを取って決められた。現在の32nm或いは22nmの線幅

^y HMDS: hexamethyldisilazane, (CH₃)₃Si-NH-Si(CH₃)₃, 表面改質剤でレジストのウェハへの密着性を向上する。

^z PEB: Post Exposure Bake

^{aa} プロセスが進むと場所・場所で下地の構造が異なり、異なった反射率を持つようになるため、均一な線幅が得られなくなる。

ではレジストの膜厚は 60-70nm と推定される。基板をエッチングするためのマスク材として、レジストの厚さは十分でなく、多層レジスト構造が使用される。

多層レジスト構造は実験的に微細構造を作る手法として 1980 年代には知られていたが、その当時量産への適用は、プロセスのコストが高く直ちに否定されていた。しかし現在では当たり前で使用されており、プロセスコストの増大は微細化の代償として容認されている。

光リソグラフィでは 1 度プロセスに導入された技術で、整理して使われなくなったものは無い。レジストの進歩は前述したように、材料の開発であり、新規材料の場合には時間が掛かっている。新しい波長用の材料が遅れると、旧来のレジストとそこで使われている波長を極限まで使うために、封印されていた技術がプロセスに導入され、解像力を搾り出し(より小さな k_1 値を達成し)、時間を稼いできたとも言える。

7. 光リソグラフィの選択

光リソグラフィはこれまで述べてきたように半導体産業の要求にこたえながら進歩してきた。半導体産業におけるリソグラフィの目的は回路パターンをウェハ上に形成する技術であり、今まではレジスト像としてパターンをウェハ上に形成してきた。光リソグラフィではその後の工程での処理に耐えられる形で次の 3 点を満たすこと求められている。

- 結像: 必要とされる微細な回路パターンを忠実にウェハ上に転写形成すること。
- アライメント: 必要とされる微細な回路パターンの 1/3 ~ 1/5 の精度で回路パターンを正確な位置に形成すること。
- スループット: 産業的に成り立つ処理速度を持つこと。

最先端の半導体製造用の露光装置に求められる一般的な性能は ITRS^{bb} のリソグラフィの章に数値が示されているのでここでは触れない。上述した 3 点を達成するため、光リソグラフィは歴史的にここまで述べてきた進化を必要としたが、同時に、技術の選択が行われ、捨てられた(使われなかった)技術も存在する。

微細化に対応するための光リソグラフィの結像系の進歩を 5 節に詳しく述べたが、解像力の向上に主に寄与したものは短波長化(λ)であり、高 NA 化であり、そして Low- k_1 である。その寄与は表 8 に示す割合と考えることができる。量産への導入を考えると一番楽なのは短波長化(λ)であり、高 NA 化が続く。Low- k_1 はデバイス毎に OPC を最適化しなければならず、導入後の負荷が大きくなる。

過去から現在までに光リソグラフィへの使用が検討された光の波長を表 9 に示した。この表には 19 個の波長が示されているが、KrAr(134nm)、Ar₂(126nm)、Ne₂(80nm)の 3 つの波長はレーザの発振が確認されておらず、理論的な可能性を示したものである。また、j-line と XeCl は波長が近く光源が違うだけと、同じ波長として検討されていた。従って、半導体産業が光リソグラフィを必要としてから現在までの 50 年間に検討されたのは 15 の波長であり、実際に使用されたのは、g-line、i-line、KrF、ArF、ArF 液浸^{cc} の僅か 5 波長である。一度選択され、量産で使われた波長はそれぞれ約 10 年の間使い続けられたのち、次の波長に移っている。

	1980	2012	微細化への寄与	コメント
λ (nm)	436	193 (134)	0.44 (0.31)	()内は液浸で $n \cdot NA$ (NA を大きくした)と考えるか、 λ/n (波長を短くした)と考えるか、選択する必要がある。
NA	0.3	0.93 (1.35)	0.32 (0.22)	
k_1	0.8	0.27 (0.18)	0.34 (0.23)	()内は Double Patterning の場合

$$\text{Resolution} = k_1 \cdot \lambda / n \cdot NA$$

表 8. 微細化への寄与

^{bb} ITRS: International Technology Roadmap for Semiconductors, <http://www.itrs.net/>

^{cc} ArF 液浸を ArF と異なる波長と分類することに異論があるかもしれないが、ここでは実効波長が異なるとして考える。

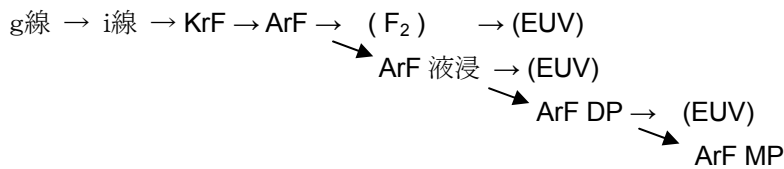
λ : 波長(nm)		Medium	光源	硝材	Lens Coating	Resist	Other Issue
436	g-line	Air n=1.0	Hg Lamp	Glass	Available	Novolac Resin	
405	h-line	Air n=1.0	Hg Lamp	Glass	Available	Novolac Resin	
365	i-line	Air n=1.0	Hg Lamp	Glass	Available	Novolac Resin	
313	<i>(j-line)</i>	<i>Air n=1.0</i>	<i>Hg Lamp</i>	<i>Glass or Quartz</i>	<i>Available</i>	<i>Novolac Resin</i>	
308	<i>XeCl</i>	<i>Air n=1.0</i>	<i>Laser</i>	<i>Glass or Quartz</i>	<i>Available</i>	<i>Novolac Resin</i>	
300~190		<i>Air n=1.0</i>	<i>重水素ランプ</i>	<i>Quartz</i>	<i>Available</i>		<i>Power</i>
248	KrF	Air n=1.0	Laser	Quartz	Available	Polyhydroxy-styrene + CA	
193	ArF	Air n=1.0	Laser	Quartz	Available	Alicyclic polymer	
182	<i>KrF Immersion</i>	<i>H₂O n=1.36</i>	<i>Laser</i>	<i>Quartz</i>	<i>Available</i>	<i>Polyhydroxy-styrene + CA</i>	
157	<i>F₂</i>	<i>N₂ n=1.0</i>	<i>Laser</i>	<i>CaF₂</i>	<i>Development Required</i>	<i>F contained Polymer</i>	<i>Pellicle</i>
147	<i>Kr₂</i>	<i>He n=1.0</i>	<i>Laser*</i>	<i>CaF₂ ?</i>	<i>?</i>	<i>?</i>	
134	<i>KrAr</i>	<i>He n=1.0</i>	<i>Laser / not oscillated</i>	<i>CaF₂ ?</i>	<i>?</i>	<i>?</i>	
134	ArF Immersion	H₂O n=1.44	Laser	Quartz / CaF₂	Available	Alicyclic polymer	Polarization Control
126	<i>Ar₂</i>	<i>He n=1.0</i>	<i>Laser / not oscillated</i>	<i>MgF₂ ?</i>	<i>?</i>	<i>?</i>	
117	<i>ArF High Index Immersion Gen.2</i>	<i>Organic Fluid n=1.65</i>	<i>Laser</i>	<i>Quartz / LuAG (n=2.14)</i>	<i>Available</i>	<i>Development Required</i>	<i>Flammable Liquid</i>
115	<i>F₂ Immersion</i>	<i>PFPE n=1.37</i>	<i>Laser</i>	<i>CaF₂</i>	<i>Development Required</i>	<i>Development Required</i>	
107	<i>ArF High Index Immersion Gen.3</i>	<i>Organic Fluid or Nano Particle Composite n > 1.80</i>	<i>Laser</i>	<i>Quartz / LuAG (n=2.14)</i>	<i>Available</i>	<i>Development Required</i>	<i>Liquid</i>
80	<i>Ne₂</i>	<i>Vacuum n=1.0</i>	<i>Laser / not oscillated</i>	<i>? or Mirror</i>	<i>?</i>	<i>?</i>	
13.5	EUV	Vacuum n=1.0	LPP or DPP	Mo/Si Multi-Layered Mirror	Under Development	Polyhydroxy-styrene + CA	No Pellicle and Many

注) 実際に使用された波長は太字、露光装置が作られたが採用されていない波長は普通の文字、検討のみ行われた波長はイタリックで記述

表 9. 光リソグラフィで検討された波長

現在、EUVが6つ目の波長に挑戦しているところであるが、光源がまだ実用に程遠い状況であり、実現できるかの判断にはまだ時間が掛かりそうである。

それぞれの波長が選択された状況は5節で詳しく述べたが、今までの流れは以下のようになる。ArFの後F₂が本命として期待されたが、F₂が材料開発で行き詰まった時にArF液浸が提案され、ArF液浸が量産用技術として選択されている。



業界は継続性や拡張性を考慮しながら、短波長化を推進してきた。ArFの後F₂を望んだが材料の開発が間に合わず採用を断念した。しかし、EUVの開発は断念しなかった。EUV光源の開発の遅れもありArF Double Patterningの現実的だが生産性が低くコストの高いリソグラフィを、微細化推進を優先し他に手段がないことを理由に採用している。更に時間が進み、現在も同じ理由で更に生産性の低い多重露光(Multiple Patterning)が採用されている。EUVの開発は継続している。

上記の波長の変遷に採用されなかった波長が何故出てきたのであろうか。g線→i線が変わるとき、h線(405nm)とKrFが検討され、採用されなかったのは前述したとおりである。i線は大本命であったが、レジストの開発が遅れたことにより、h線とKrFの検討が始まったのも前述した通りである。

新しい技術の開発を提案するのは常に開発部門である。著者が装置メーカーに所属し、露光装置の開発に関与していた1974年から2009年の間、顧客からの要望として言われたのは、「手札を揃える」すなわち複数のリソグラフィ技術を準備することであった。言い換えると、デバイスメーカーの開発部門のリソグラフィ担当者は複数の技術を準備し、装置選定のときに、製造部門の人が選択できるような、複数の技術を提示出来る様にしておくのが彼らの仕事である。選択肢が無いのは、開発が上手く行かず準備できなかったことになるので許されない。従って、本命の開発が完璧でない時には代替手段を作る必要も出てくる。従って、h線の検討もKrFの検討も手札を増やす意味と、代替手段の準備の両方の意味があったと考えられる。i線→KrFの時も同様である。KrFの光源の開発が遅れるとj線を提案し、KrFレジストの開発が遅れるとノボラック樹脂系のレジストが使用可能な波長のXeCl或いはj線を開発を提案している。一方で2次光源面の最適化によるRET或いは位相シフトマスクなどを推進し、KrFリソグラフィの完成までの時間を稼いでいる。同様のことがKrF→ArFでも行われたが、ArF→F₂では別の提案の方がコンセプトに優れていたため、ArF→ArF液浸が採用されている。

図15(ITRSの各Edition)からArF後の光リソグラフィを時代毎にどのように見ていたかを検証してみると以下のようなになる。

	ArF			
1992	180nm迄	→	EUV	
1997	100nm迄	→	EUV	
1999	100nm迄	→	F ₂ 70nm迄	→ EUV
2003	65nm迄	→	F ₂ or ArF液浸 45nm迄	→ EUV
2007	65nm迄	→	ArF液浸 45nm迄	→ ArF DP 32nm迄 → EUV
2013	65nm迄	→	ArF液浸 45nm迄	→ ArF DP 22nm迄 → EUV

EUVの概念は非常に優れているが、現実には光源の開発等が常に問題となり、先送りされている。

リソグラフィのもう一つの重要な要素の重ね合わせ精度は第 4.6 節の図 12 に示されるように、装置のコンセプトで決まってしまう。ウェハがプロセスの熱処理や膜の応力により歪むのは避けられず、この歪みに追従するためには分割するしかなく、小さく分割できる方が補正を細かく出来ることになる。そして最後の重要な要素である生産性の向上では、同じ図 12 から、分割してなおかつ 1 回の露光で露光する面積を大きくし、1 枚のウェハを露光する回数を小さくすることが行われている。

全ての技術について言えることだが、何を目的に開発するか、そしてそれを達成するために必要な方式の検討と選択は常になされている。半導体素子製造を前提とするリソグラフィの目的は上述した 3 項目のように明確である。しかし、そこで具体的に要求される数値は時代と共に厳しくなり、またリソグラフィを支える周辺技術も同じように進歩することが必要となる。さらに、周辺技術を含めての新規技術の導入は労力が大きいいため、複数の世代をカバーできるポテンシャルが求められる。

第 2 節、3 節で述べたが、現在までの半導体産業の発展を支えるものの一つがリソグラフィであり、トランジスタを小さくし、単位面積により多くのトランジスタを搭載することを可能にしてきた。この微細化が業界発展(活力)の源泉だったので、微細化の手段を途絶えさせるような方式の選択での失敗のリスクは犯せないし、許されなかった。従来リソグラフィ技術が技術的或いはコスト的に限界に近づくと、開発されたリソグラフィ技術候補の中で最も優れたものは何か、そして現実的に使用できるものは何か、インフラの整備状況も加味し、従来のリソグラフィ技術も含めて検討され、生産に使用するリソグラフィ技術が選択されてきた。複数の候補の中から新技術と従来技術を天秤に掛け、同じなら安全な従来技術を採用する常に安全サイドの判断がなされる。選択する側は、気に入るものが無ければ、現在の技術を使い続けることが出来るし、選択の基準を代える(ルールを代える)ことも出来る。現実には、3 回のルールの変更が行われている。それらは：

- ① CMP の導入で、DOF の要求を変えた。
- ② 液浸の導入で、NA<1.0 の限界を取り払った。
- ③ Double Patterning の導入を許容し、 $k_1 > 0.25$ の限界を取り払った。

選択する側が恐れるのは業界の多数が選択する技術を、皆と同じものを、選択できず孤立することである。孤立した技術は業界からサポートが得られず、何をしても高価で、更に単独で改善する必要があり、技術の発展が望めないからである。近年はリソグラフィ技術の開発費が高騰し、方式の選定はほとんど公開されている。背景として、プロセスや装置で差別化する発想が無くなり、差別化は設計あるいは何を作るかのマーケティングに依存するようになったことが上げられる。

これに対し、複数の候補を揃え準備する開発側は、手札を増やすために選択肢を増やすために、更に多くの選択肢を求めることになる。次の世代の準備に失敗が許されず、プレッシャーが当然のように掛かるため、少し開発が停滞するとセーフティサイドの提案が保険として必要となり、その検討が始まり、選択肢に加えられる。更に、候補を作るときにはどんなに技術的に難しくても理論的に最良なもの、コンセプトとコストに優れ、一番楽に量産現場で使用可能なもの、例えば EUV の開発を要求する。リソグラフィの開発側は、現状技術の限界を述べ危機をあおり、提案は否定しないで育てる。大学からの提案であれば研究テーマとして研究資金が得られるように援助し、研究者の雇用対策として研究テーマを与えるなど、本命以外の技術も育てる努力を続け、業界を支える研究開発体制を大きくし活性化し人材を確保する努力を行ってきたと考えられる。候補を用意する組織(人)と、使用するものを選択する組織(人)が異なり、また判断する時代(種を蒔いた時と刈り取る時)が異なることから予測と現実の間で異なる結果が出てくるのは当然であるが業界全体としては、業界を活性化するものとして許容してきている。波長の変わり目や、 F_2 を断念した時等には裾野の広さが有用であった。

8. 考察

微細化を追求した光リソグラフィの発展を開発の立場から振り返り、まとめると二つの流れにまとめることができる。一つは光リソグラフィのコンセプトの開発であり、システムの開発である。4 節で詳しく述べ、図 12 に光露光機のコンセプトの発展を示したが、繰り返すとシステムの変化は以下のようになる。

Contact/Proximity → 1:1 Projection → Stepper → Scan

(光)リソグラフィの基本性能となる生産性と重ね合わせは、ほぼこの露光機の概念変遷で決まってしまう。(もちろん結像光学系のディストーション(歪み)も影響するが、大勢はここで決まる。)

スキャンから更に精度を上げる検討はもちろん行われているが、プロセスが生み出す歪みの補正を今以上に細かく行うためには、更に分割を進める必要があり、そのためにはビーム状の露光エリアをコントロールする必要がある。同時に生産性を向上するためには多数のビームを同時にコントロールする必要がある。概念的には電子線露光で提案されているマルチビームの考え方が近いが、量産に展開できるコンセプトはまだ提案されていない。

微細化を追求するために結像系は、波長(λ)、開口数(NA)そしてプロセスファクター(k_1)のそれぞれが解像力を向上する方向に進化し、業界の要求に応じてきた。開口数(NA)は図 18 に示したように、1980 年代前半の NA=0.3 から 2005 年に NA>0.9 が達成されるまで設計技術の進歩と製造技術の進歩とともに順調に“大 NA”を達成している。1990 年代に DOF 確保の制約から NA=0.6 を超えることが難しい時期があったが、CMP の導入とともに DOF 確保の制約が無くなり、NA>0.90 が達成されているのは前述したとおりである。更に液浸が採用されたことで NA<1.0 の制約が無くなり、現在、液浸では NA=1.35(=n・NA=1.44x0.94) が達成されている。

プロセスファクター(k_1)も 1990 年初頭まで、OPC を前提とするリソグラフィが嫌われていたため、 $k_1=0.8$ が前提であったが、計算機の計算能力の進化とともに図 20 に示したように 1990 年の初頭から 2010 年にかけて徐々に小さな k_1 が達成されている。特に 2000 年前後に縮小投影レンズの収差が大きく改善され、レンズ性能が格段に向上したこともあり、2010 年には $k_1=0.27$ が 1 回の露光で可能となっている。また 2010 年前後には Double Patterning の導入により $k_1<0.25$ の例えば $k_1<0.18$ も実際の製造ラインで達成されている。

結像系の波長(λ)は 7~10 年で新しい波長が導入され、図 14 に示したように、1980 年代初頭の g 線から、g 線(436nm)→i 線(365nm)→KrF(248nm)→ArF(193nm)と移って行った。ArF→F₂(157nm)だけはレンズ材料である蛍石の収差向上が間に合わず、またペリクル材料に良いものが見つからず、よりポテンシャルの高い ArF→ArF 液浸(134nm)が採用されている。そして現在、EUV(13.5nm)の開発が進められているが、光源の開発に苦しんでいるのは周知の事実であり、今後採用されるかどうかはまだ結論は出ていない。

上記のように、光リソグラフィの微細化を達成するための結像技術と結像系の進歩をまとめると、光リソグラフィの波長の選択と変遷は極めて順調で、表 9 に示した 19 波長の中から選ばれた 5 波長が開発が試みられた。F₂だけが材料開発がうまくゆかず、別の選択肢が選ばれたように見え、開発が実に単純な一本道であったように見える。しかし、著者は g 線から ArF の Double Patterning まで開発者として開発の近くに居たが、濃い霧の中を手さぐりで歩いているようで、開発者であっても先のことに確信を持つのは難しかった。Sturtevant's law¹¹⁾の「光リソグラフィの終焉はいつも 7 年後に来る」という指摘が実によく理解できる。

表 9 を見ると、大きなジャンプが可能だった様に思えるが、選択した時点では小さなステップでしか選択肢はなかったし、試みても結果は失敗したであろうと確信をもって言える。例えば、i 線が開発が遅れ、KrF が提案された時があるが、i 線レジストの開発に四苦八苦している時に、それよりも短波長の KrF レジスト材料の開発を行っても良い結果が得られるとは考え難い。i 線、KrF、ArF、F₂、EUV のいずれの波長でも材料開発で苦勞し、それ以前の波長の開発での苦勞を足掛かりに、次の開発につなげている。光リソグラフィの開発において、波長をジャンプしていたら、開発時期はもっと遅れるか、光リソグラフィは他のリソグラフィに置き換わっていたと考える。

開発中のリソグラフィの完成度、後どのくらいで実際の量産に採用されるかの可能性を判断するためには、少なくとも以下の情報と実力を知ることが必要となる。

- ① レンズ収差設計の完成度を始めとしたレンズ用硝材の均質性・透過率等の性能と量産性等のレンズに関する情報
- ② 光源の寿命や安定性や波長の半値幅と波長の安定性等の光源に関する情報
- ③ レジストの感度、安定性、現像後のプロファイル、保存寿命や測長に対する安定性等々のレジストに関する情報
- ④ マスクの歩留まりや精度、描画時間、コスト等のマスクの供給と精度に関する情報
- ⑤ ユーザが新規の技術をどのように評価しコストをどのように評価しているか
- ⑥ ユーザが現在の使用しているリソグラフィを変更する必要性を感じているか

また、開発を始めるには、現在の技術の限界がどのくらいにあるか、いつまでに新しい技術をどのような仕様を達成して提供するかを見極める必要があり、更に、要求された目標が適正なのか、過大な要求が含まれていないかを判断する必要がある。

2000 年以前はこれらの情報を自分で(関係各社から)集めて判断していた。このころ情報は自分で探し取ってくるものであり、情報収集はあらゆる機会に行われた。しかし同時に情報収集で話す相手の情報に対するオフセットが常に問題となった。①～⑥の情報をすべて持っているのがデバイスメーカーであったが、同様にバイアスは常に悩みの種であった。更に、情報源となる人々が全体の中での立ち位置をどのように認識しているかで、情報の提供の仕方が変わり、情報の価値が揺らぐことが多くなる。2000 年頃、ArF の開発が盛んに行われるようになった頃から、SEMATECH や ITRS の主導で情報の共有化が行われるようになった。これ以降、少なくとも情報と数値の入手は容易になったが、数値の解釈とユーザの思惑をどのように判断するかが、問題になった。特に、「項目 A では数値は X を達成、項目 B でも数値 Y を達成した。項目 A も B も目標値をクリアした。」と言うような時に、項目 A、B が同一条件で達成されなければ意味がないのに、実際はそれぞれ別の最適条件での達成にすぎない等の、惑わせるような発表に悩まされることも生じている。個人的な人脈を駆使して、発表された技術や数値の裏側の思惑を議論し読むことの必要性は以前と何も変わっていない。

それでも、SEMATECH 主導の情報を共有することの最大のメリットは、リソグラフィに興味を持つ人が容易に議論に参加できる環境を作ったことである。多くの人が新たに議論に加わり、大学関係者が多かったと個人的には思っているが、有識者が議論や実験に加わることにより開発の進行が加速されている。同時に技術開発を同期させることの重要性が改めて共有され認識されている。光リソグラフィでの同期は露光装置[システム(アライメント性能、生産性等)、レンズ(解像力、distortion 等)、照明系(光源、安定性等)]、マスク、レジスト、レジストプロセス、EDA 等々のすべてが揃って機能して初めて量産への適用が考えられる。

リソグラフィの目的を 7 節の始めに示したが、技術の進展の早い半導体産業では時間の経過と共に目標値が変わる。この変化の速さを示したのが Moore's の法則である。ITRS では Moore's の法則を実行可能にすることを目標に個別の要素技術に分解してターゲットが示されている。ITRS のリソグラフィでは 3 年ごとに線幅を 70% にする解像力と解像力に値するアライメント(重ね合わせ)精度を提供できる露光装置とレジスト或いはこれに代わり得る技術が必要なことが示されている。しかも要求は半導体産業の総意である。

この時間的に継続し、目標値が年々難しくなる開発を可能にするためには、リソグラフィに興味を持つ有能な人をできるだけ多く集めることが必要である。失敗が許されない、何らかの答えを常に用意する必要があるので、複数の開発を同時に走らせ、最悪でも一番良さそうな物を選択するためにも、多くの人が必要となる。毎年 2 月末に米国西海岸で開催される SPIE Advanced Lithography には世界中から 2000 名を超えるリソグラフィ関係

者が集まる。また、世界中で開催されるリソグラフィ関係の学会等が 2 か月に 1 回程度開催されており、世界中には多くのリソグラフィに関係する技術者がいることが分かる。リソグラフィで過去に選択され、実用に移された波長は僅かに 5 波長であるが、それに対して開発にかかわった人は多かったのであろうか、或いは開発の効率化は可能だったのだろうか。

開発日程を守り、目標を達成するためには複数の開発とそれを支える研究者の確保が必要なことは上述した。特に社会的に注目されている産業分野であれば、まったく同じではなく、競合するが目標が同じ研究テーマを設定し、白熱した議論があれば人を集めることは可能である。技術が競合していなければ、人は集めにくい。

更に、複数の異なる技術で開発を行わないと、リスク分散ができず、開発日程を守りながら目標を達成することは出来ない。リスク分散と無駄の境目は何処にあるのだろうか。リスク分散の開発を行い、技術を競合させ、最後に選択を行う。選択は結果であるが、選択できるだけの数をそろえることが必要となる。”英知を集める”と言うが、使える技術を集めるのは普段の開発であり、英知を集めるのは多くの使われない或いは”使えない”と思っている技術を検討すること”で、使えないと思える技術を容認することである。容認した後で、何処まで検討し、何処まで開発を進めるかの判断は別の問題である。

現在は使えないと言われる技術がいろいろある。材料が高すぎて使えないが、将来材料が安くなれば技術的ポテンシャルが高そうなので使えるかも知れない。ユニークで高いポテンシャルを持つが、単独では使えないし、組み合わせる相手の技術が今は無い。アイデアは良いが、該当する材料が無い。そんなに高い精度は現在必要とされていないし、複雑すぎる。等々の技術を、使える状態を維持しながら、必要とされる時期を待つのも研究開発であり、ある意味で技術の懐の深さになる。また、締め切りに間に合わないが、来年ならかなりの確率で実用化可能で、インパクトは大きい技術が出てきたとき、現在の技術を少し延命するような”ため”が、開発の品質を上げる。

このようにして開発の規模と範囲はどんどん大きくなるが、研究効率は悪化する。半導体産業が伸びていて、微細化が業界の成長を引っ張っている時には、当然問題とならないが、現在のように微細化の限界論が出てくると、一番開発が大変なときに、研究効率の追求が始まることになる。”無い袖は振れない”のだが。技術が生き残るためには、選択の対象になる必要がある。或いは次世代でのポテンシャルを持っていることが必要となる。さもなければ、孤立した技術として生き残ることが出来なくなる。しかし業界、或いは研究の世界では、技術が消滅することを嫌う。いつか使い道が出てくるとして、伝承することを考える。また必要だが市場が小さく生き残れない技術に対して、他の分野での選択肢の地位を与えて技術を生かすことも行なわれている。

近年、研究開発の効率化を達成するため、情報の共有が効率の追求の手段として用いられている。数値情報の提供が進んだが、開発時の技術のジャンプとか新しい可能性が生じた時の感覚的な要素が入れられず、機械的な判断に陥ることがあると思われる。また、情報の共有化で技術の淘汰、効率化、が進み選択肢の数を維持できないことが懸念される。しかし、開発を中断或いは中止した技術は意外に少ない。光リソグラフィでは、そもそも検討段階から現実の開発に入ったものが少なかったと言える。むしろ、情報の共有が効率の追求の手段とならず、情報のコントロールを招く危険性のあることを指摘したい。

現在、インテル・サムスン・TSMC の 3 社で全投資額の 50%以上を占有し、更にグローバルファウンドリー・ハイニックスの 2 社を加えた上位 5 社では全投資額の 70%前後を占有している。このような状況にあっても、リソグラフィで競合との差別化を試みる動きが見えない。各社、EUV の開発を支援し、EUV 技術の早期立ち上げを望んでいる。しかし、EUV の開発は Albany や IMEC 等のコンソーシアムで進められており、このリソグラフィ技術で差別化を試みる動きは見えない。コンソーシアムで巨額の開発費を使っているが、関係者の本音を聞くと、世界中の英知を集めての結果が出るのが重要で、その結果が成功でも失敗でも成果として評価されると言う。成功なら、半導体産業は大きな武器を手に入れるし、世界中の英知を集めての失敗なら EUV というオプションを消

去することが出来る。もし、オプションを消去出来れば、それはものすごく大きな成果だと位置づけるとのこと。リソグラフィは既に巨額の投資を必要とする、単独で開発できない技術に位置付けられている。

液浸を導入する時に、微細化スケジュールを守る必要があり、半導体各社が情報を共有する機会を得て以来、リソグラフィ技術は業界の中で、非競合の技術となり、規格化が進んでいるように思える。

9. まとめ

微細化の視点から、2 節では半導体素子の進歩を簡単に示し、微細化が成しえたことを示し、3 節でトランジスタの微細化について簡単に述べた。光リソグラフィの初期の開発は歩留まり向上に必要なリソグラフィ欠陥の低減に焦点が当てられ、マスクとウェハの接触を如何になくすかが(4.1、4.2、4.3 節)技術開発の目指すものであった。これが達成されると、次にトランジスタの品質(歩留まり)を安定するために必要な重ね合わせ精度と生産性(4.3、4.4 節)が、二者択一の技術選択の課題となった。この後、光リソグラフィは半導体産業の要求を実現するために微細化を現在も追い続けている。

光リソグラフィの微細化の追求は5 節に或いは5 節の式(1)に示すように、レンズの開口率 NA を大きくする、波長 λ を短くする、そしてプロセスファクタ k_1 を小さくすることで行われてきた。最初は装置メーカー(ベンダー)が頑張り、 NA を大きくする方向で開発が進められた。この時の制約条件は焦点深度であり、半導体素子製造時に生じるウェハ表面の凹凸の最上部と最低部を同時に露光シパターニングすることが要求されていた。レンズの残存収差などもあり、 $2\mu\text{m}$ の段差を前提に技術が議論され要求されていた。従って、 $NA>0.6$ のレンズを開発しても焦点深度の確保が出来ず、ニーズを満足できないので技術は波長 λ を短くすることを追求し始める。波長を短くする方向は装置、レジストなどの材料(ベンダー)に大きな開発のための負担を与えたが、使用する側(ユーザ)の負担は装置の更新だけであり、望ましい方向と言えた。

短波長化の開発に伴う新規材料の開発はスケジュール通りに進まなかったが、プロセス中のウェハの表面を研磨し平坦化することが CMP 技術により可能になり、再度大 NA 化の方向が開けた。CMP 技術と露光装置がステップからスキャンに進化したことにより、 $2\mu\text{m}$ の段差が前提であった焦点深度の議論が現在では、露光装置の精度の進歩がもちろんあるが、 $0.1\mu\text{m}$ 以下のレベルでなされている。

更なる微細化が要求されると、プロセスファクタ k_1 を小さくする技術が使用する側(ユーザ)の負担で導入されるようになった。導入初期には単純なものが、微細化の進展に遅れそうになると共に負荷の大きいものも構わず導入するようになった。背景には半導体素子の進歩に伴う科学計算能力の進化があり、それ以上に半導体の市場が大きく育ち、技術進歩がもたらす果実が大きな投資を許容したことによる。

更に微細化が要求されると、短波長化のための材料開発が間に合わず、使用する側(ユーザ)は $NA>1.0$ を可能とする液浸の導入に踏み切る。ここで業界は、 NA は 1.0 を超えないという思い込み(制約)をあっさり振り切っている。実使用までの導入期間の短さを、液浸技術を非競合技術として、或いは“規格”化された技術のように扱うことで切り抜けている。IMEC, SEAMTECH, ITRS そして Albany などで養われたオープンイノベーション的な情報の開示により研究者を呼び込み駆り立てる手法が、液浸の導入時に花開いている。

さらに微細化が進むと、 NA も波長 λ も k_1 も飽和する。 NA と波長 λ は材料の制約があるため、 $k_1<0.25$ を達成するために、生産性を犠牲にした Double Patterning が導入されている。他に現実的な方法が存在しないことに原因はあるが、使用する側(ユーザ)も生産性の低下と巨額の投資に耐えられる数社に減っているのも興味深い。技術の制約が時代と共に変わり、それを見落とすと没落して行くのがみられた。

半導体産業を本稿で分析している分ではないが、半導体産業が巨大化するにつれ、また技術が難しくなるにつれ、囲い込むべき技術と買えば良い技術、そして差別化できればインパクトが大きいリスクが大きすぎて“標準化”された時期、世界の英知を集めるために技術の目標と達成度合いを公表する仕組みなどが2 節から6 節の技術の記述の中で読み取れると思う。

半導体産業の技術開発に必要なことは業界としての研究開発体制の大きさの確保と維持と、業界の今後の発展と市場規模を見通すことである。新規工場への投資や微細化の進展で技術開発に大きな投資が続けられて来た。しかし近年の寡占化の進行や微細化の限界が目に入る中で、研究開発に求められるものの変化を考慮する必要があり、市場規模とバランスする大きさの研究体制の考え方を見直す必要がある。研究開発の課題はますます高度になるが、研究開発の効率化と異なる視点と技術の導入が必要となる。更に、新しい概念が導入されないと技術が行き止まり、半導体産業での技術の進歩が無くなることも想定する必要がある。また、半導体素子自体の発展が行き止まりになると、まったく新しい方向に進み始め、リソグラフィにも新しい概念が要求される可能性が高い。

鶏と卵になるが、技術の行き止まりの回避には現実的な解決策を確保しながら複数の新しい方向を求める研究開発拡大の方向が必要であり、市場と技術の行き止まりから要求される開発の効率化との二つの力が働くようになる。光リソグラフィの今後には、半導体素子の開発動向に依存するが、光を含め、Charged Particle、EUV、DSA、Imprint、Dip Pen、近接場、カンチレバー等のまだ検討に値するリソグラフィ技術が控えている。

過去 50 年間、微細化を象徴として非常に分かりやすい指標で技術開発の発展の継続をアピールし、半導体産業は”ハイテク”の地位を確保し、株価の維持に成功してきた。次のリソグラフィの選択が必要になった時に、従来の考え方で開発を行い微細化が継続できれば”ハイテク”の地位を維持できるが、微細化を継続する手段と意味が無ければ”ハイテク”の地位を確保するための新しいシナリオが必要となる。

以上

¹ Moore, Gordon E., "Cramming more components onto integrated circuits", Electronics Magazine 1965, p.4

² Moore, Gordon E., "Progress in digital integrated circuits", International Electron Devices Meeting 1975, p.11

³ Robert Dennard, Fritz Gaensslen, Hwa-Nien Yu, V. Leo Rideout, Ernest Bassous and Andre LeBlanc, "Design of ion-implanted MOSFETs with very small physical dimensions," IEEE Journal of Solid State Circuits, vol. SC-9, no. 5, pp. 256-268, Oct. 1974

⁴ QST Magazine, 1953, March, p.97

⁵ Fabian Pease and Stephen Y. Chou, "Lithography and Other Patterning Techniques for Future Electronics", Proceedings of The IEEE, vol. 96, No.2, pp.248-270, Feb., 2008

⁶ B.J.Lin: "Deep UV Lithography", J.Vac.Sci.Technol., Vol.12(6), 1317-1320(1975). B.J.Lin: "Deep UV Comformable-Contact Photo Lithography for bubble Circuits", IBM J. Res. Develop., pp.213-221(1976)

⁷ 中根靖章、三船忠良: "Deep Ultra Violet Photolithography の検討"、第 11 回半導体集積回路シンポジウム論文集、pp.54-59(1976)

⁸ Y.Nakane, T.Tsumori, T.Mifune: "Deep UV Photolithography", Kodak Microelectronics Seminar Proceedings, pp.54-61 (1978)

⁹ 加納一朗、伴箕吉、鈴木章義、小保貴、百瀬克巳: "遠紫外線投影光学系の開発"、第 17 回半導体集積回路シンポジウム講演論文集、pp.67-71(1979)

¹⁰ "IBM names three fellows for technical contributions", Computerworld, May 25, 1981, p.70

¹¹ Chris A. Mack, "The Future of Semiconductor Lithography: After Optical, What Next?", Future Fab International, Vol. 23,. Online version of paper: http://www.future-fab.com/documents.asp?d_ID=4397#

¹² 龜山雅臣、"リソグラフィと ITRS"、http://www.iir.hit-u.ac.jp/iir-w3/research/sqk_wp.html

¹³ Victor Pol, J.H.Bennewitz, G.C.Escher, M.Feldman, V.A.Firtion, T.E.Jewell, B.E.Wilcomb, and J.T.Clemens, "Excimer laser-based lithography: a deep ultraviolet wafer stepper," Proc. SPIE 633, 6-16 (1986)

-
- ¹⁴ Masaomi Kameyama and Martin McCallum, "Extension of photolithography," Proceedings of SPIE Vol.5446 pp. 451-461 (2004)
- ¹⁵ 村原、河村、豊田、難波: "KrF エキシマレーザーによる PMMA ホログラフィック・グレーディングの作製" 応用物理、Vol.52, 83 (1983)
- ¹⁶ H.Ito, C.G.Willson and J.M.J.Frechet, "New UV Resist with Negative or Positive Tone," Digest of Technical Papers of 1982 Symposium on VLSI Technology, pp.86-87.
- Hiroshi Ito, "Chemical amplification resists: History and development within IBM", IBM Journal of Research and Development, Vol.41(1,2)119-130(1997)
- ¹⁷ H.Nakagawa, M.Sasago, Y.Tani, M.Endo, K.Koga, Y.Hirai and N.Nomura, "ArF excimer laser projection lithography", IEEE 1989 VLSI Technology Symposium, Technology Papers, p.9 (1989)
- ¹⁸ Richard Sandstrom, "ARGON FLUORIDE EXCIMER LASER SOURCE FOR SUB-0.25 mm OPTICAL LITHOGRAPHY", SPIE Vol.1463, (1991), PP.610-616
- ¹⁹ Y. Kaimoto, K. Nozaki, S. Takechi, and N. Abe, "Alicyclic polymer for ArF and KrF excimer resist based on chemical amplification", Proc. SPIE, Vol.1672,(1992), pp.66-73
- ²⁰ Shigeyasu Mori, Taku Morisawa, Nobuyuki Matsuzawa, Yuko Kaimoto, Masayuki Endo, Takahiro Matsuo, Makoto Takahashi, Takuya Naito, Yoshiaki Naruse, Shinji Kishimura, Satoshi Takechi, Atsuko Yamaguchi, Masaya Uematsu, Toshio Onodera, Keisuke Nakazawa, Kazuya Kamon, Tetsuya Tatsumi, Satoshi Morishita, Koichi Kuhara, Takeshi Ohfujii, Tohru Ogawa, Hiroshi Ohtsuka, Masami Inoue, Masaru Sasago: "Multi-Generation Device Fabrication by ArF Lithography" Tech. Dig. IEEE Int. Electron Device Meeting, Washington, DC (1997), pp.933-935
- ²¹ 木下博雄, 金子隆司, 武井弘次, 竹内信行, 石原直: 第 47 回応用物理学会学術講演会予稿集(1986) 322.
- ²² H. Kinoshita, K. Kurihara, Y. Ishii and Y. Torii, "Soft x-ray reduction lithography using multilayer mirrors," J. Vac. Sci. Technol. B7(6) (1989) 1648
- ²³ W. Sasaki, T. Shirai, S. Kubodera, J. Kawanaka, T. Igarashi, "Observation of vacuum-ultraviolet Kr²⁺ laser oscillation pumped by a compact discharge device", Optics Letters 26(8), pp.503-505, (2001)
- ²⁴ J.H.Burnett, "Stress-Induced and Intrinsic Birefringence in 157nm Materials", 2nd International Symposium on 157nm Lithography, Dana Point, CA
- ²⁵ B.J.Lin, Proc SPIE 4688, 11(2002)
- ²⁶ S.Owa and H.Nagasaka, "Immersion lithography; its potential performance and issues", Proc SPIE 5040, 724 (2003)