SEMICONDUCTOR FRONT-END · PART 3-6

フォトリソグラフィ（液浸・マルチパターニング）— 水を足し、回数を重ねて、限界を越える

前回、空気中のレンズの開口数（NA）には0.93ほどの実用上の限界があり、ArF（193 nm）で描ける線は50 nmほどが限界だと見ました。業界はこの壁を、2つの方法で越えました。1つは、レンズとウェハの間に**水**を入れてNAを1.35まで引き上げる**液浸露光**。もう1つは、1回では描けない細かい模様を、何回かに分けて描いたり、膜の厚さで線を作ったりする**マルチパターニング**です。なぜ水を入れると細い線が描けるのか。高速で動くステージの上で、水をどう扱ったのか。4本の線を1本の型から作るしくみとは。そして、液浸露光装置が、なぜ国と国の輸出規制の対象になったのかまで見ていきます。

半導体前工程シリーズ 第3部 3-6／難易度 ★★★（3-5を読んでいると理解しやすくなります）／最終更新 2026年11月7日

この記事の構成

1. この回を3行でつかむ
2. 技術編① — 空気の壁：NAは1を超えられない
3. 技術編② — 液浸露光：水を入れると、なぜ細く描けるのか
4. 技術編③ — 液浸の歴史：アイデアは古く、実用は2000年代
5. 技術編④ — 水がもたらした新しい問題
6. 技術編⑤ — マルチパターニング：1回で描けないなら、分けて描く
7. 技術編⑥ — どこで使われてきたか、そして代償
8. 産業編① — 液浸露光装置：ASMLと、ニコン
9. 産業編② — 液浸露光装置と輸出規制
10. これから求められること
11. まとめと次回予告
12. 確認クイズ
13. 用語集
14. 参考資料（一次情報）
15. 主張と出典の対応表（監査）

本記事の表記ルール

事実 ＝公的機関・学術資料・企業の公式発表に記載のある内容（出典番号つき）
本稿の計算 ＝明示した前提から本記事が計算した値
推測 ＝出典から読み取れる範囲を超えた、本記事の見立て
未確定／将来 ＝計画・ロードマップであり、実績が確認できていない事項
物理の一般原理（教科書で確立している内容）の説明は、とくにタグを付けずに書いています。

この回の学習目標

- 水を入れるとNAが1を超え、細い線が描けるしくみを、屈折と開口数で説明できる
- 液浸露光で生じた問題（気泡・水の跡・レジストの溶け出し・温度）と、その対策を挙げられる
- ピッチ分割（LELE）と、スペーサーによる自己整合パターニング（SADP・SAQP）の違いを説明できる
- 液浸露光装置の会社と、液浸露光装置にかかる輸出規制の概要を説明できる

1. この回を3行でつかむ

- **液浸露光**は、レンズとウェハの間を**水**で満たして露光する方法です。水の屈折率は193 nmで1.44なので、NAが1を超えて**1.35**まで上がり、1回の露光でハーフピッチ約40 nmまで描けるようになりました。気泡や水の跡、レジストの溶け出しといった新しい問題は、装置と材料の両面の工夫で乗り越えられました。
- それでも足りない細かさは、**マルチパターニング**で作ります。模様を2枚のマスクに分けて描く**ピッチ分割（LELE）**と、型の側面に付けた膜（スペーサー）で線を2倍・4倍に増やす**SADP・SAQP**があります。Intelは10 nm世代で「世界初」のSAQPを使いました。その代わり、工程とマスクが増えます。LELEでは複数の露光の重ね合わせ、SADP・SAQPでは膜厚・エッチングとカット工程の位置精度が重要です。
- 液浸露光装置は、ASMLが2025年に**131台**を売りました。ニコンも液浸装置を作っています。最先端の液浸露光装置は、2023年から**オランダ政府の輸出許可**が必要になり、米国・日本も規制を設けています。

2. 技術編① — 空気の壁：NAは1を超えられない

3-5で見たとおり、描ける線の細さはレイリーの式 $R = k_1 \lambda / NA$ で決まり、$NA = n \sin \alpha$ です。レンズとウェハの間が空気（$n = 1$）なら、$\sin \alpha$は1より大きくなれないので、NAも1を超えられません。パデュー大学の講義資料は、実用上の限界を約0.93としています [2] 事実 。

2000年代の初めには、波長をさらに短い157 nmにする開発が進められていました。ASMLは、当時、リソグラフィのロードマップは**行き詰まったように見えた**と振り返り、2001年12月に157 nmの露光についての学会に出た同社の研究者が、別の道として液浸に注目したと書いています [6] 事実 。波長を短くするのではなく、**レンズとウェハの間の物質を変える** — これが液浸露光の発想です 解説 。

3. 技術編② — 液浸露光：水を入れると、なぜ細く描けるのか

● 水の中では、光の波長が短くなる

光が水に入ると、進む速さが遅くなり、**波長が短く**なります。パデュー大学の講義資料は、193 nmでの水の屈折率を**1.44**とし、水の中では波長が実質的に**193 nmから134 nmに**短くなると書いています [2] 事実 。

TSMCのバーン・リンは、光の**周波数は変わらない**ので、マスク、レンズ、レジストの材料は、同じ周波数の光で照らされると書いています [1] 事実 。光子のエネルギー（E ＝ hν）も変わりません。同じ193 nm用の感光材料を出発点にできる理由はここにあります。ただし、水との接触で成分が溶け出すなどの問題があるため、液浸では表面や処方の工夫が必要です（第5節） 解説 。



水を入れたグラスに鉛筆を差すと、水面を境に光が屈折して、鉛筆が折れ曲がって見えます（Commonsの説明による）。液浸露光では、この屈折の性質を使います。
画像：Meganbeckett27 / Wikimedia Commons / CC BY-SA 3.0（掲載用に縮小・WebP化）

● 空気では跳ね返っていた光を、拾える

もう一つの見方は、**全反射**です。MITリンカーン研究所の論文は、レンズとレジストの間に液体を入れると、空気との境目で全反射して戻ってしまっていた光を、レジストまで届けられるようになると説明しています [8] 事実 。細かい模様から大きな角度で回折した光は、空気中ではレンズの出口で全反射してしまい、像を作れませんでした。水を入れると、その光もウェハに届きます 解説 。

物理のツボ①：スネルの法則で、NAが1を超えるわけ

光が屈折率n_1の物質から屈折率n_2の物質へ進むとき、**スネルの法則** $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$ が成り立ちます。高校の物理で習う式です。

レンズ（石英、n ≒ 1.56）から空気（n = 1）へ出る光では、n sin θは空気側で1を超えられません。レンズの中で sin θ ＞ 1／1.56、つまり法線からの角度θが約40°を超える光は、全反射して外へ出られません [2] 事実 。

ところが、レンズの出口の先が水（n = 1.44）なら、水の中でn sin θ = 1.44 × sin θ まで取れるので、NAは1を超えられます。リンは、空気中のNA 0.93と同じ角度（sin θ = 0.93）で水を使うと、**NAは1.34**になると書いています [1] 事実 。

計算してみる：レイリーの式 $R = k_1\lambda／NA$で、$k_1 = 0.27$とすると 本稿の計算 、

- 空気中（NA 0.93）：0.27 × 193 ÷ 0.93 ≒ **約56 nm**
- 液浸（NA 1.35）：0.27 × 193 ÷ 1.35 ≒ **約39 nm**

液浸で、描ける線は約3割細くなります。ASMLとニコンの最新の液浸の装置の解像度は、どちらも「38 nm以下」です [3] [4] 事実 。

● 同じ解像度で比べると、焦点深度に余裕ができる

液浸のもう一つの利点は、**焦点深度**です。リンは、同じ解像度で比べると、液浸の焦点深度は屈折率の比より大きく深くなると書き、計算例では**焦点深度が96%増える**としています [1] 事実 。パデュー大学の講義資料も、同じ解像度なら、液浸は焦点深度も増やすとしています [2] 事実 。比較の条件が大切です。**同じ解像度での焦点深度の利得**と、**NAを上げて解像度を追うと焦点深度が浅くなること**は矛盾しません。より細く描くのか、焦点の余裕を広げるのかを、装置・工程で選びます 解説 。

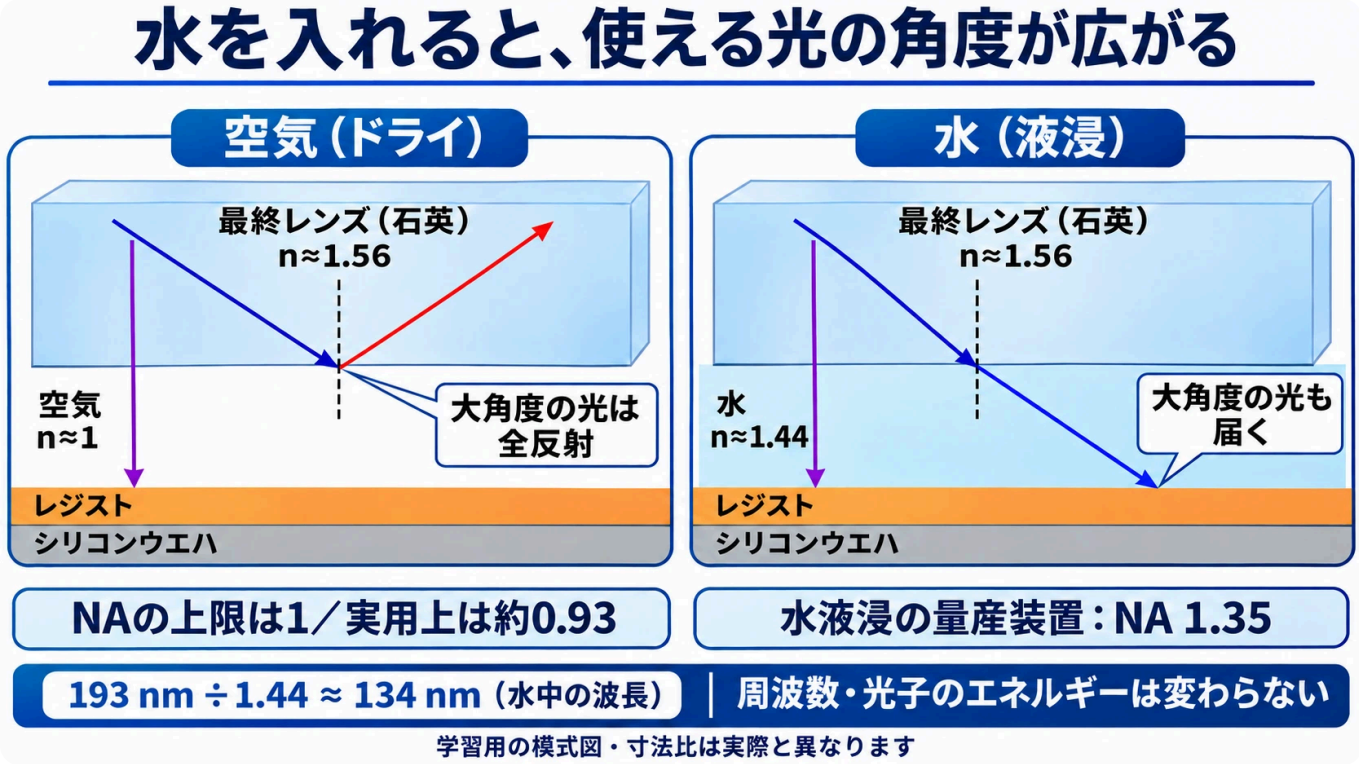


図1　液浸露光 — 水が、大角度の光の通り道を開く（概念図）

図の読み方

左は空気、右は水の場合です。空気では、大きな角度の光がレンズの出口で全反射してしまい、像に使えません。水を入れると、その光もウェハに届くので、NAが1を超えます。水の層の厚さは、見やすくするために強調しています。

4. 技術編③ — 液浸の歴史：アイデアは古く、実用は2000年代

液浸のアイデアそのものは、古くからありました。顕微鏡では昔から**油浸レンズ**が使われてきました。ASMLは、リソグラフィへの液浸の利用は**1980年代にIBMが最初に記述した**と書いています [6] 事実 。1980年に出願された特許は、投影レンズとウェハの間を、レジストと同じ屈折率の透明な液体で満たして露光する方法を示しています [12] 事実 。MITリンカーン研究所は、2000年に液浸でNAを1より大きくする研究を始めました [8] 事実 。

量産への道を切り開いたのは、TSMCの**バーン・リン**（林本堅）たちです。リンは、2002年と2004年の論文で液浸露光の効果を論じ、液浸の装置で試作したことを、自身の総説にまとめています [1] 事実 。

装置では、ASMLが2003年12月に業界初の液浸露光装置「TWINSCAN XT:1250i」を発表しました。2004年末には、TSMCがASMLの初期の液浸の装置で作った、**90 nm世代の完全に動くチップ**を発表しました。2006年のXT:1700Fiで、液浸露光は量産に入り、NAは0.93から**1.2**に上がりました [6] 事実 。ニコンも、2005年に**NA 1.07**の液浸の量産装置NSR-S609Bを出し、これを**NA 1.0の壁を世界で初めて破った**装置としています [10] 事実 。2007年には、ニコンがNA 1.30の装置を、45 nm世代の量産向けに出荷しました [9] 事実 。



オランダのフェルトホーフェンにある、半導体露光装置メーカーASMLの本社ビル（Commonsの説明による）。
画像：A ansems / Wikimedia Commons / パブリックドメイン（掲載用に縮小・WebP化）

5. 技術編④ — 水がもたらした新しい問題

● 秒速の世界で、水を扱う

液浸露光は、レンズとウェハの間に水を入れるだけ、と言えば簡単そうです。けれども、ウェハは高速で動き続けています。パデュー大学の講義資料は、1時間に100枚のウェハを処理する場合の説明として、各ショットに使える時間を1秒未満とし、水を供給・回収しながらステージを動かす難しさを示しています [2] 事実 。

ASMLは、高速のステージに水たまりを加えたことで、**気泡**と**逃げた水滴**という2つの新しい欠陥の原因が生まれたと書いています。同社は、最後のレンズの周りに輪の形の部品（**液浸フード**）を付けて水たまりを制御し、最終的に、**ウェハの動く速さを3倍にしながら、欠陥を1桁減らせた**としています [6] 事実 。

これは高速で水を制御するための課題を示した講義上の説明です。**露光ごとにウェハ全体を水に沈めたり、水をすべて抜いたりするわけではありません。**図2のように、レンズの近くの局所的な液体をフードで保ち、供給・回収を続ける方式が使われます [6] 解説 。

● 気泡、水の跡、ごみ

リンは、液浸の欠陥を、**写り込んだ気泡、水の跡、写り込んだ粒子、上から落ちた粒子**に分類しています。気泡は主に乱流から生まれ、大きさはふつうマイクロメートル程度です。それより小さな泡は、ガスを十分に抜いた水に溶けてしまうからです。水の跡は、液浸フードの外に逃げた水が残ってできます [1] 事実 。ウェハの縁と台の間のすき間では、乱流で泡が生まれやすいことも挙げています [1] 事実 。

● レジストが水に溶け出す — トップコート

材料の側にも、新しい課題が生まれました。JSRの2008年の技術報告は、液浸露光では、**光酸発生剤（PAG）などのレジストの成分が水に溶け出す**のを防ぐことと、**表面が水をよくはじく**ことが必要だと書いています。溶け出した成分は**露光装置のレンズを汚す**ので、厳しく規制されています [11] 事実 。

対策は2つです。レジストの上に、水を通さず水をはじく**トップコート**という保護膜を塗る方法と、溶け出しにくく水をはじくレジストを新しく作る方法です [11] 事実 。JSRは、同社のトップコートの表面の**後退接触角は69度**で、PAGの溶け出しを**100分の1以下**に減らしたとしています。ウェハの上を水が通り過ぎた後に水滴が残ると、**ウォーターマーク**という欠陥になるので、後退接触角の高い材料が好ましいとしています [11] 事実 。

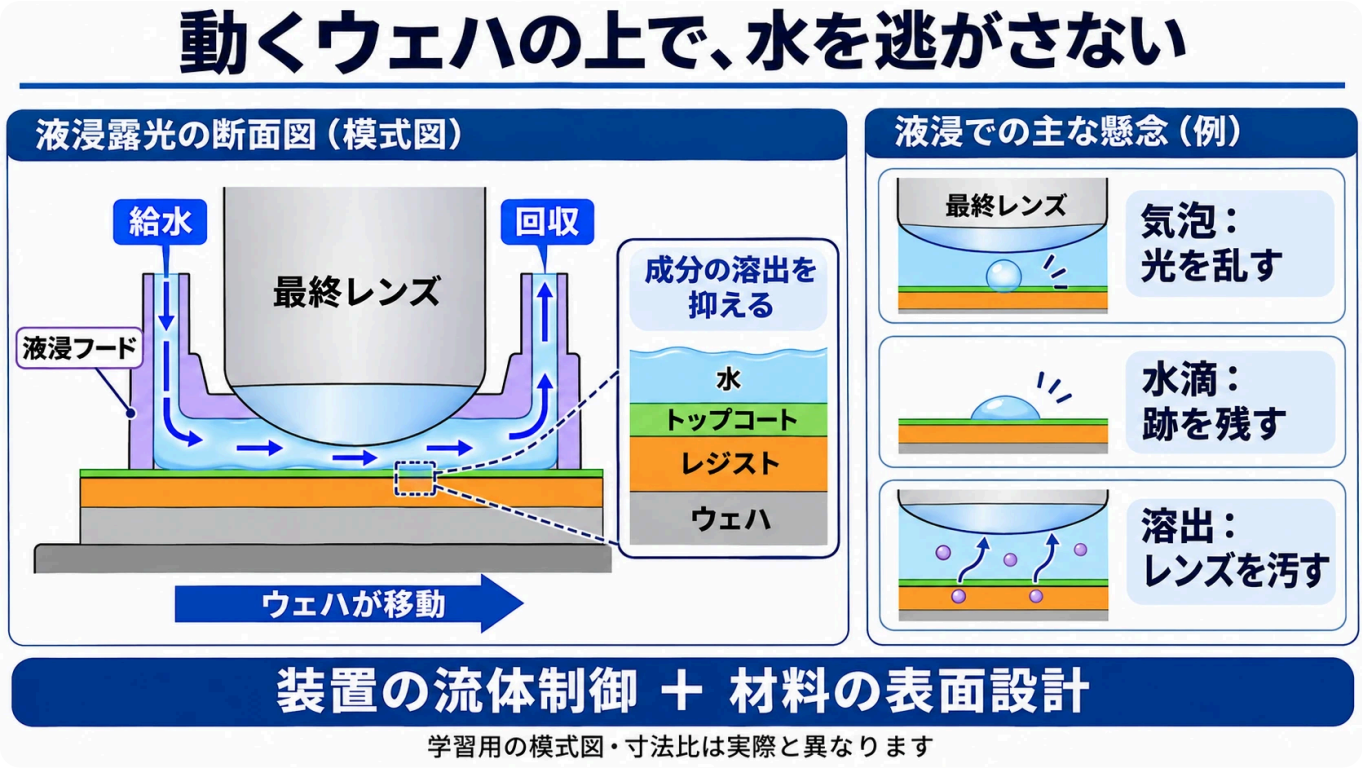


図2　液浸フードとトップコート — 装置と材料で水を制御する（概念図）

図の読み方

水はウェハ全体の水槽ではなく、最終レンズの近くの小さな領域にあります。フードが供給・回収を担い、その下でウェハが動きます。拡大図の緑の膜がトップコートで、レジストと水の接触を制御します。気泡・水滴・成分の溶出は、それぞれ異なる対策が必要です。図は役割を示したもので、特定の装置の内部構造を再現したものではありません。

物理のツボ②：水の温度は、0.1 ℃まで

水の屈折率は、温度で変わります。ボストン大学とMITリンカーン研究所の研究者は、193 nmでの水の屈折率の温度依存性を dn/dT ≈ −100 ppm/℃ と仮定し、屈折率を設計値の±10 ppm以内に保つために、**温度を±0.1 ℃以内**に制御する必要があると見積もりました。これは2003年のシミュレーションの条件による見積もりで、すべての量産装置に共通する仕様値ではありません [7] 事実 。

計算の読み方：論文の ppm 表記にそろえると、100 ppm/℃ × 0.1 ℃ ＝ 10 ppm です 本稿の計算 。ppm を絶対値の変化Δnとして表すか、基準の屈折率nに対する比Δn/nとして表すかで意味が変わるため、ここでは原論文の表記をそのまま使っています。重要なのは、わずかな水温の違いが屈折率を変え、像のピントや形に影響することです。露光の光が水を温めることも、課題の一つです [2] 事実 。

なぜNA 1.35で止まったのか

液浸のNAは、1.35で止まっています。ASMLは、水がなければNAを1より大きくするのは不可能だったが、水を入れることで同社の装置の光学系は**NA 1.35**に達したとしています [5] 事実 。ASMLとニコンの最新の装置も、NAは1.35です [3][4] 事実 。

理由は、光の通り道の中で**いちばん屈折率の小さい物質**がNAの上限を決めるからです。ロチェスター工科大学の研究者は、193 nmの水の液浸では、**水（約1.44）が上限を決め**、次がレンズの石英（約1.56）、レジスト（約1.75）だと書いています [13] 事実 。リンは、レンズの角度の現実的な上限を$\sin\theta = 0.95$とすると、水の液浸のNAの現実的な上限は**1.368**だと計算しています [1] 事実 。

では、水より屈折率の高い液体を使えばよいのでしょうか。2000年代後半には、そうした**高屈折率液浸**の研究も行われました。しかし、2009年の論文は、業界がこの開発を**やめると決めた**と書いています。根本的な障害があったからではなく、**タイミング**の問題だったとしています [14] 事実 。MITリンカーン研究所の研究者は、屈折率が高く、しかも光を吸収しにくい液体を両立させるのが難しく、屈折率は約1.65までしか上がらず、投資に見合わないと判断されたと振り返っています [15] 事実 。業界は、液浸のNAを1.35で止め、細かさの残りを**マルチパターニング**と**EUV**で稼ぐ道を選んだのです 解説 。

6. 技術編⑤ — マルチパターニング：1回で描けないなら、分けて描く

液浸でも、ハーフピッチ40 nmが限界

ITRSの2011年版は、**193 nmの液浸を使う単一露光では、ハーフピッチ40 nm程度が実用上の目安となった**と書いています。193 nm・NA 1.35の装置の解像度は**ピッチ約80 nm**に限られるので、当時の193 nm光学露光を延長するには**マルチパターニング**が必要になるとしています [16] 事実 。日本のロードマップ（STRJ）の2009年度の報告も、NAはすでに最大の1.35に達し、線とすき間のような単純な模様でもハーフピッチ40 nm程度が限界だと書いています [19] 事実 。

IRDSは、マルチパターニングを「**装置の解像度の限界を越えるために、1つの模様に2回以上の露光を使うこと、または、膜を付けたり取り除いたりする複数の工程で、模様の密度を上げること**」と定義しています [17] 事実 。ITRSは、その方法を大きく**ピッチ分割**と**スペーサーパターニング**の2つに分けています [16] 事実 。

ここでいう40 nmは、当時の193 nm液浸の等間隔ライン・スペースの目安です。**EUVを含むすべての波長の限界や、「40 nm世代」という製品名を指すものではありません**。また、ハーフピッチは同じ間隔で並ぶ線の中心間隔（ピッチ）の半分です。線とすき間が同じ幅の場合に、線幅とも一致します 解説 。

ピッチ分割（LELE）— 2枚のマスクで、交互に描く

ピッチ分割は、細かすぎる模様を、1本おきに**2枚のマスクに分けて**描く方法です。代表的なのが**LELE（リソ・エッチ・リソ・エッチ）**で、1枚目のマスクで露光してエッチングし、もう一度レジストを塗って2枚目のマスクで露光してエッチングします [16] 事実 。1回目のレジストを固めて（フリーズして）から2回目を露光する**LFLE**もあります [16][19] 事実 。

ピッチ分割で難しいのは、2回の露光の**重ね合わせ**です。図3のように、別々に作る線の位置がずれると、線自体の幅がそろっていても、線と線のすき間が不ぞろいになります。パデュー大学の講義資料も、重ね合わせのずれが最終パターンの寸法のばらつきにつながると指摘しています [18] 事実 。STRJは、ダブルパターニングでは、重ね合わせ精度は1回露光の**2分の1以下**が必要だという報告を紹介しています [19] 事実 。

物理のツボ③：2色で塗り分けられない模様 — 奇数の輪

ピッチ分割では、近すぎる2本の線を、別々のマスク（「色」）に分けます。カリフォルニア大学サンディエゴ校の研究者は、間隔が決められた値より狭い2つの模様は**反対の色**にしなければならないと説明しています [20] 事実 。

ここで、3つの模様が互いに近い（三角形になる）とどうなるでしょうか。Aを赤、Bを青にすると、AともBとも近いCは、赤にも青にもできません。同じ論文は、こうした**奇数の長さの輪**は2色で塗り分けられないので、模様の一部を分割する必要があると書いています [20] 事実 。リンも、3方向に最小の間隔で並んだ穴は、**3枚のマスク**に分ける必要があると書いています [1] 事実 。

これは数学の「グラフの彩色」の問題そのものです 解説 。チップの設計では、ソフトウェアが何十億もの模様について、この塗り分けを自動で行っています 推測 。

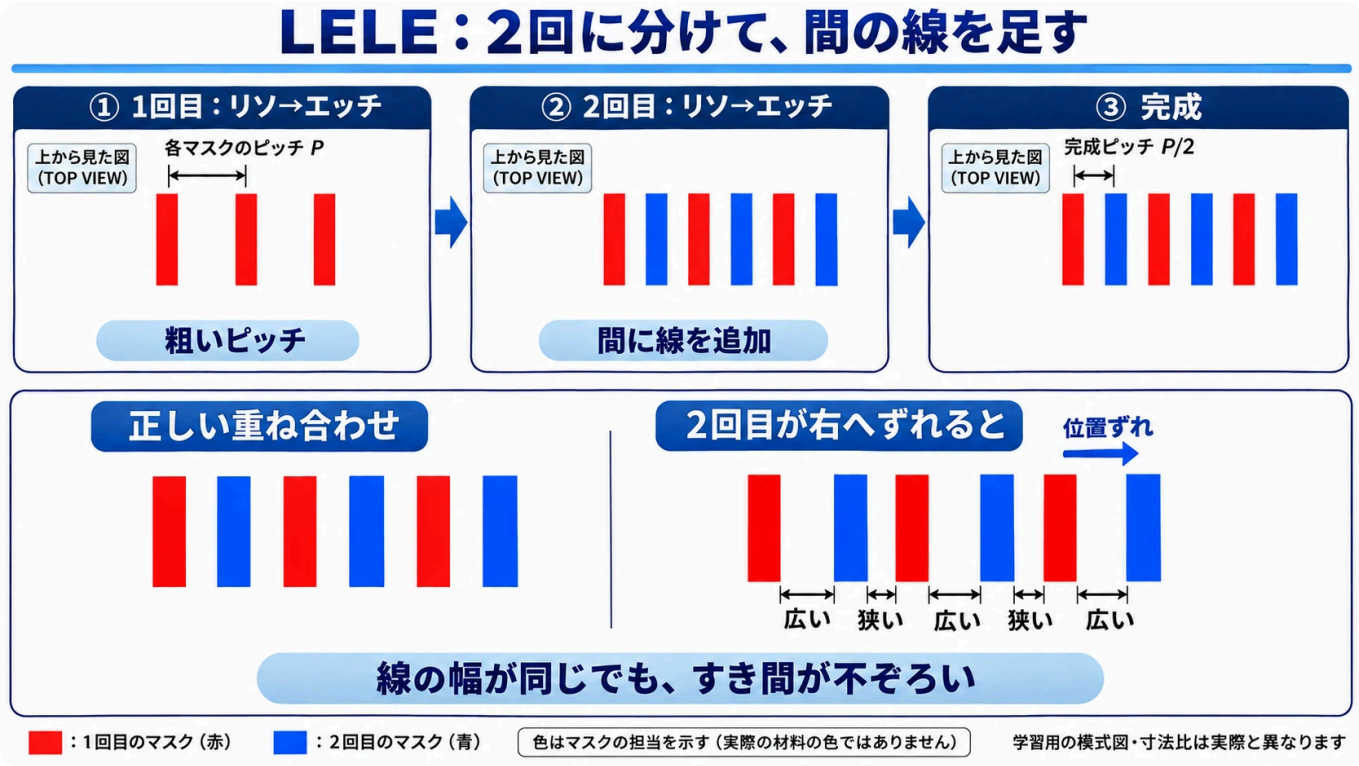


図3　LELE — 交互に線を作り、重ね合わせで間隔をそろえる（概念図）

図の読み方

上段は、赤と青で担当する線を分け、各マスクの粗いピッチPから完成ピッチP/2を作る流れです。色は材料の色ではなく、どちらのマスクで作るかを表します。下段右は青の線が右へずれた例です。赤から次の青までのすき間は広く、青から次の赤までは狭くなります。線自体の幅が同じでも、すき間は不ぞろいになります。

SADP — 型の側面に膜を付けて、線を2倍に

もう一つの方法が、**自己整合ダブルパターニング（SADP）**です。STRJの報告は、そのしくみを、模様の上に**均一に膜を付け**、**方向性のあるエッチング**で上面と底の膜だけを取り除き、模様の**側壁（輪郭）に膜を残して**、線の密度を2倍にし、設計した**ピッチを半分**にする方法だと説明しています [19] 事実 。手順は次のとおりです 解説 。

1. リソグラフィで、太めの線（**マンドレル**、芯）を作る
2. その上に、膜（**スペーサー**）を均一な厚さで積む（3-3のALDやCVD）
3. 方向性のあるエッチングで、上面と底のスペーサーを取り除き、マンドレルの両側の壁にだけ残す
4. マンドレルを取り除く。両側の壁のスペーサーが、1本の芯から**2本の線**として残る

パデュー大学の講義資料は、SADPの利点として、線の幅を精度よく制御できること、2枚目のマスクの重ね合わせの要求が緩いこと、線の縁のがたつきが小さいことを挙げ、欠点として、工程が増えて高くなることを挙げています [18] 事実 。残る線の幅を決める主な要素は、**スペーサーの膜厚とエッチング条件**です。元のリソグラフィは、芯の位置と寸法を通じて線の位置や間隔に関わります。Lam Researchは、スペーサーを使うマルチパターニングでは、**積んだ膜そのものがマスクになり、模様の大事な寸法を決める**と書いています [24] 事実 。

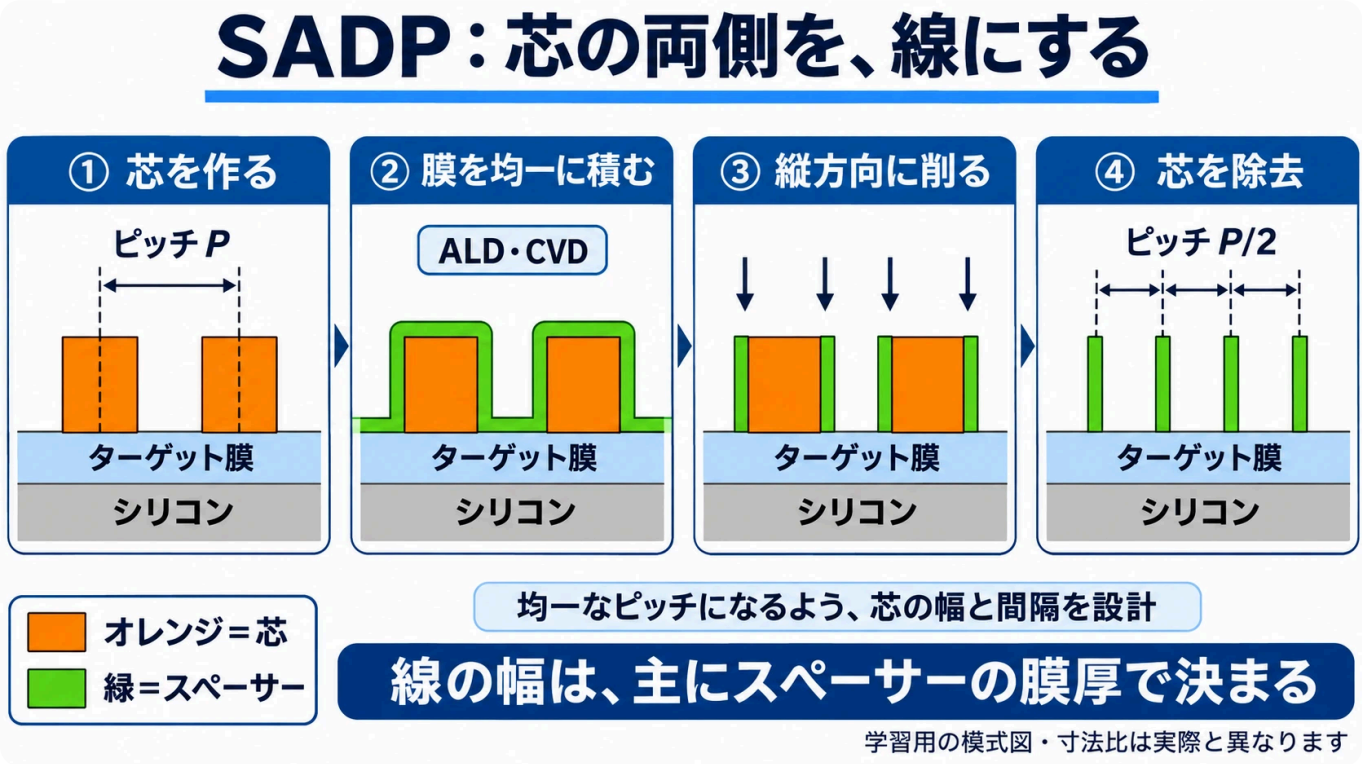


図4　SADP — 芯の両側に残した膜を、2本の線にする（概念図）

図の読み方

リソグラフィで作った芯（オレンジ）の両側の壁に、膜（緑）を残してから芯を取り除くと、芯1本から線が2本でき、ピッチが半分になります。残る線の幅は主にスペーサーの膜厚とエッチングの仕上がりで決まります。ただし、線の位置や間隔には、元の芯の寸法と配置も効きます。SAQPでは、第1段の線を次の芯に使い、**成膜からもう一度**繰り返します（図5）。

SAQP — もう一度繰り返して、4倍に

SADPを**2回繰り返す**と、線は4倍になります。これが**自己整合クアッドパターニング（SAQP）**です。ITRSの2011年版は、側壁スペーサーの4倍の方法は**「側壁スペーサーのダブルパターニングを2回行うことにほかならない」**と書き、液浸の80 nmのピッチの限界のため、ハーフピッチ20 nmより細いところで、2倍から4倍への移行が起こると見ていました [16] 事実 。

ベルギーの研究機関imecは、液浸露光（ASMLのNXT:1970i）で作った線を出発点に、スペーサーの成膜とエッチングを2回繰り返して、**4倍の密度（ハーフピッチ16 nm）**の線を作った例を紹介しています [21] 事実 。imecの2019年の記事は、さらに細かいピッチでは、液浸に**3回の倍増（SAOP、8倍）**を組み合わせるしかないが、工程が**極めて長く複雑**になると書いています [22] 事実 。

計算してみる：液浸の1回露光のハーフピッチを約40 nmとすると、SADPで約20 nm、SAQPで約10 nmになります 本稿の計算 。リンも、ピッチ分割でk_1を0.3から**0.15**に下げられ、ハーフピッチ**19 nm**が見込めると書いています [1] 事実 。

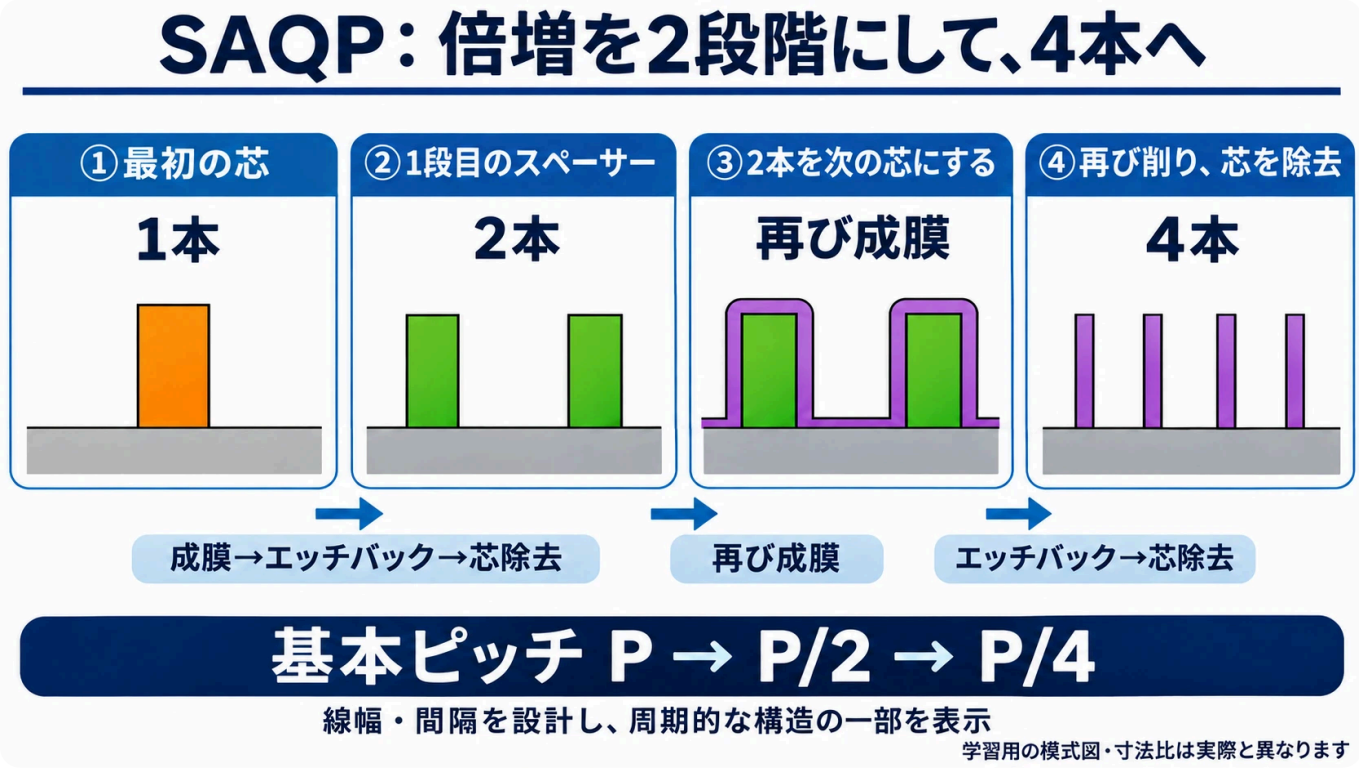


図5　SAQP — 成膜から繰り返し、1本の芯から4本へ（概念図）

図の読み方

オレンジの芯から緑の2本を作り、その2本を次の芯にして紫の膜を積みます。再び水平面の膜を削り、緑の芯を除くと、紫の4本が残ります。**「削る・芯を取る」だけを繰り返すのではなく、成膜からもう一巡する**のが要点です。均一なピッチには膜厚・芯の幅・間隔の設計が必要で、実際はハードマスクへの転写や材料の選択も含まれます。

線を「切る」マスク

スペーサーの基本工程は、芯の輪郭に沿った密な線の列を作ります。図ではその直線部分を示しています。芯の端ではループ状につながることもあり、線の端や不要部分を切り分ける工程が必要です。実際の回路にするには、いらない部分を**切る**必要があります。ITRSは、スペーサーパターニングには**2枚目のカットマスク**も必要だと書いています [16] 事実 。imecは、液浸のSAQPで配線を作る場合、線を切るブロックの層に**3枚のマスクと3回のリソ・エッチ**が必要になり、コストと複雑さが増すと書いています [21] 事実 。

そのため、マルチパターニングの時代のチップは、配線や素子を**決まった格子の上にまっすぐ並べる**設計になりました。テキサス大学とimecの研究者は、まず金属の線を印刷し、いらない部分をカットマスクで切り取る、**極めて規則的な1次元の格子状の配置**を紹介しています [23] 事実 。

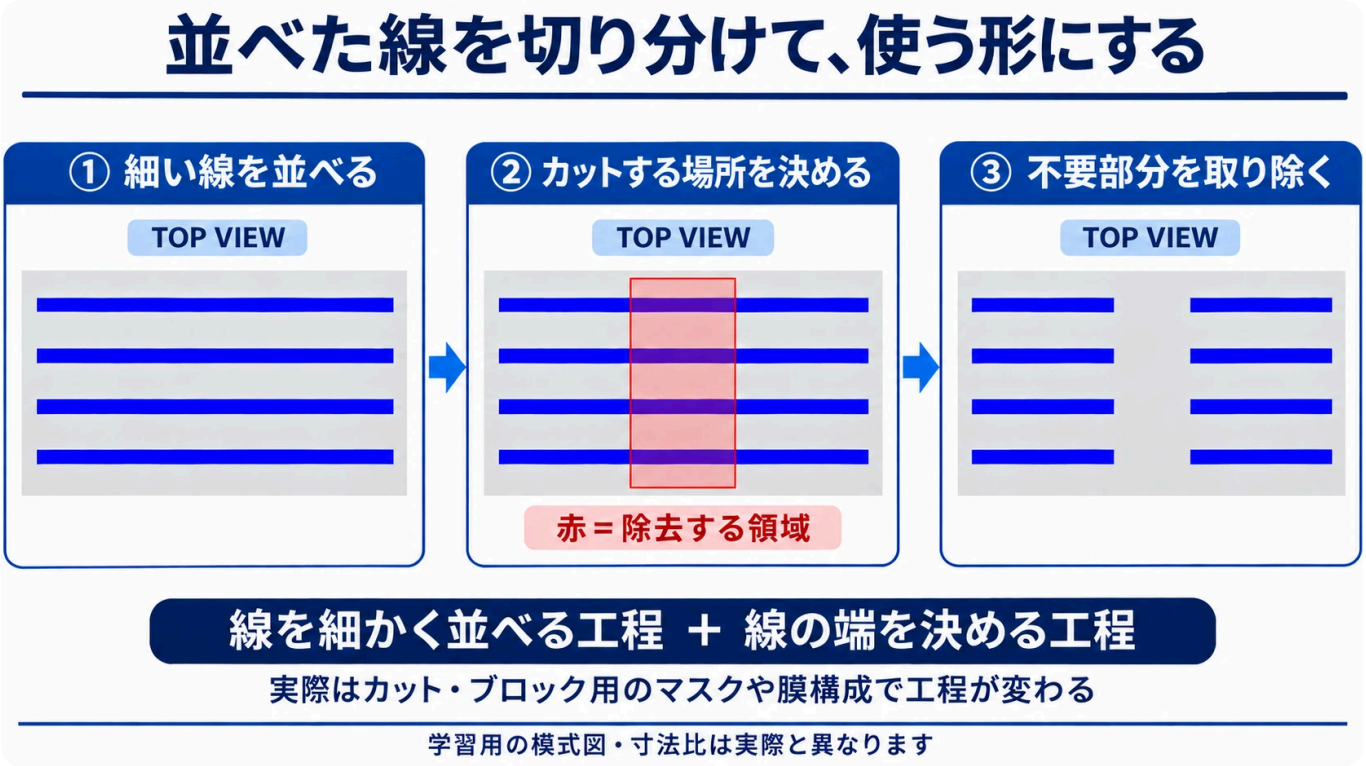
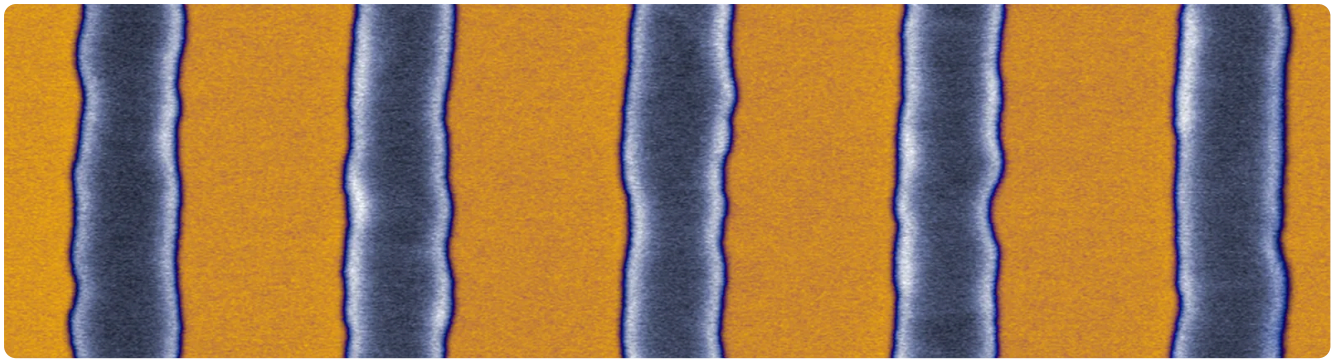


図6　カットマスク — 並べた線を、必要な長さに切り分ける（概念図）

図の読み方

青は並べた線、赤は取り除く領域です。中央の赤い位置に対応して、右では線が途切れます。細い線を密に並べることと、線の端を狙った場所に作ることは別の課題です。図はカットの役割を表したもので、実際にはカット・ブロックの方法や膜構成によって工程が変わります。



幅約100 nmのシリコンの基準の線を、走査電子顕微鏡で撮影して着色した画像。線の縁の揺らぎ（ラフネス）が見えます（Commonsの説明による。クレジット：B. Bunday, SEMATECH／K. Talbott, NIST）。最先端の線は、この数分の1の幅です。
画像：National Institute of Standards and Technology / Wikimedia Commons.jpg) / パブリックドメイン（掲載用に縮小・WebP化）

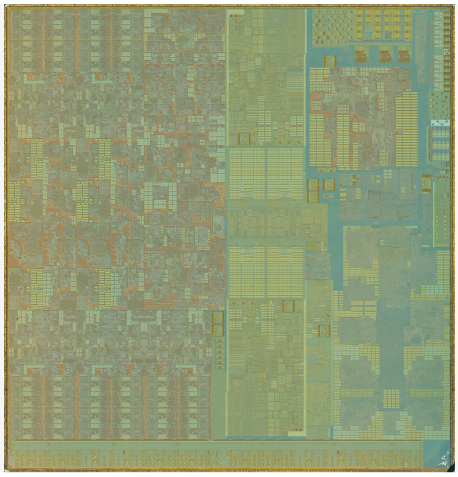
7. 技術編⑥ — どこで使われてきたか、そして代償

メモリから始まり、ロジックへ

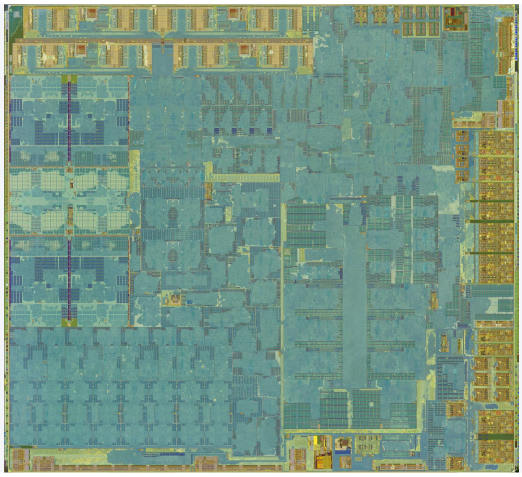
マルチパターニングを最初に量産で使ったのは、規則正しい模様が多いメモリです。STRJの報告は、NANDフラッシュメモリでは、2008年の時点で液浸の1回露光の限界に達しており、**スペーサーのダブルパターニングを使ったハーフピッチ32 nmの製品の出荷が始まっている**と書いています [19] 事実 。オランダのASMは、同社のプラズマALDは、もともとDRAMと平面のNANDの**スペーサーで決めるダブルパターニング**のために導入されたと書いています [25] 事実 。

ロジックでは、**Intel**が2017年に、10 nm世代で「**世界初の自己整合クアッドパターニング**」を使い、フィンのピッチを42 nmから34 nmに、最小の配線のピッチを52 nmから36 nmに縮めたと発表しました。同社は、SADPとSAQPがなければ、この微細化は不可能だったとしています [26] 事実 。

TSMCは、2016年の年次報告で、7 nmの開発の重点を、**重ね合わせの制御、欠陥の低減、パターニングの頑健さの改善**としていました。そして5 nmの開発では、**EUVを使って複雑なマルチパターニングの工程を減らす**と書いています [27] 事実 。2019年には、EUVを使った「N7+」を、業界初の商用のEUVの技術として発表し、元のN7より**密度が15〜20%高い**としています [27] 事実 。元のN7は、EUVを使わずに作られていたことになります 推測 。



Intelの10 nm世代で初めて作られたプロセッサ「Cannon Lake（Core i3-8121U）」のチップ。配線の層を取り除いてポリシリコンの層まで出し、5倍の顕微鏡で撮影したもの（Commonsの説明による）。この中に、SAQPで作られた数十nmのピッチの模様が詰まっています。
画像：FritzchensFritz / Wikimedia Commons / CC0（掲載用に縮小・WebP化）



携帯ゲーム機Steam Deck（LCD版）に使われた、AMDのプロセッサ「Van Gogh」のチップ。配線の層を取り除いてポリシリコンの層まで出し、5倍の顕微鏡で撮影したもの。TSMCの7 nm世代で作られています（Commonsのファイル名と説明による）。
画像：FritzchensFritz / Wikimedia Commons / CC0（掲載用に縮小・WebP化）



同じチップのパッケージ。「DIFFUSED IN TAIWAN」（前工程は台湾で行った）、「MADE IN TAIWAN」と刻まれています（Commonsの説明による）。
画像：FritzchensFritz / Wikimedia Commons / CC0（掲載用に縮小・WebP化）

代償 — 重ね合わせ、工程、コスト

マルチパターニングには、大きな代償がありました。ASMLは、マルチパターニングはリソグラフィにとって根本的な変化で、「**突然、解像度ではなく、重ね合わせが、微細化のカギになった**」と振り返っています [6] 事実 。

コストの面では、ITRSが、2枚のマスクを合わせたコストは、データが増え、検査と修理に時間がかかるので、**1枚の約1.5倍**になると書いています [16] 事実 。パデュー大学の講義資料は、大事な層ごとにマスクが2枚になり、**処理能力が半分**になると書いています [18] 事実 。リンも、ピッチ分割は**工程、装置、マスクが2倍**必要で、経済性が失われるおそれがあると指摘しています [1] 事実 。

設計の面でも、IRDSは、模様の端の位置ずれ（**エッジ配置誤差、EPE**）を、局所的なばらつき（線の縁のがたつきや寸法のばらつき）と、重ね合わせなどの全体的な位置のずれを含む指標として説明し、ばらつきの重要な指標としています [28] 事実 。

8. 産業編① — 液浸露光装置：ASMLと、ニコン

ASML — 液浸露光装置の主役

液浸露光装置の主役は、オランダの**ASML**です。同社の年次報告によると、ArF液浸の露光装置の販売台数と売上は次のとおりです [29] 事実 。

年	台数	売上（百万ユーロ）
2023年	125	9,017.4
2024年	129	9,667.0
2025年	131	10,311.4

事実

ASMLは、2023年の記事で、これまでに出荷した**1,100台超の液浸露光装置のうち、約80%**が同社のNXTの系列だとしています（同社の数字） [6] 事実 。同社の最新の液浸の装置は、**1日に6,000枚を超えるウェハ**を処理できることを示したとしています [30] 事実 。1時間あたり約250枚の計算です 本稿の計算 。2025年の年次報告では、液浸の装置は1回の露光にもマルチパターニングにも使え、EUVの装置と組み合わせて同じチップの別の層を作ることもできると書いています [29] 事実 。

ニコン — 液浸のもう一つの作り手

日本の**ニコン**も、液浸露光装置を作っています。最新の液浸の装置NSR-S636Eは、2024年1月に発売されました [4] 事実 。ただし、ニコンの販売台数（中古を含む）のうち、ArF液浸は、2023年3月期に4台、2024年3月期に11台、2025年3月期に3台、2026年3月期は**0台**でした（2027年3月期は3台の見通し） [31] 事実 ／見通しは 未確定／将来 。ASMLの年に100台を超える規模とは、大きな差があります 解説 。キヤノンの2025年の販売台数の内訳は、KrFとi線だけで、ArFの区分はありません [32] 事実 。

マルチパターニングを支える装置と材料

マルチパターニングは、露光装置だけでは成り立ちません。スペーサーの膜を均一に積む**成膜装置**と、方向性のある**エッチング装置**が、線の幅を決めます 解説 。

- **Lam Research**は、2014年に、スペーサーを使うマルチパターニングでは、積んだ膜がマスクになって寸法を決めると説明し、チップメーカーは光のリソグラフィの限界を補うためにダブル・クアッドパターニングを使っていると書いています [24] 事実 。同社の年次報告（2026年度）は、ALDの装置「Striker」の用途の一つを、**マルチパターニングで大事な寸法を決める、硬いパターニング用のスペーサーの材料**としています [33] 事実 。
- **ASM**のプラズマALDは、もともとスペーサーのダブルパターニングのために導入されました（第7節） [25] 事実 。
- **東京エレクトロン**は、露光の性能とコストの両立のため、EUVとマルチパターニングの併用などを評価していると書いています [34] 事実 。
- **KLA**は、年次報告で、マルチパターニングの光のリソグラフィとEUVのリソグラフィに向けたシミュレーションのソフトウェアを提供しているとしています [35] 事実 。
- **材料**では、JSRの液浸用トップコートや、トップコートが不要でダブルパターニングに使えるArFレジスト（2010年）があります。JSRは、トップコートなしでも、液浸露光の課題である**ウォーターマーク**などの欠陥を最小限にできることを示したとしています [11] [36] 事実 。

9. 産業編② — 液浸露光装置と輸出規制

以下は、193 nm液浸装置に対する規制が導入・拡大された経緯と技術指標の説明です。国ごとに対象・仕向地・施行時点が異なり、同じ装置に複数の制度が関係する場合があります。

オランダ — 2023年から許可制に

液浸露光装置は、国と国の安全保障の問題にもなりました。ASMLは、2023年6月30日、オランダ政府の新しい規則により、**最先端の液浸露光装置（TWINSCAN NXT:2000i以降の液浸の装置）**をオランダからEU域外に輸出する場合に、オランダ政府の輸出許可が必要になると発表しました。規則は**2023年9月1日**から施行されました [37] 事実 。

オランダの官報によると、規制の対象は、193 nm以上の波長の露光装置のうち、**法令上の最小解像寸法（MRF）が45 nm以下**で、かつ、同一装置による**重ね合わせ精度（DCO）が1.50 nm以下**のものです [38] 事実 。2024年の改正では、DCOが**1.50 nmを超え2.40 nm以下**の装置も許可の対象に加えられました [39] 事実 。ASMLは、2024年9月、これにより、NXT:1970iと1980iの出荷についても、米国政府ではなくオランダ政府に輸出許可を申請することになったと発表しています [40] 事実 。

このMRFは官報の式で計算する値で、製品ページの解像度やノード名と無条件に同一視できません [38] 解説 。

オランダ政府は、申請を1件ずつ審査するので「**輸出禁止ではない**」と説明しています [41] 事実 。官報の説明では、この拡大による許可の申請は、**1回限りで9件、その後は年に5件**と見込まれていました [39] 事実 。

ASMLは、2024年1月、2023年の**NXT:2050iとNXT:2100i**の出荷の許可の一部が、オランダ政府によって**取り消され**、中国の少数の顧客に影響したと発表しました [42] 事実 。

- **米国と日本**

米国の商務省は、2023年10月の規則で、液浸露光装置の重ね合わせ精度の規制の区分を、1.50 nm以下と、1.50 nmを超え2.4 nm以下の2つに分け、「**液浸露光装置の最先端の進歩**」を反映したとしています [43] 事実 。

日本でも、外国為替及び外国貿易法の省令（貨物等省令）に、193 nm以上の波長の露光装置のうち、**0.25 × 波長[nm]／NA が45以下**で、かつ、**同一装置による重ね合わせ精度の最大値が2.4 nm以下**のものなどが、輸出の許可が必要な品目として定められています（2026年11月時点の条文） [44] 事実 。

- **買う側から見ると**

ASMLの2025年の年次報告は、EUV以外の装置の売上は2024年と同じ程度で、**主に中国の主流の事業**が支えたとしています [29] 事実 。3-5で見たとおり、同社の2025年の売上の29.1%が中国の顧客向けでした（3-5） 事実 。中国の芯源微は、液浸露光装置向けの塗布現像装置も国産化したとしています [45] 事実 。中国の半導体メーカーSMICは、年次報告で、規制が厳しくなれば、規制対象の装置などの調達が難しくなるおそれがあるとしています [46] 事実 。

液浸露光装置は、オランダと日本のメーカーが供給し、材料・成膜・エッチング・塗布現像などを各国の会社が支えています。これに米国・オランダ・日本などの規制が関わり、中国も主要な顧客市場の一つとなる — という構図です 解説 。

10. これから求められること

- **EUVとの使い分け**：ASMLは、EUVは液浸のマルチパターニングと比べて、製造の工程を簡単にすると書いています [29] 事実 。一方、IRDSの2023年版は、「**EUVがマルチパターニングを置き換えることはない**」と書き、両方が層ごとの事情で使い分けられるとしています [28] 事実 。EUVは3-7で扱います。
- **重ね合わせは、さらに厳しく**：3-5で見たとおり、IRDSは2028年のロジックの重ね合わせ要求を1.6 nmとするロードマップを示しています（3-5） 未確定／将来 。ASMLの最新の液浸の装置NXT:2150iは、前の機種より製品上の重ね合わせ精度を15%改善したとしています [30] 事実 。
- **マルチパターニングを減らす技術**：Applied Materialsは、2023年に、EUVのダブルパターニングの工程の一部を置き換える「パターン整形」の装置を発表し、置き換える工程1つにつき、月産10万枚の生産能力あたり**約2億5,000万ドル**の設備投資、ウェハ1枚あたり**約50ドル**の製造コストを減らせるとしています（同社の主張） [47] 事実 。
- **エネルギー**：IRDSの2022年版は、EUVはマルチパターニングより工程が少ないが、EUVのエネルギーの消費が大きいので、エネルギーの節約にはならないと書いています [17] 事実 。

素材の技術者の出番

液浸とマルチパターニングは、**表面化学と薄膜の技術者の出番**が多い分野です 解説 。

- **水をはじく表面**：トップコートや液浸用のレジストの、後退接触角を高めながら現像液には溶ける分子の設計（[11]）
- **溶け出さないレジスト**：光酸発生剤がレンズを汚さないための材料設計（[11]）
- **スペーサーの膜**：均一な厚さで積め、硬く、エッチングの選択性が高い膜（[24] [25] [33]）
- **線を切る、埋める**：カットやブロックの工程の材料と、エッジ配置誤差を減らす工夫（[21] [28]）

スペーサーを使うSADP・SAQPでは、線の幅を決める重要な要素が**膜の厚さ**になります。LELEのように複数の露光を使う方式とは、寸法を作る仕組みが違います。3-3で見たALDの技術が、そのままリソグラフィの限界を広げています。

11. まとめと次回予告

視点	ポイント
空気の壁	NA＝n sin αは空気中で1未満（実用上0.93）。157 nmは実用化せず
液浸の原理	水の屈折率1.44。水中の波長は約134 nm、周波数は同じ。量産装置のNA 1.35。同じ解像度で比べると焦点深度に利得
歴史	1980年代のIBMの記述と特許。TSMCのリン。ASMLが2003年に発表、2006年に量産。ニコンが2005年にNA 1.07
液浸の課題	気泡・水の跡・粒子、液浸フード、トップコート（後退接触角69°）、温度±0.1 ℃
NAの上限	いちばん屈折率の小さい水が上限を決める。高屈折率液浸は断念
マルチパターニング	1回露光はハーフピッチ40 nmが限界。LELE（2色の塗り分け、重ね合わせ）とSADP・SAQP（膜の厚さで線を作る）、カットマスク
採用例	NAND（2008年）→Intel 10 nmで世界初のSAQP→TSMC 7 nm。代償は重ね合わせ・工程・コスト
産業	液浸装置はASML（2025年131台）、ニコン。最先端の液浸装置はオランダ・米国・日本の輸出規制の対象

次回は**3-7「フォトリソグラフィ（EUV）」**です。波長を193 nmから一気に13.5 nmへ ― 空気にも吸収されてしまう光を、スズのプラズマで作り、鏡だけで集めて回路を描く、最先端の露光技術を見ていきます。

12. 確認クイズ

1. レンズとウェハの間が空気のとき、NAが1を超えられないのはなぜですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> NA＝n sin αで、空気の屈折率nは1、sin αは1より大きくなれないからです。実用上の限界は約0.93です。

2. 水の屈折率を1.44とすると、193 nmの光は水の中でおよそ何nmの波長になりますか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 193÷1.44≒約134 nmです。光の周波数と光子のエネルギーは変わりません。ただし、水との接触で生じる溶出や表面の問題には別途対策が必要です。

3. k1＝0.27のとき、NA 0.93の空気中の装置と、NA 1.35の液浸の装置で描ける線の細さを計算してください。

> **▼ 答えを見る**
>
> 空気中は0.27×193÷0.93≒約56 nm、液浸は0.27×193÷1.35≒約39 nmです。

4. 液浸露光で生じた新しい欠陥を3つ挙げてください。

> **▼ 答えを見る**
>
> 乱流などでできる気泡、液浸フードの外に逃げた水が残る水の跡（ウォーターマーク）、水が運ぶ粒子です。

5. 液浸用のトップコートに求められる性質は何ですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 水を通さず、レジストの成分（光酸発生剤など）が水に溶け出すのを防ぐことと、表面が水をよくはじくこと（後退接触角が高いこと）です。また、現像のときにアルカリの現像液で取り除けることも必要です。

6. 液浸のNAが1.35で止まっているのはなぜですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 光の通り道の中でいちばん屈折率の小さい物質がNAの上限を決め、193 nmの水の液浸では水（約1.44）がその物質だからです。レンズの角度の現実的な上限を考えると、上限は約1.37になります。水より屈折率の高い液体は、光を吸収しにくい性質との両立が難しく、開発は打ち切られました。

7. ピッチ分割（LELE）で、重ね合わせの精度が特に大事になるのはなぜですか。

▼ 答えを見る

1本おきの線を別々の露光で作るので、2回の露光の位置がずれると、そのまま線と線のすき間の不ぞろい（寸法のばらつき）になるからです。

8. 互いに近い3つの模様（三角形）を、LELEの2枚のマスクに分けられないのはなぜですか。

▼ 答えを見る

近い模様どうしは別のマスク（反対の色）にしなければなりませんが、3つが互いに近い奇数の輪は、2色で塗り分けられないからです。模様を分割するか、3枚目のマスクが必要になります。

9. SADPで、最終的な線の幅を決めるのは何ですか。

▼ 答えを見る

リソグラフィではなく、芯（マンドレル）の側壁に付けたスペーサーの膜の厚さです。そのため、均一な厚さで積めるALDなどの成膜技術が重要です。

0. 液浸のハーフピッチを約40 nmとすると、SADPとSAQPではそれぞれ約何nmになりますか。

▼ 答えを見る

SADPで約20 nm、SAQPで約10 nmです。

13. 用語集

液浸露光
レンズとウェハの間を水などの液体で満たして露光する方法。NAを1より大きくできる。

屈折率
光が物質の中を進む速さが、真空中の何分の1かを表す値。水は193 nmで約1.44。

スネルの法則
光が屈折するとき、n1 sinθ1＝n2 sinθ2が成り立つという法則。

全反射
屈折率の大きい物質から小さい物質へ光が進むとき、角度が大きいと光が境目ですべて反射される現象。

実効波長
液体の中での光の波長。真空中の波長を屈折率で割った値。

液浸フード
最後のレンズの周りに付けて、レンズとウェハの間の水を供給・回収し、制御する部品。

ウォーターマーク
ウェハの上に残った水滴が乾いてできる、模様の欠陥。

トップコート
液浸露光で、レジストの上に塗る保護膜。水を通さず、水をはじく。

後退接触角
水滴が表面から引いていくときの接触角。大きいほど水が残りにくい。

溶出（リーチング）
レジストの成分が、液浸の水に溶け出すこと。

高屈折率液浸
水より屈折率の高い液体を使ってNAをさらに上げる方法。開発は打ち切られた。

マルチパターニング
1つの模様を複数回の露光や、成膜・除去の工程で作り、模様の密度を上げる方法。

ピッチ分割
細かい模様を1本おきに複数のマスクに分けて描く方法。

LELE
リソ・エッチ・リソ・エッチ。露光とエッチングを2回繰り返すピッチ分割。

LFLE
リソ・フリーズ・リソ・エッチ。1回目のレジストを固めてから2回目を露光するピッチ分割。

色分け（分割）
ピッチ分割で、模様をどのマスクに割り当てるかを決めること。

マンドレル
SADP・SAQPで、スペーサーを付けるための芯になる模様。

スペーサー
マンドレルの側壁に残した膜。これが最終的な線になる。

SADP
自己整合ダブルパターニング。スペーサーで線を2倍にする方法。

SAQP
自己整合クアッドパターニング。SADPを2回繰り返して線を4倍にする方法。

カットマスク
規則的に並んだ線の、いらない部分を切り取るためのマスク。

エッジ配置誤差（EPE）
模様の端の位置のずれ。局所的な寸法・線の縁のばらつきと、重ね合わせなどを含めた位置精度の指標。

DCO
同一の露光装置で評価する重ね合わせ精度（Dedicated Chuck Overlay）。輸出規制の技術指標の一つ。

14. 参考資料（一次情報）

1. **B. J. Lin（TSMC）**「Optical lithography—present and future challenges, C. R. Physique 7, 858–874（2006年、PDF p.3〜8、p.13、p.15〜16）」 — 資料を開く
2. **M. Qi（パデュー大学 ECE695Q、nanoHUB）**「Lecture 10: Resolution Enhancement Techniques（2016年、スライド24、26〜28、32〜34）」 — 資料を開く
3. **ASML**「TWINSCAN NXT:2000i、NXT:2100i（製品ページ）」 — 資料を開く
4. **ニコン**「Nikon Releases the NSR-S636E ArF Immersion Scanner（2023年12月6日）」 — 資料を開く
5. **ASML**「Lithography principles: Lenses and mirrors」 — 資料を開く
6. **ASML**「How immersion lithography saved Moore's Law（2023年）」 — 資料を開く
7. **S. Baek, D. Cole（ボストン大学）, M. Rothschild, M. Switkes（MITリンカーン研究所）**「Simulation Study of Process Latitude for Liquid Immersion Lithography（SPIE 2003、後にJ. Microlith. Microfab. Microsyst. 3(1)に掲載、PDF p.9）」 — 資料を開く
8. **M. Rothschild ほか（MITリンカーン研究所）**「Recent Trends in Optical Lithography, Lincoln Laboratory Journal 14(2)（2003年、p.224、p.229〜230）」 — 資料を開く
9. **Nikon Precision**「Nikon Ships World's First 45 nm Production Immersion Scanner（2007年2月28日）」 — 資料を開く
10. **ニコン**「半導体露光装置の歴史」 — 資料を開く
11. **JSR**「JSR TECHNICAL REVIEW No.115「ArF液浸用トップコート材料」（2008年、p.32〜34）」 — 資料を開く
12. **W. Tabarelli, E. W. Löbach**「米国特許 US4346164「Photolithographic method for the manufacture of integrated circuits」（1980年出願、1982年登録）」 — 資料を開く
13. **B. W. Smith ほか（ロチェスター工科大学）**「25nm Immersion Lithography at a 193nm Wavelength, Proc. SPIE 5754（2005年、p.1）」 — 資料を開く
14. **P. A. Zimmerman ほか**「High index 193 nm immersion lithography: The beginning or the end of the road, Proc. SPIE 7274（2009年、PDF p.2）」 — 資料を開く
15. **M. Rothschild（MITリンカーン研究所）**「A Roadmap for Optical Lithography, Optics & Photonics News（2010年6月）」 — 資料を開く
16. **ITRS**「2011 Edition, Lithography（PDF p.3〜5、p.10〜11）」 — 資料を開く
17. **IRDS**「2022 Edition, Lithography（PDF p.6、p.12）」 — 資料を開く
18. **M. Qi（パデュー大学 ECE695Q、nanoHUB）**「Lecture 11: RETs (continued)／Double patterning（2016年、スライド9〜16）」 — 資料を開く
19. **JEITA 半導体技術ロードマップ専門委員会（STRJ）**「平成21年度報告 第6章 リソグラフィ（PDF p.2、p.5〜7）」 — 資料を開く
20. **A. B. Kahng ほか（カリフォルニア大学サンディエゴ校）**「Layout Decomposition Approaches for Double Patterning Lithography, IEEE TCAD 29(6)（2010年、p.939〜941）」 — 資料を開く
21. **imec**「First EUV lithography high-volume manufacturing solution for N5 BEOL（imec Magazine、2017年3月）」 — 資料を開く
22. **imec**「EUV lithography: weighing the options for future logic and memory applications（imec Magazine、2019年6月）」 — 資料を開く
23. **Y. Lin, D. Z. Pan（テキサス大学オースティン校）ほか**「Patterning Aware Design Optimization of Selective Etching in N5 and Beyond, ICCD（2017年、p.1）」 — 資料を開く
24. **Lam Research**「Lam's New Etch and Deposition Products Control Process Variability to Enable Advanced Multiple Patterning（プレスリリース、2014年7月7日）」 — 資料を開く
25. **ASM International**「Annual Report 2025（PDF p.22）」 — 資料を開く
26. **K. Mistry（Intel）**「Intel 10 nm technology（Technology and Manufacturing Day、2017年、スライド p.6、p.13、p.34。ミルウォーキー工科大学の講義ページに掲載された写し）」 — 資料を開く
27. **TSMC**「2016 Annual Report, Technology Leadership／プレスリリース「N7+ Technology is First EUV Process…」（2019年10月7日）」 — 資料を開く
28. **IRDS**「2023 Update, Lithography（PDF p.6、p.9）」 — 資料を開く
29. **ASML**「Annual Report 2025（印刷 p.16〜17、p.20〜21、p.66、p.280）」 — 資料を開く

30. **ASML**「TWINSCAN NXT:2150i／DUV lithography systems（製品ページ）」 — 資料を開く

31. **ニコン**「2026年3月期 決算説明資料（2026年5月8日、p.38）」 — 資料を開く

32. **キヤノン**「2025年12月期 決算説明会（2026年1月29日、スライド p.22）」 — 資料を開く

33. **Lam Research（米国SEC提出 Form 10-K、2026年度）**「Item 1 Business（p.6）」 — 資料を開く

34. **東京エレクトロン**「統合報告書2026（p.20）」 — 資料を開く

35. **KLA（米国SEC提出 Form 10-K、2026年度）**「Item 1 Business（p.4）」 — 資料を開く

36. **JSR**「JSR introduces non-topcoat self-freezing ArF Photoresist for double patterning process（2010年2月）」 — 資料を開く

37. **ASML**「Statement regarding Dutch government's export control regulations announcement（2023年6月30日）」 — 資料を開く

38. **オランダ官報（Staatscourant）2023年 第18212号**「Regeling geavanceerde productieapparatuur voor halfgeleiders（PDF p.2〜3）」 — 資料を開く

39. **オランダ官報（Staatscourant）2024年 第29008号**「同規則の改正（PDF p.2、p.4）」 — 資料を開く

40. **ASML**「Statement regarding Dutch government's updated export license requirement（2024年9月6日）」 — 資料を開く

41. **オランダ政府**「The Netherlands expands export control measure advanced semiconductor manufacturing equipment（2024年9月6日）」 — 資料を開く

42. **ASML**「Statement regarding partial revocation export license（2024年1月1日）」 — 資料を開く

43. **米国商務省 産業安全保障局（BIS）**「Export Controls on Semiconductor Manufacturing Items, 88 FR 73424（2023年10月25日、p.73440）」 — 資料を開く

44. **e-Gov法令検索**「輸出貿易管理令別表第一及び外国為替令別表の規定に基づき貨物又は技術を定める省令（第6条第17号、2026年11月7日時点）」 — 資料を開く

45. **瀋陽芯源微電子設備（KINGSEMI）**「2025年年度報告（p.12、p.20、p.27）」 — 資料を開く

46. **中芯国際（SMIC）**「2025年 年次報告（香港証券取引所に提出、PDF p.27）」 — 資料を開く

47. **Applied Materials**「Applied Materials' Innovative Pattern-Shaping Technology Reduces the Cost, Complexity and Environmental Impact of Chipmaking（2023年2月28日）」 — 資料を開く

15. 主張と出典の対応表（監査）

本文の主張	根拠	区分
周波数は変わらない、sin θ＝0.93でNA 1.34、焦点深度96%増、欠陥の4分類・気泡の大きさ・水の跡の原因・ウェハの縁、NAの現実的な上限1.368、3方向で3枚のマスク、k1を0.15に・ハーフピッチ19 nm、工程・装置・マスクが2倍、液浸の試作	Lin [1]	事実
空気中の実用上の限界約0.93、水1.44・193→134 nm、全反射の角度、同じ解像度で焦点深度増、高速処理での水の供給・回収とステージ移動、液体の加熱	パデュー大学 L10 [2]	事実
液浸の最新装置のNA 1.35・解像度38 nm以下	ASML [3]、ニコン [4]	事実
水がなければNA 1超は不可能、水でNA 1.35	ASML [5]	事実
2001年12月の157 nmの学会、1980年代にIBMが記述、2003年12月にXT:1250i、2004年末にTSMCの90 nm、2006年XT:1700FiでNA 0.93→1.2、液浸フード・速さ3倍・欠陥1桁減、気泡と水滴、重ね合わせが重要に、1,100台超の約80%がNXT	ASML [6]	事実
dn/dT約−100 ppm/℃、±10 ppm・±0.1 ℃	Baek ほか [7]	事実
液体で全反射していた光を届ける、2000年に研究開始	MIT LL [8]	事実
2007年にNA 1.30を45 nm量産向けに出荷	ニコン [9]	事実
2005年NSR-S609B、NA 1.07、NA 1.0を世界で初めて突破	ニコン [10]	事実
溶出防止と撥水性、露光機の汚染、トップコートと非トップコート、後退接触角69度・PAG溶出1/100以下、ウォーターマーク	JSR [11]	事実
投影レンズとウェハの間をレジストと同じ屈折率の液体で満たす	US4346164 [12]	事実
いちばん屈折率の小さい物質、水1.44・石英1.56・レジスト1.75	RIT [13]	事実

本文の主張	根拠	区分
業界が高屈折率液浸の開発をやめた、タイミングの問題	Zimmerman ほか [14]	事実
屈折率と吸収の両立が難しく約1.65まで、投資に見合わない	Rothschild 2010 [15]	事実
1回露光はハーフピッチ40 nmで限界、ピッチ約80 nm、ピッチ分割とスペーサーの2方式、LELE・LFLE、カットマスク、2枚で約1.5倍のコスト、SAQPはSADPの2回、ハーフピッチ20 nm未満で4倍へ	ITRS 2011 [16]	事実
マルチパターニングの定義、EUVはエネルギーを節約しない	IRDS 2022 [17]	事実
重ね合わせのずれによる線間の不ぞろい、SADPの利点と欠点、マスク2枚・処理能力半分	パデュー大学 L11 [18]	事実
NA最大1.35・ハーフピッチ40 nm程度、SADPのしくみ、LFLE、NANDで2008年にハーフピッチ32 nm、重ね合わせ1/2以下	STRJ 2009 [19]	事実
反対の色、奇数の輪は2色で塗れない	Kahng ほか [20]	事実
NXT:1970iから4倍の密度・ハーフピッチ16 nm、ブロックに3枚のマスクと3回のリソ・エッチ	imec 2017 [21]	事実
液浸にはSAOP、極めて長く複雑	imec 2019 [22]	事実
1次元の格子状の配置とカットマスク	Lin・Pan ほか [23]	事実
膜がマスクになり寸法を決める、ダブル・クアッドパターニングを使っている	Lam 2014 [24]	事実
プラズマALDはスペーサーのダブルパターニングのために導入	ASM [25]	事実
10 nmで世界初のSAQP、フィン42→34 nm、配線52→36 nm、SADP・SAQPなしでは不可能	Intel [26]	事実
7 nmの開発の重点、5 nmでEUVを使いマルチパターニングの工程を減らす、N7+は初の商用EUV・密度15〜20%増	TSMC [27]	事実
EPEの定義、EUVはマルチパターニングを置き換えない	IRDS 2023 [28]	事実

本文の主張	根拠	区分
ArF液浸の台数と売上（2023〜2025年）、1回露光とマルチパターニングの両方・EUVと組み合わせ、EUVは工程を簡単に、EUV以外は中国の主流事業が支えた	ASML AR2025 [29]	事実
1日6,000枚超、NXT:2150iの重ね合わせ15%改善	ASML [30]	事実
ニコンのArF液浸の台数（4・11・3・0台、見通し3台）	ニコン [31]	事実
キヤノンの内訳にArFの区分がない	キヤノン [32]	事実
Strikerはマルチパターニング用のスペーサーの材料	Lam 10-K [33]	事実
EUVとマルチパターニングの併用などを評価	東京エレクトロン [34]	事実
マルチパターニングとEUVのシミュレーション	KLA 10-K [35]	事実
トップコートなしでウォーターマークを最小限に	JSR 2010 [36]	事実
NXT:2000i以降に輸出許可、2023年9月1日施行	ASML [37]	事実
解像度45 nm以下・DCO 1.50 nm以下	オランダ官報2023 [38]	事実
DCO 1.50 nm超2.40 nm以下を追加、申請は1回9件・年5件	オランダ官報2024 [39]	事実
NXT:1970i・1980iもオランダ政府に申請	ASML [40]	事実
輸出禁止ではない	オランダ政府 [41]	事実
NXT:2050i・2100iの許可の一部取り消し	ASML [42]	事実
DCOの区分を2つに分割、液浸の最先端の進歩	米国BIS [43]	事実
193 nm以上・0.25λ/NA≤45・同一装置の重ね合わせ精度最大値2.4 nm以下など（2026年11月時点の条文）	e-Gov [44]	事実
液浸向けの塗布現像装置を国産化	芯源微 [45]	事実
規制対象の装置の調達が難しくなるおそれ	SMIC [46]	事実

本文の主張	根拠	区分
約2億5,000万ドル・約50ドルの削減（同社の主張）	Applied Materials [47]	事実
空気中約56 nm・液浸約39 nm、134 nm、論文のppm表記で0.1 ℃あたり10 ppm、1日6,000枚は1時間約250枚、SADP約20 nm・SAQP約10 nm	上記の出典値と、本文に明記した前提・式による計算	本稿の計算
元のN7はEUVを使わなかった、設計ソフトの自動の塗り分け	本稿の推測	推測

最終更新：2026年11月7日／技術は原論文・大学の講義資料・特許・ITRS／IRDS／STRJ（国際・日本の半導体ロードマップ）・研究機関（imec）と各社の技術資料、企業の情報は各社の年次報告書・決算資料・製品ページ・プレスリリース・米国SEC提出書類、輸出規制はオランダ官報・オランダ政府・米国官報・日本の法令を出典としています。「世界初」「シェア」などの表現は各社自身の発表で、本文中にそのことを明記しています。物理の一般原理の説明と、本稿の計算・推測は、本文中のタグで区別しています。図6点はImage Genで作成した学習用の模式図です。光路、膜厚、線幅、ピッチ、位置ずれは見やすさのために簡略化・強調しています。写真は各キャプションに出典・作者・ライセンスを記載しています。

© 2026 Troy Technical
当サイトの文章・図版・動画のうち、著作権法で保護される部分の無断転載・再配布・再アップロードを禁じます。ただし、法令上認められる引用等を除きます。
引用資料・商標等の権利は各権利者に帰属します。写真等の引用画像には、各キャプションに記載したライセンスが適用されます。記事へのリンクによるご紹介は歓迎します。転載・二次利用についてはお問い合わせください。