SEMICONDUCTOR FRONT-END · PART 3-5

フォトリソグラフィ（基礎）
― 光で回路を「写す」技術

ここまでの回で、膜を「作る」方法がそろいました。次は、その膜に回路の形を「写す」番です。フォトリソグラフィは、光に反応する樹脂（レジスト）をウェハに塗り、回路の原版（マスク）を通した光を縮小して当て、現像して形を残す技術です。写真の焼き付けに似ていますが、描く線は光の波長より細くなりました。なぜ波長を短くし、レンズを大きくすると細い線が描けるのか。光が足りないKrFの時代に、IBMが生んだ「化学増幅レジスト」は何を変えたのか。露光装置で圧倒的なASMLと、塗布・現像の装置やレジスト、マスクの材料で強い日本の会社まで見ていきます。

半導体前工程シリーズ 第3部 3-5／難易度 ★★☆（概論1-4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 ― 写真の焼き付けと、何が同じで何が違うか
3. 技術編② ― レジスト工程の流れ
4. 技術編③ ― 光の性質が、線の細さを決める
5. 技術編④ ― 露光装置：縮小して、つなげて写す
6. 技術編⑤ ― レジストの化学：光が足りない時代の発明
7. 技術編⑥ ― マスクと、k_1を下げる工夫
8. 産業編① ― 露光装置：ASMLと、日本の2社
9. 産業編② ― 露光装置の「相棒」と、材料の会社
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

- レジストを塗ってから現像するまでの工程の流れと、それぞれの工程の目的を説明できる
- レイリーの式 $R=k_1 \lambda / NA$ を使って、波長・開口数・k_1から描ける線の細さを計算できる
- 化学増幅レジストのしくみと、それが必要になった理由を説明できる
- 露光装置・塗布現像装置・レジスト・マスクの分野で、どの国のどの会社が強いのかを挙げられる

1. この回を3行でつかむ

- **フォトリソグラフィ**は、ウェハに光に反応する樹脂（**レジスト**）を塗り、回路の原版（**マスク**）の像を、代表的な縮小投影方式では**4分の1に縮小して**光で焼き付け、現像して形を残す技術です。残ったレジストを「型紙」にして、エッチングやイオン注入を行います。
- 描ける線の細さは、**$R = k_1 \lambda / NA$**（λは光の波長、NAはレンズの開口数）で決まります。波長は436 nm（g線）から365 nm（i線）、248 nm（KrF）、193 nm（ArF）へと短くなり、k_1も理論の下限0.25に近づきました。光が弱いKrFの時代を支えたのが、IBMが生んだ**化学増幅レジスト**です。
- 露光装置の世界の売上の**91%**をオランダのASMLが占め、キヤノンが4%です（経済産業省の資料、グローバルネットの資料をもとに作成）。塗布・現像の装置は東京エレクトロンが**85%**、フォトレジストは日本の会社が合わせて**78%**（2023年）を占めています（いずれも経済産業省の資料）。

2. 技術編① — 写真の焼き付けと、何が同じで何が違うか

膜に「型紙」を作る

3-3と3-4で、ウェハの全面に膜を積む方法を見ました。けれども、全面の膜のままでは回路になりません。必要なところだけを残し、いらないところを削る必要があります。そのための「型紙」を作るのが、フォトリソグラフィです 解説 。

スタンフォード大学の1999年度の講義資料は、リソグラフィが**ウェハの製造コスト全体の約35%**を占め、重ね合わせの精度は**線の太さの約3分の1**が求められると書いています [1] 事実 。この割合と精度の目安は当時の資料にある値で、現在のすべての製品に共通する固定値ではありません。1つのチップを作るのに、この工程が何十回も繰り返されます（概論1-4） 解説 。

ポジ型とネガ型

レジストには2つの型があります。日本国際賞の財団の解説によると、**ポジ型**は光が当たった部分が現像液に溶け、**ネガ型**は光が当たった部分が残ります [1] [1] 事実 。ポジ型なら、マスクで光をさえぎった部分が、そのまま形として残ります 解説 。

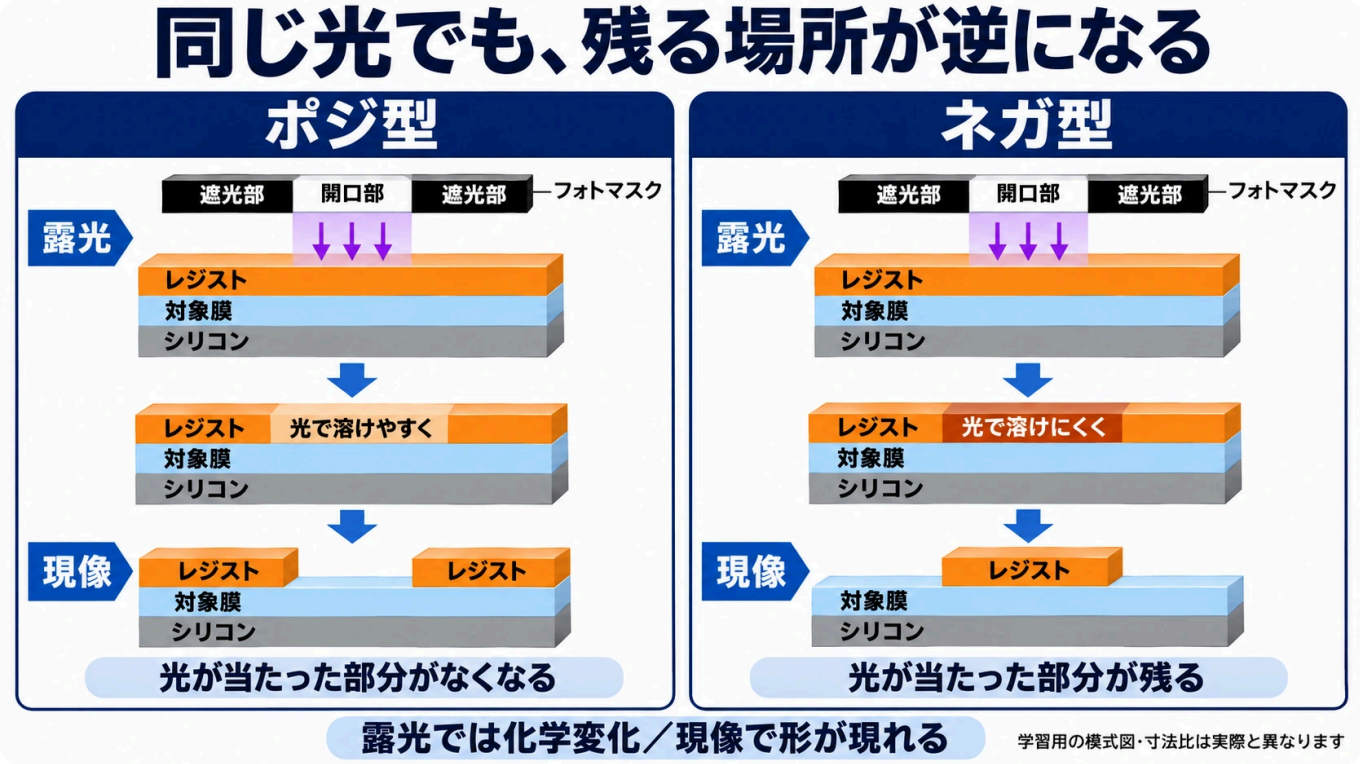


図1　ポジ型とネガ型 ― 光が当たった場所は、なくなる？ 残る？（概念図）

図の読み方

左右とも同じマスクを使い、中央だけに光を当てています。ポジ型では中央が溶けて開き、ネガ型では中央が残ります。**露光は溶けやすさを変える工程、現像はその違いを形にする工程**です。ポジ型・ネガ型という名前を「光が当たったところが残るか」で確認すると、取り違えにくくなります。

3. 技術編② ― レジスト工程の流れ

● 工程の基本と、製品ごとの選択

パデュー大学の講義資料にある工程を、以下に示します [5] 事実 。これは工程を理解するための基本形です。使うレジストや次の加工によって、PEB・ハードベーク・安定化処理の要否や条件は変わります。図2では、検査して次の加工へ進むところまでをまとめています 解説 。

1. **脱水ベーク**（150〜200 ℃、真空または窒素中）
2. **密着剤の処理**（HMDS）
3. **レジストの塗布**（回転塗布など）
4. **ソフトベーク**
5. **露光**
6. **露光後ベーク（PEB）**
7. **現像・リンス・乾燥**（現像液で不要部分を溶かし、洗い流す）
8. **ハードベーク**（必要な工程で実施）
9. **レジストの安定化**（必要に応じて実施）

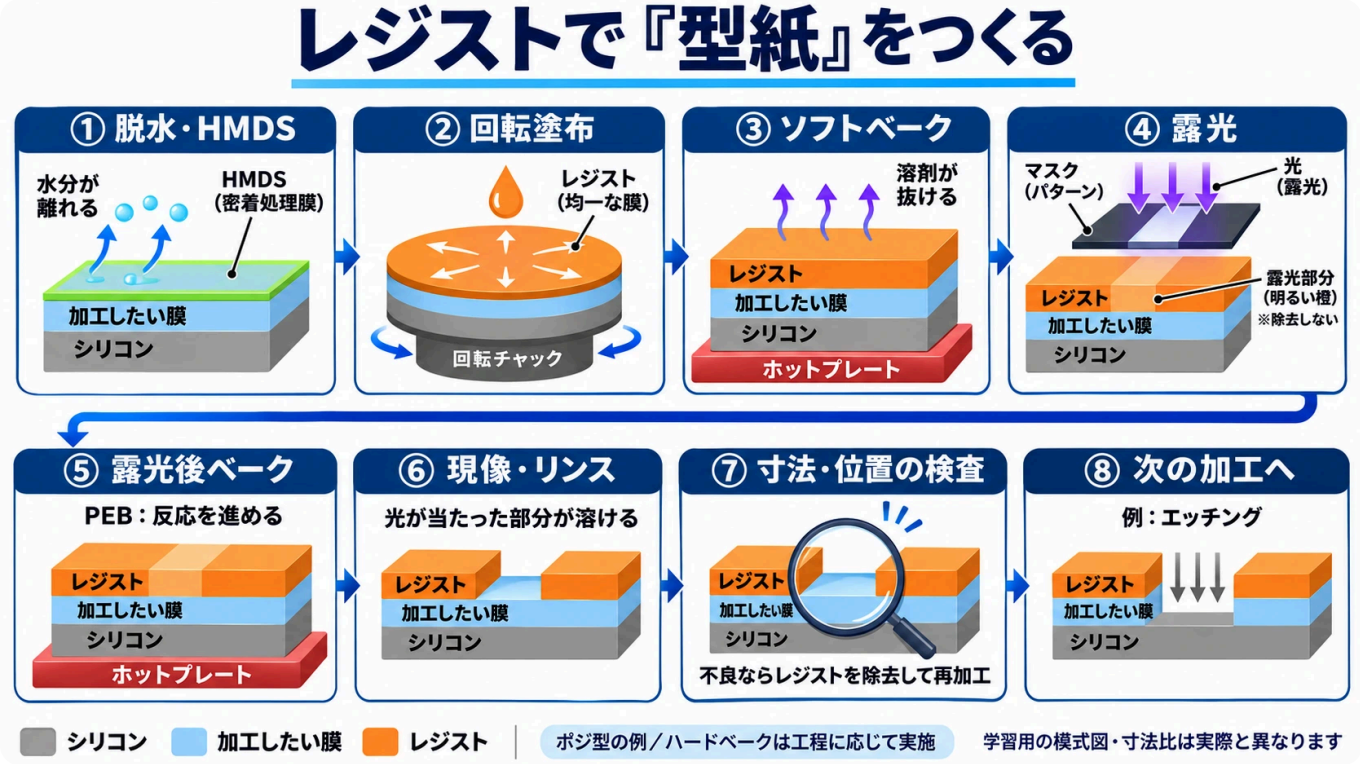


図2　レジスト工程の流れ — 型紙を作り、検査して次の加工へ（概念図）

図の読み方

④で光が当たっても、まだレジストは連続した膜です。⑤のPEBを経て、⑥の現像で溶けやすい部分が取り除かれ、初めて開口ができます（ポジ型の化学増幅レジストの例）。⑦で形と位置を検査し、⑧で残った型紙を使って下の膜を加工します。露光とエッチングは別の工程です。

ハードベークは、現像後の型紙を次の加工に耐えやすくするための選択工程です。MicroChemicalsの資料は、不要な場合も多く、加熱しすぎると形が丸まったり、後ではがしにくくなったりすると説明しています [51] 事実 。つまり「強く焼けばよい」わけではありません 解説 。

前処理 — 水をはじく表面にする

ノボラック樹脂のレジストは水をはじく性質（疎水性）で、ウェハの表面の酸化シリコンは水になじむ性質（親水性）です。このままではなじみが悪いので、**HMDS（ヘキサメチルジシラザン）**という密着剤で表面を処理します。オーブンの中で蒸気にして付ける方法があります [5] 事実 。

回転塗布 — 2倍速く回すと、膜は約1.4分の1

レジストは、ウェハの中央に垂らし、ウェハを高速で回して、遠心力で薄く広げます。スタンフォード大学の講義資料では、典型的に**毎分3,000〜6,000回転**で、厚さ**約0.5 μm**の膜になります [1] 事実 。

レジストのメーカーの技術資料によると、膜の厚さは、**回転数の平方根にほぼ反比例**します。回転数を2倍にすると、膜の厚さは**約1.4分の1**になります。塗布にかかるのは、ふつう**10〜20秒**です [31] 事実 。1.4は√2のことです 本稿の計算 。同じ資料は、レジストのほとんどは回転で飛ばされてしまい、ウェハに残るのは**ふつう数%しかない**とも書いています [31] 事実 。



シリコンウェハの上で回転塗布（スピンコート）しているフォトレジスト（Commonsの説明による）。
画像：Sei / Wikimedia Commons / CC BY-SA 4.0（掲載用に縮小・WebP化）

ベーク — 溶剤を飛ばし、模様をならす

塗ったばかりのレジストには溶剤が残っています。**ソフトベーク**では、ホットプレートで90〜100 ℃、30〜90秒ほど加熱し、残る溶剤を5%未満にします [5] 事実 。

露光の後の**露光後ベーク（PEB）**には、別の役目もあります。レジストの下の面で光が反射すると、レジストの中で入ってくる光と反射した光が重なり、**定在波**ができます。これがレジストの壁に縞模様を残します [1] 事実 。PEBで、光で変化した分子を少しだけ拡散させると、この縞がならされます [1] 事実 。化学増幅レジストでは、PEBが化学反応そのものを進める大事な工程になります（第6節） 解説 。

現像 — アルカリの水溶液で溶かす

ポジ型レジストの現像液には、**TMAH（水酸化テトラメチルアンモニウム）**の水溶液が使われます。レジストのメーカーの資料では、濃度は**2.38%**です [32] 事実 。IBMの伊藤は、もともとノボラック型のレジスト向けに最適化された**0.26 規定**のTMAHの現像液が、その後の新しいレジストにも「常に課されてきた」と書いています [9] 事実 。2.38%のTMAHは、計算するとほぼ0.26 mol/Lにあたります 本稿の計算 。パデュー大学の講義資料は、TMAHが使われる理由として、トランジスタの信頼性を下げるナトリウムやカリウムを含まないことを挙げ、温度は**1 ℃以内**に管理する必要があるとしています [5] 事実 。

黄色い部屋

リソグラフィの部屋は、黄色やオレンジ色の照明になっています。レジストが、波長の短い光で反応してしまうのを防ぐためです（下の写真のCommonsの説明による） 事実 。



ロンドン・ナノテクノロジーセンターのクリーンルームの中のフォトリソグラフィ室。フォトレジストが波長の短い光で反応しないよう、オレンジ色の照明になっています（Commonsの説明による）。研究用の施設です。
画像：UCL Faculty of Mathematical & Physical Sciences (Photo: O. Usher) / Wikimedia Commons / CC BY 2.0（掲載用に縮小・WebP化）

失敗したら、やり直せる

リソグラフィの工程には、ほかの工程にない特徴があります。レジストの形がうまくできなかったら、**レジストをはがして、やり直せる**のです。半導体の会社の特許は、線の幅が規格から外れたり、下の層との位置がずれたりしたときに、ウェハを捨てるより、レジストを**やり直す（リワーク）**ほうが経済的に望ましいと書いています [35] 事実 。エッチングで削ってしまった後では、もう戻せません。だから、現像の後に寸法と位置を検査します 解説 。

4. 技術編③ — 光の性質が、線の細さを決める

小さな穴を通った光は、広がる

光は波です。スタンフォード大学の講義資料は、穴の大きさが光の波長くらいになると、光は穴を通った後で広がり、**穴が小さいほど大きく広がる**と説明しています [1] 事実 。これが**回折**です。高校の物理で習う、ヤングの実験や回折格子と同じ現象です 解説 。

回路の模様は、細い線とすき間が規則正しく並んだ、回折格子のようなものです。パデュー大学の講義資料は、間隔（ピッチ）pの格子に光が当たると、次の角度αの向きに回折した光が出ると書いています [2] 事実 。

$$\sin\alpha = \lambda / p$$

そして、像を作るには、**少なくとも2つの次数の回折光**をレンズで集める必要があります（アッベの考え方） [2] 事実 。模様が細かい（pが小さい）ほど、回折光は大きな角度に広がります。大きく広がった光を集められなければ、模様は像になりません 解説 。

レンズの「受け止める力」 — 開口数（NA）

レンズがどれだけ広い角度の光を集められるかを表すのが、**開口数（NA）**です。講義資料は、NA ＝ n sin α（nはレンズとウェハの間の物質の屈折率、αは集める光の最大の角度）と定義し、**回折した光を集めるレンズの能力**を表すとしています [1] 事実 。パデュー大学の講義資料は、レンズとウェハの間が空気なら、NAの物理的な上限は1で、実用上の限界は**約0.93**（集める角度68°、レンズは**約1,000 kg**）だとしています [2] 事実 。

物理のツボ①：レイリーの式 — 描ける線の細さを計算する

描ける線の細さ（解像度R）は、次の式で表されます。**レイリーの式**と呼ばれます [1][13] 事実 。

$$R = k_1 \times \lambda / NA$$

λは光の波長、NAは開口数、k_1は装置やレジスト、工程の工夫で決まる係数です。スタンフォード大学の講義資料は、1999年当時のk_1を**0.6〜0.8**としています [1] 事実 。MITリンカーン研究所の2003年の論文は、より進んだデバイスでは**0.4**とし、等間隔の線とすき間では、回折で決まる**単一露光の等間隔ライン・スペースでk_1の下限は0.25**だと書いています [6] 事実 。

資料の例：講義資料は、KrF（248 nm）でNA 0.6の装置なら、k_1 ＝ 0.75で、解像度は**約0.3 μm**になると書いています [1] 事実 。

計算してみる：ArF（193 nm）で、空気中の実用上の限界NA 0.93の装置を使うとします 本稿の計算 。

- k_1 ＝ 0.3なら：0.3 × 193 ÷ 0.93 ≒ **約62 nm**
- k_1 ＝ 0.25（下限）なら：0.25 × 193 ÷ 0.93 ≒ **約52 nm**

パデュー大学の講義資料も、この条件で52 nmを、空気中の193 nmの装置の解像度の限界としています [2] 事実 。実際に、ASMLの空気中のArFの装置NXT:1470の解像度は「57 nm以下」です [19] 事実 。この限界を超えるために、レンズとウェハの間に**水**を入れたのが液浸露光です。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**NA 1.35**に達したとしています [15] 事実 。液浸露光は3-6で扱います。

物理のツボ②：細かく描くほど、ピントが浅くなる

レイリーは、ピントの合う範囲（**焦点深度、DOF**）の式も示しました [1] 事実 。

$$\mathrm{DOF} = \pm k_2 \times \lambda / \mathrm{NA}^2$$

NAが2乗で効くので、NAを大きくして細い線を描こうとすると、焦点深度は急に浅くなります 解説 。講義資料の例では、KrF・NA 0.6・k_2 = 0.5で**約±0.35 μm**です [1] 事実 。

計算してみる：ArF（193 nm）・NA 0.93・k_2 = 0.5なら、0.5 × 193 ÷ 0.93^2 ≒ **約±0.11 μm（110 nm）**です 本稿の計算 。ピントの合う厚さは、ウェハの表面の上下わずか0.1 μmほどしかありません。ウェハのわずかな反りや、下の層の段差も問題になります。前工程のどこかでウェハを平らにするCMP（3-11）が欠かせない理由の一つです 解説 。

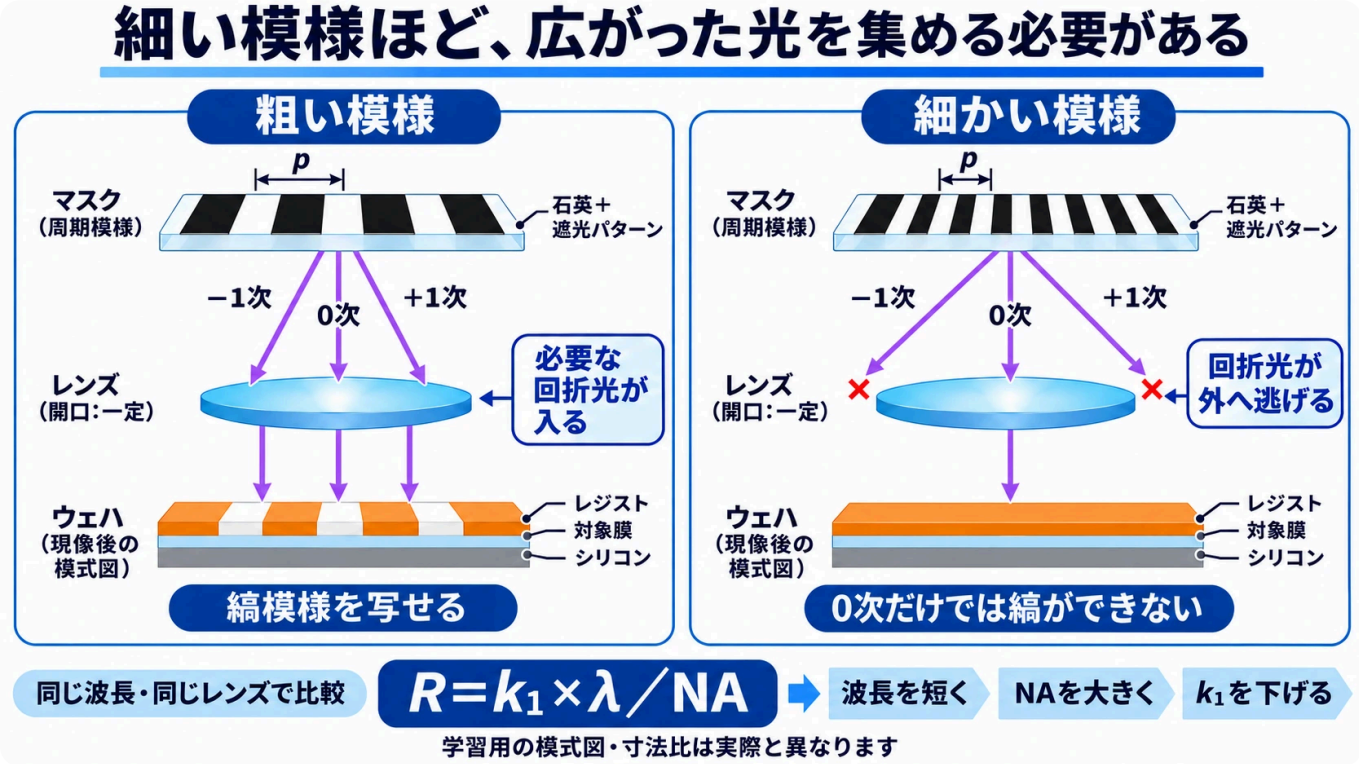


図3　回折とレンズ ― 細かい模様を写すには、広がった光も必要（概念図）

図の読み方

左は粗い模様、右は細かい模様です。模様が細かいほど光は大きな角度に曲がり、レンズで受け止めきれなくなります。受け止められる角度の広さがNAです。下の囲みは、細い線を描くための3つの方向を示しています。

Rは、その露光条件で転写できる代表的なパターン寸法の目安です。**「2 nm世代」などの製造プロセス名と、そのまま同じ数字になるわけではありません。**また、ここでのDOFは焦点位置から上下それぞれの許容幅を±で示しており、全幅はその2倍です 解説 。

- **波長を短くしてきた歴史**

レイリーの式からわかるとおり、細い線を描くいちばん素直な方法は、**波長を短くする**ことです。露光に使う光は、次のように変わってきました [1][14][25] 事実 。

光源	波長	何から出る光か	量産で使われた目安
g線	436 nm	水銀ランプ（青い光）	1980年代、約0.8 μm（4MビットDRAM）
i線	365 nm	水銀ランプ（紫外線）	1990年代前半から、0.5 μm未満・0.35 μm
KrF	248 nm	フッ化クリプトンのエキシマレーザー	1990年代後半、0.25 μm
ArF	193 nm	フッ化アルゴンのエキシマレーザー	1990年代末から
EUV	13.5 nm	スズのプラズマ	3-7で扱います

事実 （[1][14][25]による。量産の目安は日本半導体歴史館の資料 [25] による）

ASMLは、最初の装置はg線で約1 μmまで描けたと書き、i線の装置は1 μmより細く、**最終的に220 nm**まで描けるようになったとしています。そして、ArFで**38 nm**の線を描けるようになったと書いています（38 nmは液浸の装置の値です） [14][19] 事実 。

MITリンカーン研究所の論文によると、描く線の最小寸法が光の波長より小さくなったのは、**1996年ごろ**です [6] 事実 。そこからは、「光の波長より細い線を描く」時代が続いています 解説 。

5. 技術編④ — 露光装置：縮小して、つなげて写す

- **密着、近接、そして投影へ**

スタンフォード大学の講義資料は、露光の方式を3つに分けています [1] 事実 。

- **密着露光**：マスクをレジストに押し付ける。接触によるごみ・傷のリスクがあり、**先端ロジックの量産では投影方式が主流**。ただし、研究・MEMS・先端パッケージなどではマスクアライナーが現在も使われる [52]
- **近接露光**：マスクとレジストの間にすき間を空ける。**数μmより細い線は描きにくい**
- **投影露光**：レンズでマスクの像を写す。解像度が高く欠陥も少ないので、**今の主流**

近接露光の限界は、すき間をgとして、$W_{min} \fallingdotseq \sqrt{(\lambda g)}$ で表されます。講義資料は、g ＝ 10 μmでi線を使うと、約2 μmになるとしています [1] 事実 。



フランスの研究所LAAS-CNRSにある2台のマスクアライナー（左：MA-6、右：MJB-3）。マスクをウェハに密着または近接させて露光する装置で、黄色い照明の下にあります（Commonsの説明による）。大学や研究所の試作で今も使われますが、先端のチップの量産では使われません。
画像：Guillaume Paumier (user:guillom) / Wikimedia Commons / CC BY-SA 3.0（掲載用に縮小・WebP化）

ステッパー — 縮小して、繰り返し焼く

最初の投影露光の装置は、米国のPerkin-Elmerが出した**等倍**の装置でした。その後の**ステッパー**は、ほとんどが**2〜5倍に縮小**する装置になりました。縮小すると、マスクが作りやすくなり、レンズが完璧である必要がある範囲も狭くなります [1] 事実 。ステッパーは、ウェハの上の1区画（ショット）を焼いたら、ステージを動かして隣の区画を焼く、を繰り返します（step and repeat） 解説 。

日本では、ニコンが**1980年**に国産初のステッパー（NSR-1010G、解像度1.0 μm）を出荷し、**1984年**に世界初のi線ステッパーを出したとしています [22] 事実 。キヤノンも1984年にステッパーを発売しました。日本半導体歴史館の資料によると、**1995年ごろには、ニコンとキヤノンの2社で露光装置の市場の70〜80%**を占めていました。その背景には、富士通・東芝・日立・NECなど日本の半導体メーカーがDRAMの市場を支配していたことがあったとしています [24] 事実 。



i線（波長365 nm）を使うステッパー「AutoStep」。研究施設のクリーンルームに置かれたものです（Commonsの説明による）。量産の工場の最新の装置とは違います。
画像：a13ean / Wikimedia Commons / CC BY-SA 3.0（掲載用に縮小・WebP化）

スキャナー — スリットで、なぞって焼く

今の主力は、**スキャナー**（step and scan）です。マスクの全体を一度に照らすのではなく、細い**スリット**状の光で照らし、マスクとウェハを**逆向きに**動かしながら、少しずつなぞって焼きます。像が縦・横とも4分の1になる装置では、像の反転に合わせて逆方向に走査し、**マスクはウェハの4倍の距離を、4倍の速さで動く**関係になります。倍率をそろえて像の流れを止めるためです 解説 。

日本半導体歴史館の資料によると、スリットで露光するので、**レンズの直径はステッパーの約0.7倍**で済み、走査する向きには広い範囲を焼けます。ニコンは**1995年**、KrFのスキャナー（NSR-S201A、NA 0.6、解像度0.25 μm）をIBMに納め、ASML、キヤノンが続きました [26] 事実 。ニコンは、これを世界初のスキャナーとしています [22] 事実 。同じ資料は、レンズのNAが、ステッパーの0.65から、スキャナーでは**0.8を超えた**と書いています [25] 事実 。

今の装置の1区画の大きさは、**26 mm × 33 mm**、縮小率は**4分の1**、マスクは**6インチ**の大きさです（ニコンとキヤノンの仕様） [20] [23] 事実 。ASMLは2000年に、ウェハの計測と露光を2つのステージで同時に行う**TWINSCAN**を出しました [17] 事実 。

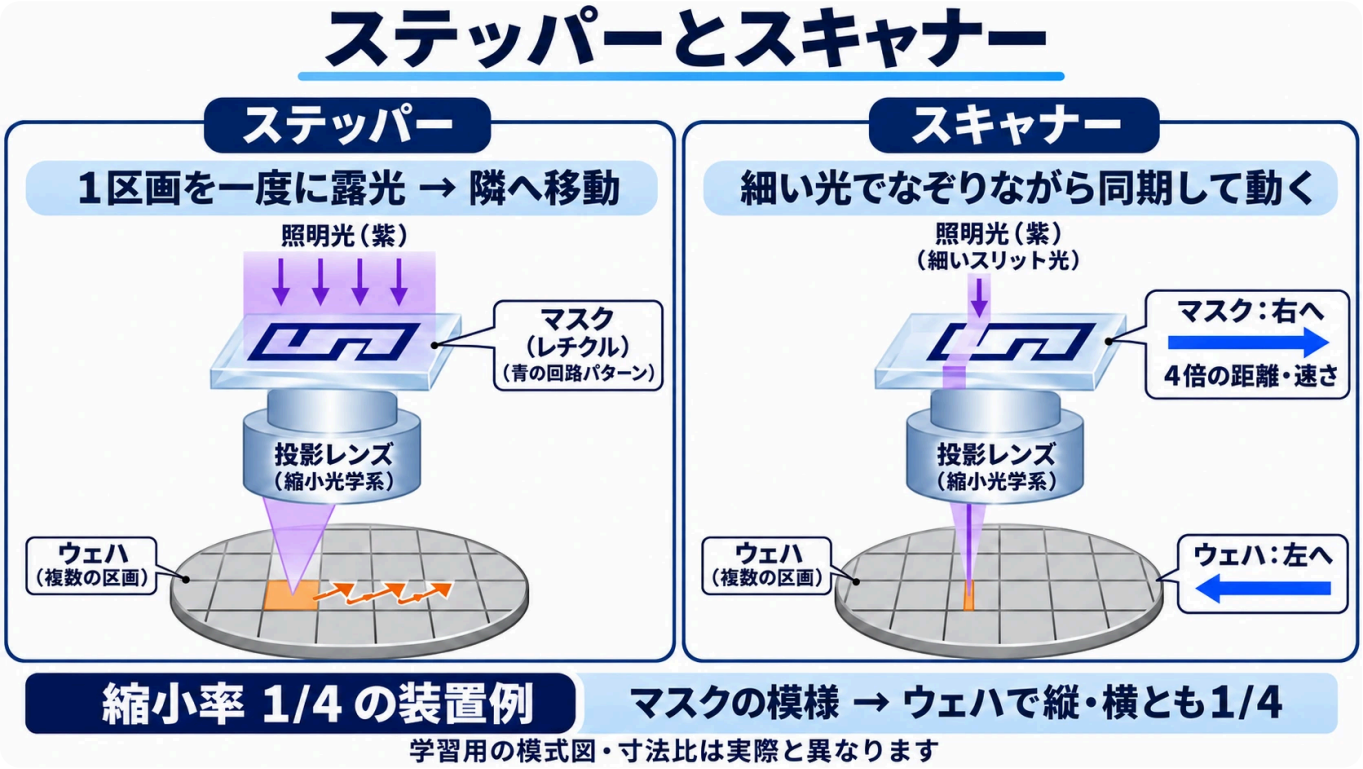


図4　ステッパーとスキャナー — 一度に写すか、なぞって写すか（概念図）

図の読み方

左のステッパーは、1区画ぶんをまとめて焼いてから隣へ移ります。右のスキャナーは、細いスリットの光でマスクとウェハを逆向きに動かし、なぞるように焼きます。像は4分の1に縮小されるので、マスクはウェハの4倍の距離を動きます。

今の装置の性能

今売られている装置の仕様を、いくつか並べます。k_1は、$R = k_1 \lambda / NA$を変形して、$k_1 = R \times NA \div \lambda$で計算しました。

装置	光源（波長）	NA	解像度	処理能力（枚/時）	k_1（本稿の計算）
ASML XT:400M	i線（365 nm）	0.65	350 nm以下	245以上	約0.62
キヤノン FPA-5550iZ2	i線（365 nm）	0.57〜0.45	350 nm以下	公表なし	約0.55
ASML XT:860N	KrF（248 nm）	0.80	110 nm以下	260以上	約0.35
ASML XT:1460K	ArF（193 nm）、空気中	0.93	65 nm以下	205以上	約0.31
ASML NXT:2100i	ArF（193 nm）、液浸	1.35	38 nm以下	295	約0.27
ニコン NSR-S636E	ArF（193 nm）、液浸	1.35	38 nm以下	280以上	約0.27

事実 （仕様は各社の製品ページ [19][20][23] による。k_1の列は本稿の計算。キヤノンのk_1は最大のNA 0.57で計算）

最新の液浸の装置では、k_1が**0.27**まで下がり、理論の下限0.25のすぐ近くまで来ています 本稿の計算 。1時間に約300枚、1枚あたり約12秒で、ウェハ全面の何十もの区画を焼いている計算になります 本稿の計算 。

重ね合わせ — 前の層にぴったり重ねる

チップは何十もの層を重ねて作るので、新しい層の模様を、**前の層にぴったり重ねる**必要があります。この精度を**重ね合わせ精度（オーバーレイ）**といいます [18] 事実 。

IRDSの2022年版は、最先端のロジックで求められる重ね合わせ精度（3σ）を、2022年に**2.4 nm**、2025年に**2.0 nm**、2028年に**1.6 nm**としています [28] 事実 。ニコンの最新の液浸の装置は、同じ機種どうしの重ね合わせ精度を**2.1 nm以下**としています [20][21] 事実 。2 nmは、シリコンの原子でいえば10個ほどの並びの長さです 推測 （シリコンの原子の間隔を約0.2〜0.3 nmとした目安）。

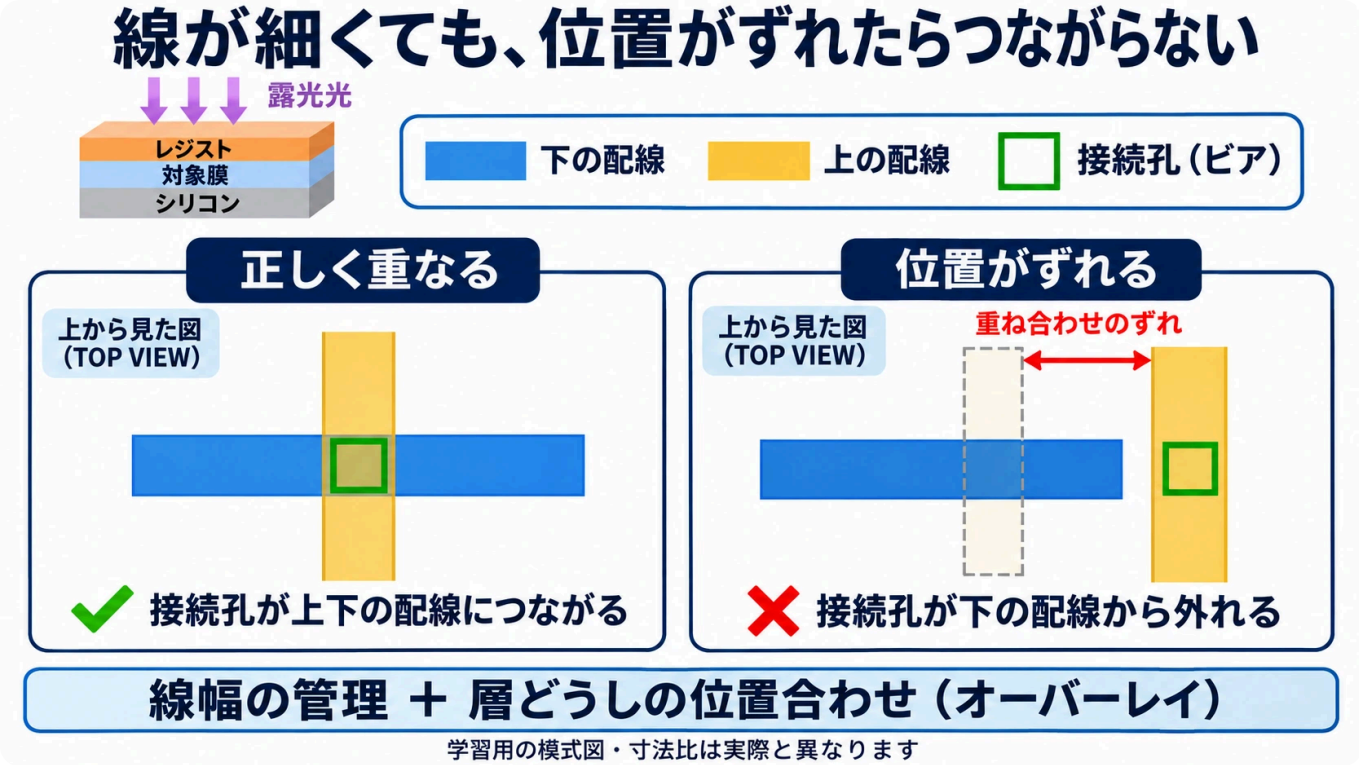


図5　重ね合わせ — 線が細くても、位置がずれたらつながらない（概念図）

図の読み方

青は下の配線、黄色は上の配線、四角は両者をつなぐ接続孔（ビア）です。左は接続孔が上下の配線に重なります。右はずれを大きく誇張しており、上の配線と接続孔が右へずれて、孔が下の配線から外れています。これは位置ずれでつながらなくなる例です。**線幅を狙いどおりに作ることと、前の層に位置を合わせることは、別々に管理する必要があります** [18] 解説 。

6. 技術編⑤ — レジストの化学：光が足りない時代の発明

DNQ・ノボラック — g線・i線のレジスト

g線とi線のレジストには、**ジアゾナフトキノン（DNQ）**と**ノボラック樹脂**を組み合わせたものが使われてきました [1] 事実 。DNQは、光が当たると現像液に溶ける**カルボン酸**に変わります [1] 事実 。パデュー大学の講義資料は、ノボラック樹脂だけなら現像液に約5 nm/秒で溶けるのに、DNQを混ぜて光を当てない部分は**約0.5 nm/秒**、光を十分に当てた部分は**約500 nm/秒**で溶けると書いています [5] 事実 。光を当てたところと当てないところで、**溶ける速さが約1,000倍**違うのです 本稿の計算 。

KrFの壁 — 光が弱すぎる

ところが、波長248 nmのKrFでは、この方式がうまくいきません。IBMの伊藤は、ノボラックとDNQのレジストは、深い紫外線（deep-UV）の領域で光を**吸収しすぎる**ので、十分な性能が出ないと書いています [8] 事実 。さらに、日本半導体歴史館の資料によると、KrFの光源の明るさは小さく、レジストには**g線・i線の約10倍の感度**が求められました [27] 事実 。

スタンフォード大学の講義資料は、g線・i線のレジストは、光子1個あたりの反応の効率（量子効率）が**1未満で、ふつう約0.3**だと書いています [1] 事実 。これは多数の光子で平均した値です。光子1個が分子の一部分だけを変える、という意味ではありません。これでは、弱い光では間に合いません 解説 。

化学増幅 — 光で酸を作り、酸に仕事をさせる

この壁を破ったのが、IBMの**伊藤洋、C. グラント・ウィルソン、ジャン・フレシェ**による**化学増幅レジスト**です。伊藤によると、化学増幅の考え方は**1980年に提案され、1982年に報告**されました [8] 事実 。3人の米国特許は1982年8月に出願され、**酸で分解しやすい保護基（t-ブチル基）を持つ樹脂**と、**光で酸を出す物質**を組み合わせたレジストを示しています [10] 事実 。

しくみは次のとおりです [1][11] 事実 。

1. 光が当たると、**光酸発生剤（PAG）**が**酸**を出す
2. 露光後ベーク（PEB）で温めると、酸が樹脂の**保護基を外す**（脱保護）。保護基が外れた樹脂は、アルカリの現像液に溶けるようになる
3. このとき、**酸は反応の中で再生され**、次の保護基を外しに行く

日本国際賞の財団の解説によると、半導体の製造に初めて使われた化学増幅レジストは、**t-ブトキシカルボニル（tBOC）基**を酸で外して**ポリヒドロキシスチレン**にする樹脂でした [11] 事実 。

光で生まれた酸が触媒として再生され、繰り返し反応を促します。テキサス大学のウィルソンの研究室は、触媒としての酸の連鎖の長さは、**数百回の反応**に達することがあると書いています [12] 事実 。光の「1」を、化学の力で「数百」に増やす — これが「増幅」の意味です 解説 。

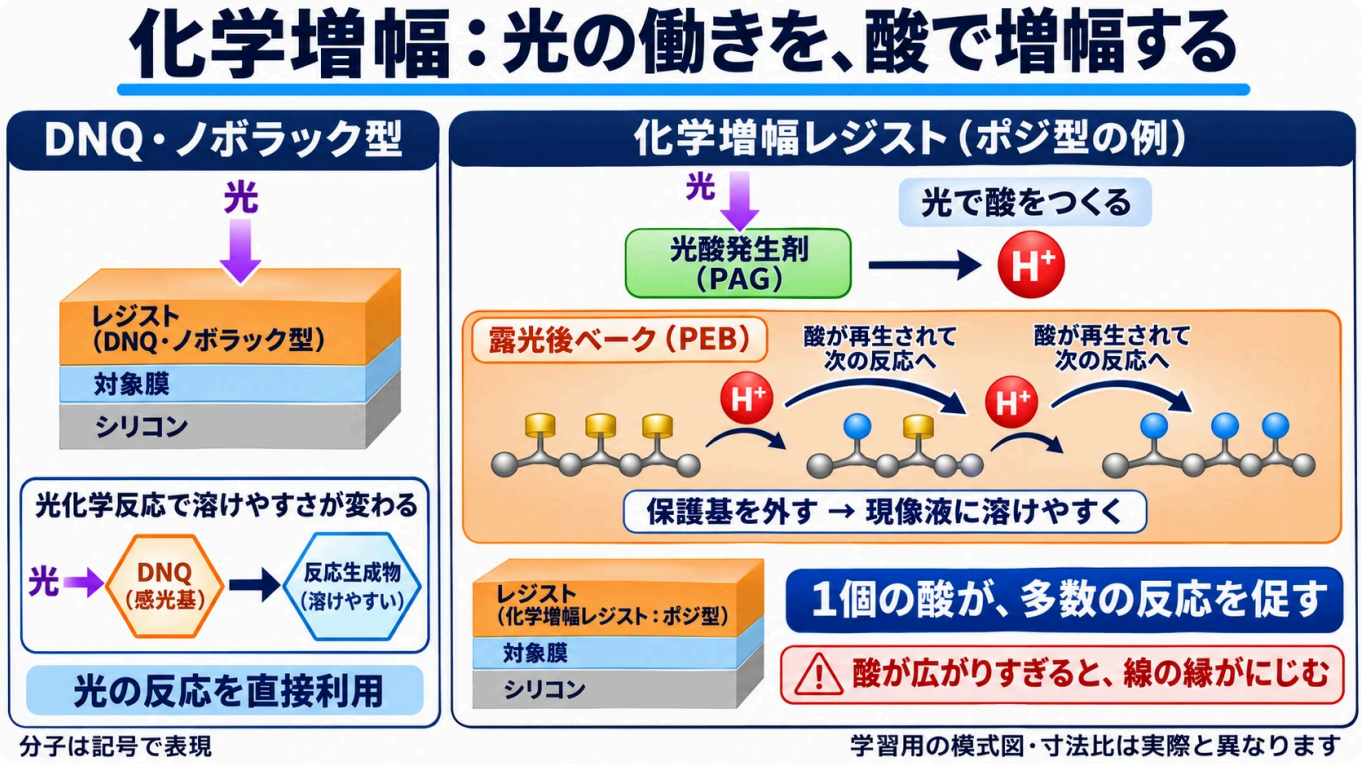


図6　化学増幅レジスト — 酸が繰り返し反応を促す（概念図）

図の読み方

左は光の反応を直接使う方式、右は光で作った触媒をPEB中に繰り返し働かせる方式です。増えるのは「酸の個数」ではなく、1個の触媒が促す反応の回数です。すべての光子が必ず1個の酸を作るという意味ではありません。分子の形は記号です。

伊藤は、化学増幅は報告された当時は「**実験室の珍しいもの**」と見られていたが、その価値はすぐに明らかになり、1980年代半ばには、IBMで**1メガビットのDRAM**の量産にdeep-UVのリソグラフィで使われたと書いています [8] 事実 。日本でも、東京応化工業が1997年にKrF用の化学増幅レジストを開発し、JSRも2000年にIBMと共同で開発しました [27] 事実 。ウィルソンとフレシェは、この業績で2013年に日本国際賞を受けています [11] 事実 。

増幅の代償 — 酸のにじみと、空気の汚れ

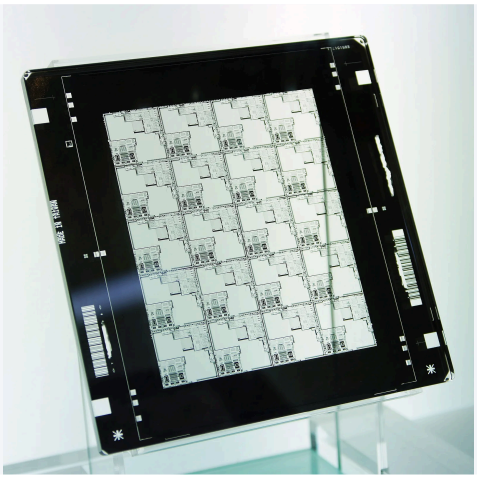
化学増幅には、弱点もあります。ウィルソンの研究室は、酸が露光していない部分まで動くと、**感度と像の忠実さの間にトレードオフ**が生じ、線が細くなっても、**酸の拡散の距離はおよそ同じまま**だと書いています [12] 事実 。パデュー大学の講義資料は、酸の拡散の長さが解像度を制限することと、**空気中のアンモニアのような塩基性の汚れ**に弱く、塗布・現像の装置を囲う必要があることを挙げています [5] 事実 。日本半導体歴史館の資料も、空気中のわずかな塩基性の物質で感度が変わるので、**化学フィルター**の重要性が増したと書いています [25] 事実 。

それでも、化学増幅レジストは主役であり続けています。パデュー大学の講義資料は、2016年の講義で、**248 nm以下の量産用レジストを化学増幅型として説明**しています [5] 事実 。ただし、これは当時の主要技術の整理です。後述の金属酸化物型などもあるため、現在の短波長用レジストを例外なく同じ反応方式だと考えるのは適切ではありません 解説 。IRDSの2023年版は、化学増幅レジストが**少なくとも1 nm世代のロジックまで主役であり続ける**との見通しを示しています [29] 未確定／将来 。

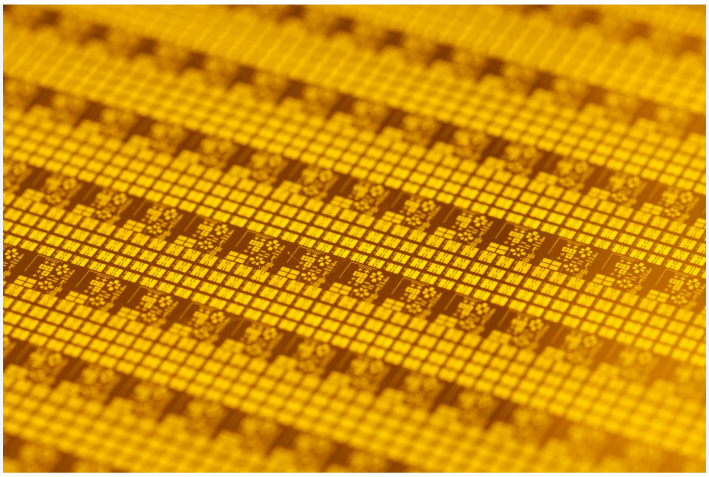
7. 技術編⑥ — マスクと、k_1を下げる工夫

マスク — 石英の板とクロムの膜

マスク（縮小投影で使うものは**レチクル**とも呼びます）は、透明な**石英ガラス**の板に、光をさえぎる**クロム**の膜で回路の模様を描いたものです [2] 事実 。4倍に拡大した模様を描くので、ウェハの上の線よりは太いものの、それでも極めて細かい模様です 解説 。



半導体用のフォトマスク。同じ回路の模様が格子状に繰り返し並び、周りに位置合わせ用の印が置かれています（Commonsの説明による）。
画像：Peellden / Wikimedia Commons / CC BY-SA 3.0（掲載用に縮小・WebP化）



クロム（Cr）のフォトマスクの細かい模様を、斜めから拡大して撮影したもの（Commonsの説明による）。黄色い照明の下で撮られています。
画像：Sei / Wikimedia Commons.JPG) / CC BY-SA 4.0（掲載用に縮小・WebP化）

ペリクル — ごみを「ピンぼけ」にする

マスクの上にごみが1つ乗ると、それがすべてのチップに写ってしまいます。そこでマスクには、**ペリクル**という薄い透明な膜を、マスクの表面から少し離して張ります。IBMの1977年出願の特許は、厚さ0.2〜6 μmの透明な膜を、マスクの表面から約1〜125 mm離して置けば、膜の上に乗ったごみは**ピントが合わず、写らない**と説明しています [33] 事実 。焦点深度が浅いことを、逆に利用した工夫です 解説 。

位相シフトマスク — 光の波を、わざと逆さにする

1982年、IBMのレベンソンらは、**隣り合う穴を通る光の位相を180°ずらす**と、2つの像の間で光が打ち消し合い、像の間が暗くなると発表しました [34] 事実 。これが**位相シフトマスク**です。パデュー大学の講義資料は、位相シフトマスクは「**解像度ではなく、コントラストを上げる**」ものだとし、光を一部だけ通す材料（MoSi）で位相を180°ずらす**ハーフトーン型**が、今の主流の技術だとしています [3] 事実 。

位相を180°ずらすには、光が石英の中を進む距離を、空気中より半波長ぶん長くすればよいのです。講義資料は、193 nmの光では、石英を（$\lambda/2$）÷（1.56 − 1）≒ **172 nm**掘ればよいと計算しています [3] 事実 。

OPC — 「わざとゆがめた」模様を描く

回折のために、マスクの模様はそのままの形では写りません。角が丸くなり、線の端が縮みます。そこで、あらかじめ**マスクの模様をゆがめておく**のが、**光近接効果補正（OPC）**です。MITリンカーン研究所の論文は、角に飾りを付けたり、線の端をハンマーの頭の形にしたり、像を結ばない細い補助の線を置いたりする方法を紹介しています [7] 事実 。ASMLは、OPCを照明の形の最適化と組み合わせることが多いとしています [16] 事実 。

照明の形を工夫する方法（**斜入射照明**）は、パデュー大学の講義資料によると、k_1を下げる工夫の中で**いちばん簡単で安い**方法です [3] 事実 。斜めから光を当てると、片側の高い次数の回折光までレンズに入るようになります [1] 事実 。

1回の露光の限界、その先へ

こうした工夫を重ねても、1回の露光には限界があります。ITRSの2011年版は、**1回の光の露光は、ハーフピッチ40 nmで限界に達した**と書いています [30] 事実 。パデュー大学の講義資料も、1回の処理でのk_1の実用上の限界を0.25とし、2回に分ければ0.2未満にできるとしています [4] 事実 。その先を切り開いたのが、液浸露光と、何回かに分けて露光する**多重パターニング**（3-6で扱います）、そして波長13.5 nmの**EUV**（3-7で扱います）です 解説 。

8. 産業編① — 露光装置：ASMLと、日本の2社

ASML — 売上の9割超

露光装置で圧倒的なのは、オランダの**ASML**です。1995年ごろにニコンとキヤノンで70〜80%を占めていた（第5節） [24] 市場は、30年で大きく塗り替わりました 解説 。経済産業省が2025年12月にまとめた資料では、露光装置（市場規模3兆5,561億円）の会社別のシェアは、**ASMLが91%、キヤノンが4%**です（グローバルネット社の資料をもとに経済産業省が作成。何年の数字かは資料に書かれていません） [39] 事実 。同じ資料は、日本は「**マーケットサイズが大きい露光装置、薄膜形成、エッチングでシェアを取れていない**」と書いています [39] 事実 。

ASMLの2025年の年次報告によると、同社が2025年に売った露光装置の台数と売上は次のとおりです [36] 事実 。

種類	台数	売上（百万ユーロ）
EUV（High-NAのEXE）	4	1,156.9
EUV（NXE）	44	10,445.8
ArF液浸	131	10,311.4
ArF（空気中）	16	427.0
KrF	78	1,001.3
i線	54	307.3

事実 （[36]の「Net system sales per technology」の表から。計測・検査装置を除く）

台数ではArF液浸がいちばん多く、売上ではEUVとArF液浸がほぼ並んでいます 解説 。1台あたりの平均の売上は、ArF液浸で約7,900万ユーロ、i線で約570万ユーロです 本稿の計算 。同じ報告書によると、2025年の売上の**29.1%**が中国の顧客向けでした（2024年は36.1%） [36] 事実 。

ニコンとキヤノン — i線とKrFで生きる

日本の2社は、主に**i線とKrF**の装置を売っています。

- **キヤノン**は、2025年に露光装置を**234台**（KrF 46台、i線188台）売りました。**先端パッケージで業界標準となっている後工程向けの装置**や、メモリ向けの装置が中心だったとしています [38] 事実 。
- **ニコン**は、2026年3月期に露光装置を**27台**（中古を含む。i線など20台、KrF 4台、ArF 3台）売りました [37] 事実 。

台数で見ると、キヤノンのi線の188台は、ASMLのi線の54台の3倍を超えます 本稿の計算 （期間は、キヤノンとASMLは2025年の暦年）。i線の装置は、パワー半導体や先端パッケージなど、極端に細い線が要らない工程で今も大量に使われています（[38]） 事実 。ASMLも2025年に、先端パッケージや3D向けのi線の装置「XT:260」を初めて出荷しました [40] 事実 。「古い」光源の装置が、AI時代の先端パッケージで活躍しているのです 解説 。



米国のHP研究所のリソグラフィ室。i線（365 nm）の露光装置と、レジストの塗布・現像を自動で行うウェハトラックが並び、部屋は黄色い照明になっています（Commonsの説明による）。研究所の設備です。
画像：Alison Chaiken / Wikimedia Commons / CC BY-SA 3.0（掲載用に縮小・WebP化）

9. 産業編② — 露光装置の「相棒」と、材料の会社

● 塗布・現像装置 — 東京エレクトロンが85%

レジストを塗り、焼き、現像する装置（**塗布現像装置**、コータ／デベロッパ）は、露光装置とつながって動きます。中国の装置メーカー芯源微は、塗布現像装置を**「半導体の製造ラインで、露光装置とつながって動く唯一の装置」**と書いています [41] 事実 。

経済産業省の資料では、塗布現像装置（市場規模4,183億円）のシェアは、**東京エレクトロンが85%**、ドイツのSÜSS MicroTecが6%、中国の芯源微（KINGSEMI）が5%です（グローバルネット社の資料をもとに作成） [39] 事実 。東京エレクトロンは、統合報告書2026で、塗布・現像で**1位、EUV露光用の塗布現像装置のシェアは100%**としています（いずれも同社推定） [42] 事実 。同社の新しい塗布現像装置は、従来と比べて、**レジストの塗布による欠陥を50%以上**減らしたとしています（同社試算） [42] 事実 。

芯源微は、塗布現像装置の市場は海外のメーカーが長く独占し、中国では**国産化の率がまだ低い「首根っこを押さえられた」分野**の一つだと書いています [41] 事実 。

● フォトレジスト — 日本の会社で78%

経済産業省の資料では、フォトレジストの売上の**日本の会社のシェアは77%（2021年）、78%（2023年）**です。フォトマスク用のレジストは65%（2023年）です（富士経済の資料をもとに経済産業省が作成） [39] 事実 。

東京応化工業は、統合報告書2026で、2025年の出荷数量で、同社のレジストのシェアを次のように示しています（富士キメラ総研の資料による） [43] 事実 。

レジストの種類	東京応化のシェア	順位	市場の伸び（2025→2031年の年率）
EUV用	29.3%	世界1位	28.2%
ArF用	14.4%	世界4位	7.4%
KrF用	33.3%	世界1位	6.1%
g線・i線用	25.3%	世界1位	3.8%

事実

同社は、2025年の半導体用フォトレジストの市場を**30億8,100万ドル**（前年比12.7%増、SEMIの集計をもとに同社が算出）とし、同社の全体のシェアを**26.1%**としています [43] 事実 。**信越化学**は、統合報告書2025で、フォトレジストで**世界2位**としています（数字の出典は示されていません） [44] 事実 。

環境への配慮も、新しい競争の軸です。ドイツのMerckは、**PFAS（有機フッ素化合物）を使わない**i線とKrFのレジストの開発を終え、サンプルの出荷を始めたとしています [45] 事実 。**富士フイルム**も、PFASを一切使わないネガ型のArF液浸レジストを開発し、ベルギーの研究機関imecと、28 nm世代の配線を高い歩留まりで作れることを確かめたとしています [46] 事実 。

マスクの材料 — ブランクスとペリクル

マスクのもとになる、クロムなどの膜を付けた石英の板を**マスクブランクス**といいます。**HOYA**は、統合報告書2025で、マスクブランクスで「**非常に高い市場シェアをほこる**」としています（2024年度の推定シェアは円グラフで示され、数字は書かれていません） [47] 事実 。信越化学は、フォトマスクブランクスで**世界2位**としています [44] 事実 。

ペリクルでは、**三井化学**が**1984年**にペリクルを発売し、2021年にはASMLからライセンスを受けて、**世界に先駆けてEUV用のペリクルの商業生産**を始めたとしています [48] 事実 。

一方、経済産業省の資料では、マスクそのもの（**フォトマスク**）の日本の会社のシェアは、**22%（2021年）から19%（2023年）**に下がっています [39] 事実 。マスクに模様を描く**描画装置**（市場規模1,679億円）は、オーストリアのIMS Nanofabricationが49%、日本の**ニューフレアテクノロジー**が45%です [39] 事実 。

- **地域で見ると**

分野	強い会社（国）	数字	誰の数字か
露光装置	ASML（オランダ）	91%	経済産業省（グローバルネット社の資料をもとに作成） [39]
露光装置	キヤノン（日本）	4%、2025年に234台	経済産業省 [39]、同社 [38]
塗布現像装置	東京エレクトロン（日本）	85%、EUV用は100%	経済産業省 [39]、EUV用は同社推定 [42]
フォトレジスト	日本の会社全体	78%（2023年）	経済産業省（富士経済の資料をもとに作成） [39]
フォトレジスト	東京応化工業（日本）	26.1%、EUV用29.3%	同社（富士キメラ総研の資料などをもとに） [43]
マスクの描画装置	IMS（オーストリア）、ニューフレア（日本）	49%、45%	経済産業省 [39]
フォトマスク	日本の会社全体	19%（2023年）	経済産業省 [39]

事実

買う側では、2025年の半導体製造装置の世界の販売額1,351億ドルのうち、**中国が493億ドル**で最大でした [49] 事実 。ASMLの売上の約3割も中国向けです [36] 事実 。

露光装置という「本体」はオランダのASMLがほぼ独占し、その周りの塗布・現像の装置、レジスト、マスクの材料で、日本の会社が大きなシェアを持つ — という構図です 解説 。一つの工程を、国をまたぐ多くの会社が分担して支えています 解説 。

10. これから求められること

- **k_1は、もう下がりきった**：最新の液浸の装置のk_1は約0.27で、下限0.25のすぐ近くです（第5節の計算）。これより細くするには、波長を13.5 nmに縮めるEUV（3-7）か、何回かに分けて露光する多重パターニング（3-6）が必要です 解説 。
- **重ね合わせは、さらに厳しく**：IRDSは、ロジックの重ね合わせ精度を、2028年に1.6 nmまで縮める道筋を示しています [28] 事実 。IRDSの2023年版は、模様の端の位置ずれの許容量のうち、**重ね合わせが40%**を占めるとしています [29] 事実 。
- **新しいレジスト**：IRDSは、化学増幅レジストが主役であり続ける一方で、**金属を含む新しいレジスト**も現れていると書いています [29] 事実 。JSRの子会社のInpriaは、金属酸化物のレジストを手がけています [50] 事実 。詳しくは3-7で扱います。
- **環境にやさしい材料**：PFASを使わないレジストの開発が進んでいます（[45][46]） 事実 。
- **先端パッケージでのリソグラフィ**：キヤノンのi線の装置や、ASMLのXT:260のように、パッケージの配線を描く露光の需要が伸びています（[38][40]） 事実 。

素材の技術者の出番

フォトリソグラフィは、**有機化学と高分子の技術者の活躍の場**です 解説 。

- **レジストの分子設計**：光酸発生剤、保護基、樹脂の組み合わせ。酸の動きすぎを抑える工夫（[12]）
- **PFASを使わない材料**：環境の規制に合わせた、新しい分子の開発（[45] [46]）
- **極めて高い純度**：金属の不純物や、塩基性の汚れを嫌う化学増幅レジストの品質管理（[25]）
- **マスクの材料**：石英の基板、クロムや位相シフトの膜、ペリクルの膜（[44] [47] [48]）

東京応化工業、JSR、信越化学、富士フイルム、HOYA、三井化学 — 日本の化学と材料の会社が、世界のリソグラフィを支えています。高分子の合成や、光化学の経験は、そのまま半導体の最前線につながります。

11. まとめと次回予告

視点	ポイント
工程	脱水・HMDS→回転塗布（2倍速で約1/1.4）→ソフトベーク→露光→PEB→現像（TMAH 2.38%）→検査→必要に応じてハードベークなど→次の加工。加工前ならレジストを除去してやり直せる
光学	回折：$\sin\alpha = \lambda/p$。$NA = n\sin\alpha$。$R = k_1\lambda/NA$、$DOF = k_2\lambda/NA^2$。k_1の下限0.25
波長	g線436→i線365→KrF 248→ArF 193 nm。1996年ごろから波長より細い線へ
装置	密着・近接→投影。ステッパー→スキャナー（1995年、ニコン→IBM）。1/4縮小、26×33 mm
レジスト	DNQ・ノボラック（g線・i線）→化学増幅（IBM、1980年提案）。酸1個が数百回働く
マスク	石英＋クロム。ペリクル、位相シフトマスク、OPC
産業	露光装置はASML 91%、塗布現像は東京エレクトロン85%、レジストは日本の会社で78%（経済産業省）
これから	k_1は限界近く→液浸・多重パターニング（3-6）、EUV（3-7）。重ね合わせ1.6 nmへ

次回は**3-6「フォトリソグラフィ（液浸・マルチパターニング）」**です。空気中のレンズの限界NA 0.93を、水を使って1.35まで引き上げた液浸露光と、1回では描けない細い線を、何回かに分けて描く多重パターニングを見ていきます。

12. 確認クイズ

1. ポジ型とネガ型のレジストの違いは何ですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> ポジ型は光が当たった部分が現像液に溶け、ネガ型は光が当たった部分が残ります。

2. レジストを塗る前に、HMDSで表面を処理するのはなぜですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> ノボラック樹脂のレジストは水をはじく性質で、酸化シリコンの表面は水になじむ性質なので、そのままではなじみが悪いからです。HMDSで表面を水をはじく状態にして、レジストの密着をよくします。

3. 回転塗布で、回転数を4倍にすると、膜の厚さはおよそ何分の1になりますか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 膜の厚さは回転数の平方根にほぼ反比例するので、√4＝2で、約2分の1になります。

4. ArF（193 nm）、NA 0.93、k1＝0.3の装置で描ける線の細さは約何nmですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> $R = k1 \times \lambda / NA = 0.3 \times 193 \div 0.93 \fallingdotseq$ 約62 nmです。

5. NAを大きくすると、焦点深度はどうなりますか。それはなぜ問題ですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 焦点深度はλ / NA^2に比例するので、NAを大きくすると急に浅くなります。ピントの合う範囲が狭くなるので、ウェハの反りや下の層の段差が問題になり、表面を平らにすることが大切になります。

6. スキャナーで、マスクがウェハの4倍の距離を動くのはなぜですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> マスクの像を4分の1に縮小してウェハに写すからです。マスクとウェハは逆向きに同期して動き、マスクの模様はウェハの上の像の4倍の大きさなので、マスクは4倍の距離を4倍の速さで動きます。

7. KrFの時代に、化学増幅レジストが必要になったのはなぜですか。

▼ 答えを見る

従来のDNQ・ノボラックのレジストは深い紫外線を吸収しすぎ、量子効率も約0.3と低いうえに、KrFの光源は明るさが小さく、g線・i線の約10倍の感度が必要だったからです。化学増幅レジストでは、光で生まれた酸1個が触媒として何百回も反応を起こすので、少ない光で済みます。

8. 化学増幅レジストの弱点を2つ挙げてください。

▼ 答えを見る

酸が露光していない部分まで拡散すると線の縁がにじみ、解像度が制限されること（感度と像の忠実さのトレードオフ）と、空気中のアンモニアなどの塩基性の汚れで酸が中和され、感度が変わってしまうことです。

9. ペリクルを、マスクの表面から少し離して張るのはなぜですか。

▼ 答えを見る

ペリクルの上に乗ったごみが、ピントの合わない位置にあるので、ウェハに写らないからです。焦点深度が浅いことを利用しています。

0. 露光装置、塗布現像装置、フォトレジストで、それぞれどこの国の会社が強いですか。

▼ 答えを見る

経済産業省の資料では、露光装置はオランダのASMLが91%、塗布現像装置は日本の東京エレクトロンが85%、フォトレジストは日本の会社が合わせて78%（2023年）を占めています。

13. 用語集

フォトリソグラフィ
光でマスクの模様をレジストに写し、現像して型紙を作る技術。

レジスト（フォトレジスト）
光に反応して、現像液への溶けやすさが変わる樹脂の膜。

ポジ型
光が当たった部分が現像液に溶けるレジスト。

ネガ型
光が当たった部分が残るレジスト。

HMDS
ヘキサメチルジシラザン。レジストの密着をよくするために、ウェハの表面を処理する薬品。

回転塗布（スピンコート）
ウェハを高速で回して、レジストを薄く均一に広げる方法。

ソフトベーク
塗布したレジストを加熱して、溶剤を飛ばす工程。

露光後ベーク（PEB）
露光の後に加熱する工程。化学増幅レジストでは、酸による反応を進める。

定在波
レジストの中で、入ってくる光と反射した光が重なってできる、強弱の縞模様。

TMAH
水酸化テトラメチルアンモニウム。ポジ型レジストの現像液に使うアルカリ。

リワーク
規格に合わないレジストをはがして、リソグラフィをやり直すこと。

回折
波が、すき間や障害物の後ろに回り込んで広がる現象。

開口数（NA）
レンズが集められる光の角度の広さ。NA＝n sinα。

レイリーの式
解像度R＝k1 λ／NAで、描ける線の細さを表す式。

k1
レイリーの式の係数。装置・レジスト・工程の工夫で下がる。等間隔の線の下限は0.25。

焦点深度（DOF）
ピントが合う範囲の厚さ。λ／NA²に比例する。

g線・i線
水銀ランプの光のうち、波長436 nmと365 nmの光。

エキシマレーザー
KrF（248 nm）やArF（193 nm）の紫外線を出すレーザー。

ステッパー
マスクの像を縮小して1区画ずつ焼き、ウェハを動かして繰り返す露光装置。

スキャナー
スリット状の光で、マスクとウェハを逆向きに動かしながら焼く露光装置。

レチクル
縮小投影の露光装置で使うマスク。

重ね合わせ精度（オーバーレイ）
新しい層の模様を、前の層の模様にどれだけ正確に重ねられるか。

DNQ・ノボラックレジスト
ジアゾナフトキノンとノボラック樹脂を組み合わせた、g線・i線用のレジスト。

化学増幅レジスト
光で生まれた酸が触媒として何度も反応を起こし、感度を高めたレジスト。

光酸発生剤（PAG）
光が当たると酸を出す物質。

脱保護
樹脂の保護基が外れて、現像液に溶けるようになる反応。

マスクブランクス
石英の板にクロムなどの膜を付けた、マスクのもとになる板。

ペリクル
マスクの表面から少し離して張る、ごみよけの薄い透明な膜。

位相シフトマスク
光の位相をずらして打ち消し合わせ、像のコントラストを上げるマスク。

OPC（光近接効果補正）
回折による形のゆがみを見込んで、マスクの模様をあらかじめ変えておく技術。

斜入射照明
光を斜めから当てて、高い次数の回折光をレンズに入れる工夫。

塗布現像装置（コータ／デベロッパ）
レジストの塗布・ベーク・現像を自動で行う、露光装置とつながった装置。

14. 参考資料（一次情報）

1. **Stanford EE212（Plummer, Deal, Griffin）講義資料（ワシントン大学 EE528 の講義ページに掲載）**「Chapter 5: Lithography（p.1、p.3〜7、p.10〜17、p.19〜22、p.33）」 — 資料を開く
2. **M. Qi（パデュー大学 ECE695Q、nanoHUB）**「Lecture 7: Optical Lithography – Lithography System（2016年、スライド8、18〜19、28）」 — 資料を開く
3. **M. Qi（パデュー大学 ECE695Q、nanoHUB）**「Lecture 10: Resolution Enhancement Techniques（2016年、スライド8〜14）」 — 資料を開く
4. **M. Qi（パデュー大学 ECE695Q、nanoHUB）**「Lecture 11: RETs (continued)（2016年）」 — 資料を開く
5. **M. Qi（パデュー大学 ECE695Q、nanoHUB）**「Lecture 5: Resist Technology（2016年、スライド8、16〜21）」 — 資料を開く
6. **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.222〜223）」 — 資料を開く
7. **M. Fritze ほか（MITリンカーン研究所）**「Subwavelength Optical Lithography with Phase-Shift Photomasks, Lincoln Laboratory Journal 14(2)（2003年、p.238〜239）」 — 資料を開く
8. **H. Ito（IBM）**「Chemical amplification resists: History and development within IBM, IBM J. Res. Dev. 41(1/2)（1997年、2000年再録版 p.119〜120）」 — 資料を開く
9. **H. Ito（IBM）**「Dissolution behavior of chemically amplified resist polymers for 248-, 193-, and 157-nm lithography, IBM J. Res. Dev. 45(5)（2001年、p.683）」 — 資料を開く
10. **H. Ito, C. G. Willson, J. M. J. Fréchet（IBM）**「米国特許 US4491628「Positive- and negative-working resist compositions with acid generating photoinitiator and polymer with acid labile groups pendant from polymer backbone」（1982年8月出願、1985年登録）」 — 資料を開く
11. **国際科学技術財団（日本国際賞）**「2013年 C. Grant Willson・Jean M. J. Fréchet 業績解説（p.1〜2）」 — 資料を開く
12. **C. G. Willson研究室（テキサス大学オースティン校）**「Understanding Acid Diffusion in Chemically Amplified Photoresists」 — 資料を開く
13. **ASML**「Lithography principles: The Rayleigh criterion」 — 資料を開く
14. **ASML**「Lithography principles: Light and lasers」 — 資料を開く
15. **ASML**「Lithography principles: Lenses and mirrors」 — 資料を開く
16. **ASML**「Lithography principles: Pushing k1 further」 — 資料を開く
17. **ASML**「Lithography principles: Mechanics and mechatronics」 — 資料を開く
18. **ASML**「Lithography principles: Measuring accuracy」 — 資料を開く
19. **ASML**「製品ページ（TWINSCAN XT:400M、XT:860N、XT:1460K、NXT:1470、NXT:2100i）」 — 資料を開く
20. **ニコン**「Nikon Releases the NSR-S636E ArF Immersion Scanner（2023年12月6日）」 — 資料を開く
21. **Nikon Precision**「NSR-S636E（製品ページ）」 — 資料を開く
22. **ニコン**「半導体露光装置の歴史」 — 資料を開く
23. **キヤノン**「FPA-5550iZ2（製品ページ）」 — 資料を開く
24. **半導体産業人協会（日本半導体歴史館）**「Early 1980s: steppers（2019年）」 — 資料を開く
25. **半導体産業人協会（日本半導体歴史館）**「Late 1990s: Shorter wavelengths of exposing sources（2019年、p.1〜2）」 — 資料を開く
26. **半導体産業人協会（日本半導体歴史館）**「Late 1990s: KrF excimer laser step-and-scan exposure system（2022年）」 — 資料を開く
27. **半導体産業人協会（日本半導体歴史館）**「1990s: Chemical amplification photoresist（2022年）」 — 資料を開く
28. **IRDS**「2022 Edition, Lithography（Table LITH-1、PDF p.6）」 — 資料を開く
29. **IRDS**「2023 Update, Lithography（PDF p.5、p.9〜10）」 — 資料を開く
30. **ITRS**「2011 Edition, Lithography（p.1）」 — 資料を開く
31. **MicroChemicals**「Spin-coating of Photoresists（技術資料、p.1）」 — 資料を開く

32. **MicroChemicals**「Development of Photoresists（技術資料、p.1〜2）」 — 資料を開く
33. **V. Shea, W. J. Wojcik（IBM）**「米国特許 US4131363「Pellicle cover for projection printing system」（1978年登録）」 — 資料を開く
34. **M. D. Levenson（IBM）**「欧州特許 EP0090924B1「Method of increasing the image resolution of a transmitting mask」（優先日1982年4月5日）」 — 資料を開く
35. **米国特許 US6191046B1**「Deposition of an oxide layer to facilitate photoresist rework on polygate layer（2001年）」 — 資料を開く
36. **ASML**「Annual Report 2025（IFRS版、Net system sales per technology の表、地域別売上）」 — 資料を開く
37. **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
38. **キヤノン**「2025年12月期 決算説明会（2026年1月29日、ノート p.25）」 — 資料を開く
39. **経済産業省**「半導体・デジタル産業戦略の今後の方向性（2025年12月23日、p.5、p.7）」 — 資料を開く
40. **ASML**「Q4 2025 決算発表資料（2026年1月28日、p.17、p.24）」 — 資料を開く
41. **瀋陽芯源微電子設備（KINGSEMI）**「2025年年度報告（p.12、p.17、p.20）」 — 資料を開く
42. **東京エレクトロン**「統合報告書2026（p.15、p.48、p.55）」 — 資料を開く
43. **東京応化工業**「統合レポート2026（PDF p.11〜12）」 — 資料を開く
44. **信越化学工業**「統合報告書2025（p.4、p.45）」 — 資料を開く
45. **Merck KGaA**「Annual Report 2025, Combined Management Report（p.36）」 — 資料を開く
46. **富士フイルム**「PFASを一切使わないネガ型ArF液浸レジストを開発（2025年7月15日）」 — 資料を開く
47. **HOYA**「統合報告書2025（PDF p.87）」 — 資料を開く
48. **三井化学**「CNTペリクルの量産用設備の設置について（2024年5月28日）」 — 資料を開く
49. **SEAJ（日本半導体製造装置協会）**「2025年の世界の半導体製造装置販売額（地域別、SEAJ・SEMIの共同集計、2026年4月8日）」 — 資料を開く
50. **JSR**「JSR/Inpria and Lam Research announce cross-licensing agreement（2025年9月16日）」 — 資料を開く
51. **MicroChemicals**「Hardbake, Reflow and DUV Hardening（p.1〜2、現像後の選択工程・形状変化）」 — 資料を開く
52. **SUSS**「Mask Alignment（研究から量産、MEMS・先端パッケージなどの用途）」 — 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
リソはコストの約35%・重ね合わせは線の約1/3、塗布3,000〜6,000 rpm・約0.5 μm、定在波とPEB、回折、NAの定義、レイリーの式と1999年のk1 0.6〜0.8、KrF・NA 0.6の例、DOFの式、密着・近接・投影、√(λg)と約2 μm、Perkin-Elmerの等倍・2〜5倍縮小、DNQ→カルボン酸、量子効率約0.3、PAGと酸の再生、斜入射照明	Stanford EE212 ch5 [1]	事実
格子の回折 sinα＝λ/p、2つの次数が必要、空気中NAの限界約0.93・68°・約1,000 kg、52 nm、石英とクロム	パデュー大学 L07 [2]	事実
位相シフトマスクはコントラストを上げる、ハーフトーン型が主流、172 nm、斜入射照明がいちばん安い	パデュー大学 L10 [3]	事実
9工程、HMDSと疎水・親水、ソフトベーク条件、TMAHの理由と1 ℃、DNQの溶解速度、2016年の講義で短波長用の主流としてCARを説明、酸の拡散長・NH_3・装置を囲う	パデュー大学 L05 [5]	事実
先進デバイスでk1＝0.4、下限0.25、1996年ごろに波長以下へ	MIT LL [6]	事実
OPCの補助パターン	MIT LL [7]	事実
ノボラック・DNQはdeep-UVで吸収しすぎ、1980年提案・1982年報告、実験室の珍しいもの、1980年代半ばに1MビットDRAMで使用	Ito 1997 [8]（スキャン画像を目視で確認）	事実
0.26規定TMAHが新しいレジストにも課されてきた	Ito 2001 [9]	事実
1982年8月出願、t-ブチル系の保護基と光で酸を出す物質	US4491628 [10]	事実
ポジ型・ネガ型の定義、最初のCARはtBOCを外してPHS、2013年日本国際賞	日本国際賞 [11]	事実
連鎖は数百回、感度と忠実さのトレードオフ、拡散距離はほぼ同じ	Willson研究室 [12]	事実
物理的な限界k1＝0.25、レイリーの式	ASML [13]	事実
g線436 nm・約1 μm、i線は最終的に220 nm、ArFで38 nm	ASML [14]	事実
OPCは照明の最適化と組み合わせる	ASML [16]	事実
TWINSCANは2000年	ASML [17]	事実
重ね合わせの定義	ASML [18]	事実
各装置の波長・NA・解像度・処理能力	ASML製品ページ [19]、ニコン [20]、キヤノン [23]	事実
26×33 mm、1:4、6インチ、MMO 2.1 nm以下	ニコン [20]、キヤノン [23]	事実

本文の主張	根拠	区分
1980年に国産初のステッパー、1984年に世界初のi線ステッパー、1995年に世界初のスキャナー	ニコン [22]	事実
キヤノン1984年にステッパー、1995年ごろニコンとキヤノンで70〜80%、日本のDRAMメーカーが背景	日本半導体歴史館 [24]	事実
水でNA 1.35	ASML [15]	事実
1回の処理の実用上の限界k1 0.25、2回で0.2未満	パデュー大学 L11 [4]	事実
NSR-S636Eの仕様	Nikon Precision [21]	事実
波長と量産の目安（g線0.8 μm・4MDRAM、i線0.5 μm未満・0.35 μm、KrF 0.25 μm）、NA 0.65→0.8超、塩基性物質と化学フィルター	日本半導体歴史館 [25]	事実
レンズ径約0.7倍、1995年にNSR-S201AをIBMへ（NA 0.6、0.25 μm）	日本半導体歴史館 [26]	事実
KrFでは約10倍の感度、東京応化1997年・JSR 2000年	日本半導体歴史館 [27]	事実
重ね合わせ 2.4／2.0／1.6 nm	IRDS 2022 [28]	事実
CARが1 nm世代まで主役との見通し、金属を含む新しいレジスト、重ね合わせが許容量の40%	IRDS 2023 [29]	事実 ／将来見通しは 未確定／将来
1回の露光はハーフピッチ40 nmで限界	ITRS 2011 [30]	事実
膜厚は回転数の平方根に反比例・2倍で約1.4分の1、10〜20秒、数%	MicroChemicals [31]	事実
TMAH 2.38%	MicroChemicals [32]	事実
ペリクル 0.2〜6 μm・1〜125 mm、ごみはピンぼけ	US4131363 [33]	事実
隣り合う穴の位相を180°ずらして打ち消す	EP0090924 [34]	事実
規格外のときはリワークが経済的	US6191046 [35]	事実
2025年の種類別の台数と売上、中国29.1%（2024年36.1%）	ASML AR2025 [36]	事実
2026年3月期 27台（i線など20・KrF 4・ArF 3）	ニコン [37]	事実
2025年に234台（KrF 46・i線188）、先端パッケージ・メモリ向け	キヤノン [38]	事実
露光装置 ASML 91%・キヤノン4%、塗布現像 TEL 85%・SÜSS 6%・KINGSEMI 5%、描画装置 IMS 49%・ニューフレア45%、レジスト日本77%→78%、マスク用レジスト65%、フォトマスク22%→19%、日本は露光装置でシェアを取れていない	経済産業省 [39]	事実
XT:260（i線）の初出荷	ASML Q4 2025 [40]	事実
露光装置とつながる唯一の装置、国産化率が低い分野	芯源微 [41]	事実

本文の主張	根拠	区分
塗布・現像1位、EUV用100%（同社推定）、塗布による欠陥50%以上低減	東京エレクトロン [42]	事実
レジストの種類別シェアと順位・年率、市場30億8,100万ドル、全体26.1%	東京応化工業 [43]	事実
フォトレジスト・マスクブランクスで世界2位	信越化学 [44]	事実
PFASフリーのi線・KrFレジストのサンプル出荷	Merck [45]	事実
PFASフリーのネガ型ArF液浸レジスト、imecと28 nm世代で確認	富士フイルム [46]	事実
マスクブランクスで非常に高いシェア	HOYA [47]	事実
1984年にペリクルを発売、2021年にEUVペリクルの商業生産	三井化学 [48]	事実
2025年の装置販売額1,351億ドル、中国493億ドル	SEAJ [49]	事実
Inpriaは金属酸化物のレジスト	JSR [50]	事実
√2≒1.4、TMAH 2.38%≒0.26 mol/L、ArF・NA 0.93でk1 0.3→約62 nm・0.25→約52 nm、DOF約±0.11 μm、装置のk1、1時間300枚で1枚約12秒、溶解速度の差約1,000倍、ASMLの1台あたりの売上、キヤノンのi線台数がASMLの3倍超	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
2 nmはシリコンの原子10個ほど	原子間隔0.2〜0.3 nmとした本稿の目安	推測
ハードベークは選択工程で、形状の丸まり・剥離の難しさに注意	MicroChemicals [51]	事実
マスクアライナーはMEMS・先端パッケージ・研究から量産に現在も利用	SUSS [52]	事実

最終更新：2026年11月7日／技術は大学の講義資料・原論文・特許・IRDS／ITRS（国際ロードマップ）・各社の技術資料と製品ページ、企業の情報は各社の統合報告書・年次報告書・決算資料、地域別の数字は経済産業省・SEAJを出典としています。「1位」「シェア」などの表現は各社自身の発表や、各社・経済産業省が引用した調査会社の数字で、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・分子の形や位置ずれは、理解しやすいように簡略化・強調しています。写真は各キャプションに作者・出典・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。