SEMICONDUCTOR FRONT-END · PART 3-7

フォトリソグラフィ（EUV）空気にも吸われる光で、回路を描く

ArF（193 nm）の液浸露光とマルチパターニングに加え、最先端のチップのとくに細かな層は、波長13.5 nmの**極端紫外線（EUV）**で描かれるようになりました。波長は一気に約14分の1。ところが、この光は空気にも、ガラスにも吸われてしまいます。だからEUVの露光装置は、光の通り道を高い真空にし、レンズの代わりに極薄の膜を重ねた鏡で光を運びます。光は、秒間5万回レーザーで撃ち抜かれるスズの液滴から生まれます。そのアイデアの始まりは、1980年代の日本、NTTの研究所でした。装置を作れるのは世界でASMLだけ — その周りで、鏡のZEISS、マスクの材料や検査装置の日本の会社がどう支えているのかまで見ていきます。

半導体前工程シリーズ 第3部 3-7／難易度 ★★★
事前学習：3-5・3-6／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 — なぜ13.5 nmなのか
3. 技術編② — 空気にも吸われる光：真空と鏡
4. 技術編③ — 光源：スズの液滴を、レーザーで撃つ
5. 技術編④ — 歴史：始まりは日本だった
6. 技術編⑤ — High-NA：NAを0.33から0.55へ
7. 技術編⑥ — 光子が少ない：確率的なばらつき
8. 技術編⑦ — 新しいレジストと、ペリクル
9. 技術編⑧ — 処理能力と、電力
10. 産業編① — 装置：作れるのはASMLだけ
11. 産業編② — 日本の会社が支えるEUV
12. これから求められること
13. まとめと次回予告
14. 確認クイズ
15. 用語集
16. 参考資料（一次情報）
17. 主張と出典の対応表

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

- EUVの露光装置が、真空の中で鏡だけを使う理由を、光の吸収と多層膜の反射で説明できる
- スズのプラズマでEUVの光を作るしくみと、その効率の低さを説明できる
- 光子のエネルギーの計算から、EUVで「光子が少ない」ことによるばらつき（確率的欠陥）が生じる理由を説明できる
- EUVの装置と、その周りの部品・材料・検査装置で、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

- **EUV**は、波長**13.5 nm**の光で回路を描く露光技術です。この光は空気にも吸収されるので、装置の中はすべて**真空**です。レンズは使えず、モリブデンとシリコンなどの極薄膜を交互に重ねた**多層膜ミラー**で光を運びます。反射率67%の鏡で10回反射する例では、光は約2%しか残りません（40対の膜は後述の研究例です）。
- 光は、直径約25〜30 μmの**スズの液滴**にCO2レーザーを当てて作るプラズマから出ます。レーザーのエネルギーのうちEUVになるのは約5%です。光子1個のエネルギーがArFの約14倍大きいので、同じ露光量では**入射する光子の数が約14分の1**になり、その「数のばらつき」が、レジストの反応などとともに欠陥に関わります。
- EUVの露光装置を作るのは、世界で**ASMLだけ**です（同社の説明）。鏡はドイツのZEISS、レーザーはTRUMPFが作ります。日本の会社は、マスクの材料（AGC・HOYA）、マスクの検査装置（レーザーテック）、塗布現像装置（東京エレクトロン）、レジスト（東京応化工業など）、ペリクル（三井化学）で、EUVを支えています。

2. 技術編① — なぜ13.5 nmなのか

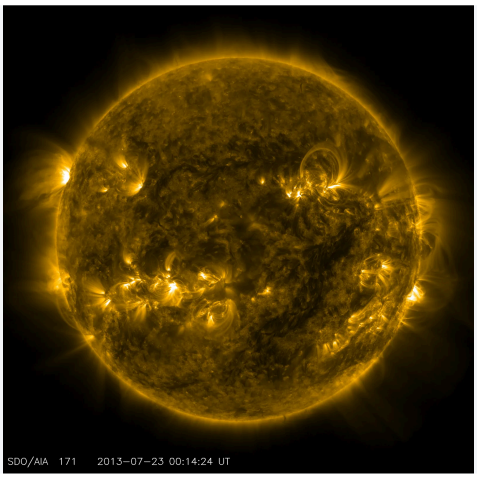
波長を一気に14分の1へ

3-5・3-6で見たように、ArF（193 nm）の液浸露光は、NA 1.35、k_1約0.27で、1回の露光の限界（ハーフピッチ約40 nm）に達しました。ここから先は、マルチパターニングで工程を何倍にも重ねるか、波長そのものを短くするしかありません 解説 。

EUVの波長13.5 nmは、ArFの193 nmの約14分の1です 本稿の計算 。ASMLのNA 0.33の装置の解像度は**13 nm**です [11] 事実 。レイリーの式（$R = k_1 \lambda / NA$）を変形すると、$k_1 = 13 \times 0.33 \div 13.5 \fallingdotseq$ **0.32**です 本稿の計算 。ArFの液浸のようにk_1を限界まで下げなくても、波長が短いぶん、1回の露光で細い線が描けます 解説 。

● 波長を決めたのは「鏡」と「スズ」

では、なぜ13.5 nmなのでしょうか。IRDSは、EUVリソグラフィの波長は、**反射率の高い多層膜ミラーが作れるかどうか**で決まったと書いています [1] 事実 。ASMLは、初期の研究者は4〜40 nmのさまざまな波長を検討したが、最終的に、**スズのプラズマでEUVの光を作るのにちょうどよい13.5 nm**に落ち着いたと書いています [9] 事実 。ASMLの光源の開発者の論文も、スズのプラズマが出す光のスペクトルが、Mo/Siの多層膜ミラーの反射率とよく合っていることを示しています [4] 事実 。「鏡が反射できる波長」と「スズが強く光る波長」が重なったところ — それが13.5 nmです 解説 。



NASAの太陽観測衛星SDOが、波長17.1 nmの極端紫外線でとらえた太陽。磁力線に沿って伸びるコロナのループが見えます（Commonsの説明による）。EUVの露光に使う13.5 nmと同じ「極端紫外線」の仲間の光です。
画像：NASA/SDO and the AIA, EVE, and HMI science teams / Wikimedia Commons / パブリックドメイン（掲載用に縮小・WebP化）

3. 技術編② — 空気にも吸われる光：真空と鏡

● 空気にもガラスにも、強く吸収される

ASMLは、「**EUVの光は、空気も含めて、あらゆるものに吸収される**」と書いています。そのため、光源からウェハまで、光の通り道のすべてを**高い真空**にしなければなりません [10] 事実 。ベルギーの研究機関imecも、EUVは空気を通らず、あらゆる固体に強く吸収されると書いています [20] 事実 。

ここでいう「吸収される」は、どんな厚さでも光が完全にゼロになる、という意味ではありません。後で出てくる極薄のペリクルは、光の多くを通します。それでも、レンズの厚さのガラスや大気中の長い光路では吸収が大きすぎるため、実用的なEUV露光には使えません 解説 。

ガラスにも吸収されるので、**レンズは使えません**。ASMLは、EUVリソグラフィにはレンズがなく、真空の中で**多層膜ミラー**を使い、それぞれのミラーは**100層を超える**膜でできていると説明しています [16] 事実 。

多層膜ミラー — 弱い反射を、何十回も重ねる

1枚の境目で反射するEUVの光は、ごくわずかです。そこで、屈折率の少し違う2つの物質（**モリブデンとシリコン**）を交互に何十層も重ね、各境目で反射した弱い光の**山と山をそろえて**強め合わせます。高校の物理で習う、薄い膜の干渉と同じしくみです 解説 。

米国のローレンス・リバモア国立研究所の1998年の論文は、Mo/Siの多層膜を、**周期6.89 nmの40対**（モリブデン約2.8 nm、シリコン約4.1 nm）としています。そして、13.4 nmで**67.5%の反射率**が日常的に得られるようになり、70%以上を目標にしていると書いています [3] 事実 。

物理のツボ①：多層膜の周期は、波長のおよそ半分

真上から当たった光が、多層膜の1周期（厚さd）ぶん深く入って戻ってくると、往復で2dだけ余分に進みます。この余分な道のりが波長λの整数倍なら、各層で反射した光の山がそろって強め合います（**ブラッグの条件**）。屈折率や反射時の位相の変化を省いた、真上からの入射の近似では、最も単純な条件は、

$$2d = \lambda \quad \rightarrow \quad d = \lambda / 2$$

です 解説 。13.5 nmなら、d ≒ 6.75 nmです 本稿の計算 。実際の周期6.89 nm [3] は、これにほぼ等しくなっています。ただし、実際の設計では屈折率・入射角・吸収・界面の状態も考慮します。単に波長を2で割れば最適な鏡が作れるわけではありません 解説 。原子でいえば、各層は原子十数個ぶんの厚さの目安です 推測 。40対はこの研究の例で、現在のすべての鏡の層数を示しません。

物理のツボ②：10回反射すると、光は2%しか残らない

1枚のミラーで反射率が約67%なら、反射されなかった光の多くは吸収され、熱になります。光源からウェハまでには、何枚ものミラーがあります。ASMLの光源の開発者は、中間集光点からウェハまで**10回反射**し、ミラーの反射率が67%なら、全体の透過率は**約2%**だと書いています [4] 事実 。

計算してみる：$0.67^{10} \fallingdotseq 0.018$、つまり約2%です。反射率が70%でも$0.70^{10} \fallingdotseq 0.028$（約3%）にしかなりません 本稿の計算 。この例では、**中間集光点にある光**を100%としても、ウェハに残るのは約2%です。プラズマが放つ光すべてを100%とした値でも、装置全体の電力効率でもありません。だから、光源は強くなければならず、ミラーは冷やさなければなりません 解説 。

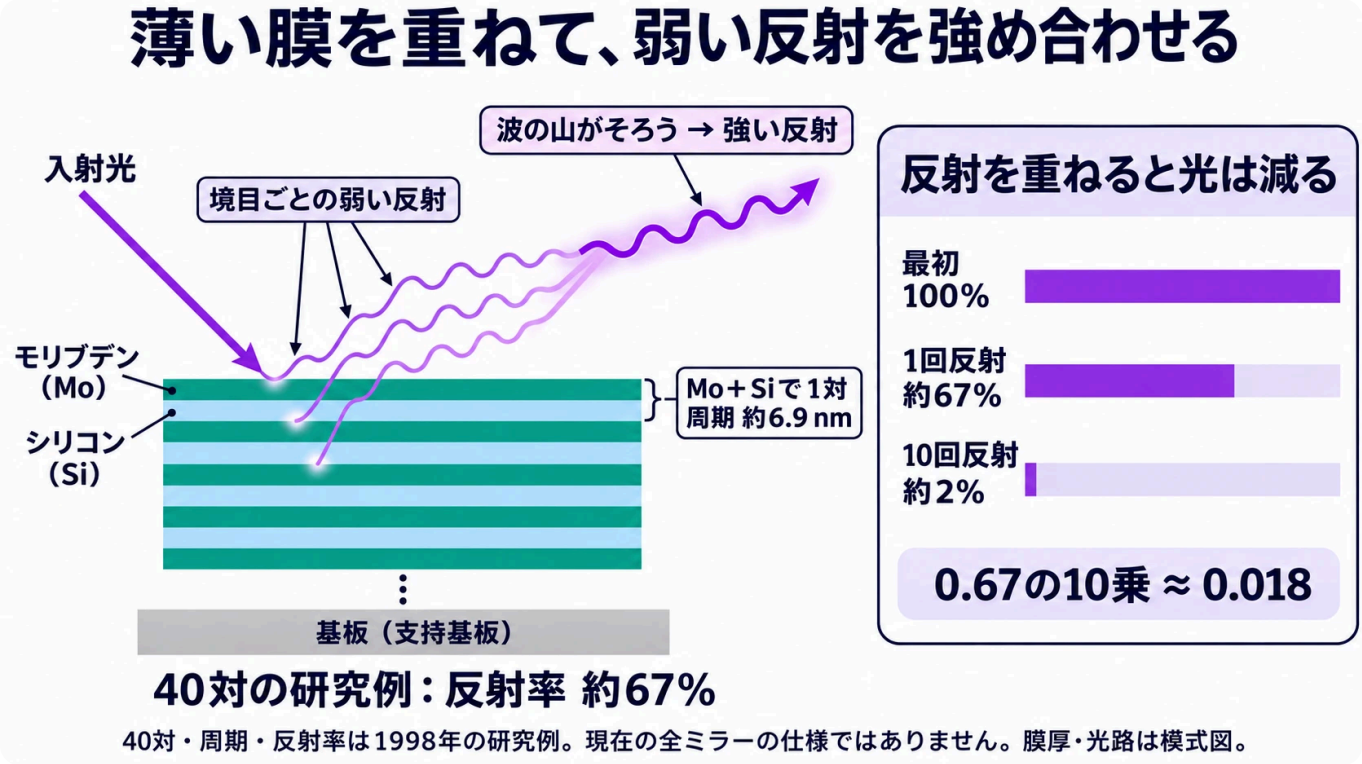
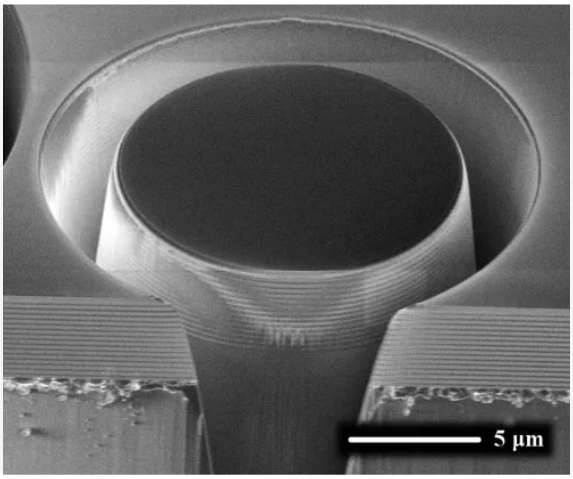


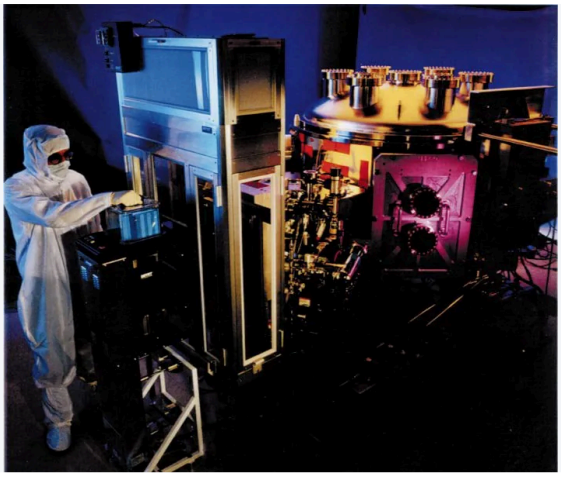
図1　多層膜ミラー：強め合う反射と、積み重なる光の損失（概念図）

図の読み方

左は、異なる深さの境目から戻る弱い光が強め合うイメージです。一つの光が膜の間を順番に反射して強くなる図ではありません。右は別の話で、鏡を1枚ずつ通過するたびに使える光が減る計算です。40対・周期約6.9 nm・反射率約67%は研究例に基づき、現在の全製品の仕様を示していません [3] [4]。



可視光・赤外線用の小さな誘電体多層膜ミラーを、材料から切り出しているところの電子顕微鏡写真。酸化タンタルと酸化シリコンの層が交互に重なっているのが見えます（Commonsの説明による）。EUV用のMo/Siの多層膜はこれよりはるかに薄い層でできていますが、「薄い膜を交互に重ねて反射させる」しくみは同じです。
画像：Geepster (English Wikipedia) / Wikimedia Commons / パブリックドメイン（掲載用に縮小・WebP化）



米国ローレンス・リバモア国立研究所の、EUVリソグラフィ用の装置。欠陥のほとんどない極薄膜を積む装置とされています（Commonsの説明による）。露光装置ではありません。
画像：Lawrence Livermore National Laboratory / Wikimedia Commons / パブリックドメイン（掲載用に縮小・WebP化）

ドイツほどの大きさでも、凹凸は0.1 mm

ミラーの表面は、極めてなめらかでなければなりません。ZEISSは、EUVのミラーをドイツの大きさに拡大しても、いちばん大きな凹凸（ドイツの最高峰ツークシュピッツェにあたる）は**約0.1 mm**にしかならないと説明しています [25] 事実 。同社によると、通常のEUVの投影光学系は約2万個の部品からなり、重さは約2トンです [25] 事実 。

マスクも、鏡

マスクも、光を通すのではなく**反射**させます。ASMLは、EUVのレチクル（マスク）は、干渉を使って模様から光を反射する**多層膜の反射鏡**だとし、模様を**4分の1に縮小**して写すと書いています [10] 事実 。マスクの多層膜の上に、光を吸収する膜（例えば厚さ80 nmのタンタル系の膜）で回路の模様を作ります [6] 事実 。

反射型のマスクには、特有の問題があります。光を真上から当てると、反射した光が来た道を戻ってしまうので、少し斜め（**6°**）から当てます。ドイツのフラウンホーファー研究所とimecの研究者は、この斜めの照明のために、吸収膜が**影**を作り、模様の向きによって寸法が変わる、といった「**マスクの3D効果**」が生じると書いています。EUVの光は、多層膜の中に約50 nm入り込んでから戻ってきます [6] 事実 。IRDSは、この効果を減らす新しい吸収膜の材料の開発が必要だとしています [1] 事実 。



図2　EUV露光の全体像：光源・反射型マスク・投影光学系（概念図）

図の読み方

左で作った光を集め、中央の反射型マスクに当て、反射した光を右の投影光学系でウェハへ運びます。黒い吸収膜のある部分とない部分が光に模様を与えます。図は工程のつながりを分けて示したもので、鏡の枚数や配置は実機の光路ではありません。真空とは空気を大きく減らした状態で、後述の光源部では汚れを抑えるために低圧の水素も使います [4] [10]。

4. 技術編③ — 光源：スズの液滴を、レーザーで撃つ

● 1秒間に5万回

EUVの光は、どうやって作るのでしょうか。ASMLは、そのしくみを次のように説明しています [15] 事実 。

1. 直径約25 μmの**溶けたスズの液滴**を、秒速70 mで飛ばす
2. 落ちてくる液滴に、まず**弱いレーザーのパルス**を当てて、パンケーキのように平たくする
3. 次に**強いレーザーのパルス**を当てて、スズを蒸発させ、EUVを出すプラズマにする
4. これを**1秒間に5万回**繰り返す

ASMLは、このプラズマは**太陽の表面の40倍の温度**だとしています [9] 事実 。レーザーは、波長10.6 μmの**CO2レーザー**です [4] 事実 。

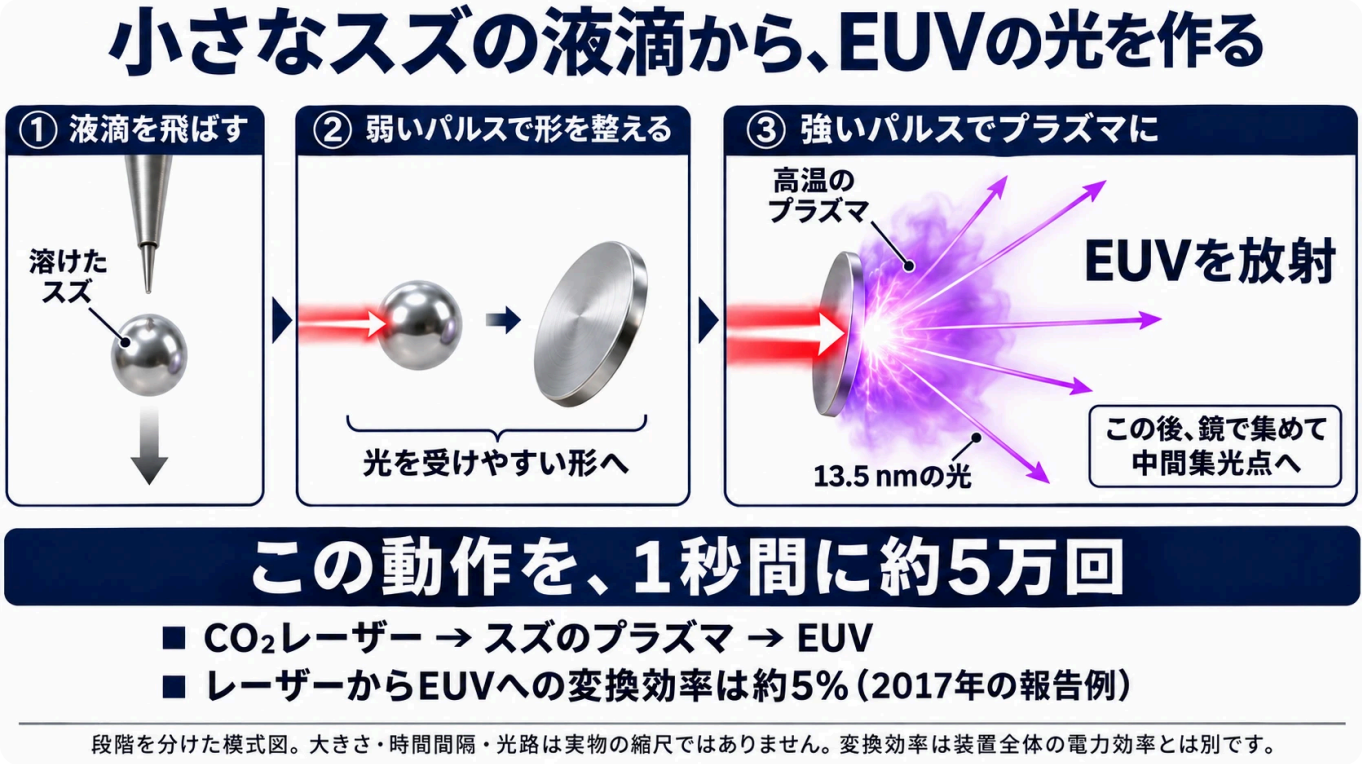


図3　スズの液滴からEUVへ：弱いパルスと強いパルスの役割（概念図）

図の読み方

①から③は同じ液滴の変化を分けて描いたものです。CO2レーザーそのものを回路に当てるのではなく、レーザーで作ったスズのプラズマから13.5 nm付近の光を取り出します。紫色はEUVを見える色に置き換えた表現です。約5%は論文のレーザーからEUVへの変換効率で、コンセントからウェハまでの電力効率ではありません [4][15]。

- **効率は約5%**

ASMLの光源の開発者の2017年の論文によると、レーザーのパルスのエネルギーがEUVのパルスのエネルギーに変わる**変換効率は平均約5%**です。集光や純度の損失を含めると、中間集光点で**200 WのEUVを得るのに、20 kWを超えるレーザーの出力**が必要になります（2017年の報告例）。開発中の試験では、変換効率6%も示されています [4] 事実 。

計算してみる（異なる出力値を使った単位換算の例）：20 kWのレーザーを1秒間に5万回のパルスに分けると、1回あたり20,000 ÷ 50,000 = **0.4 J**です。中間集光点で250 Wなら、1パルスあたり250 ÷ 50,000 = **5 mJ**です 本稿の計算 。この二つの数字は同一条件の実測値の組ではなく、比を取って変換効率を求めることはできません。

10 Wから、250 W、600 Wへ

光源の出力は、EUVの実用化の最大の壁でした。ASMLは、開発の初期のEUVの光源の出力は**10 W未満**で、しばらくは80 Wを超えられなかったと振り返っています [13] 事実 。そして、光源が**250 W**に達し、1時間に**125枚**のウェハを処理できるようになったとき、ようやく「トンネルの出口が見えた」と書いています [9] 事実 。IRDSの2023年版は、中間集光点での出力**600 W**が達成され、**1 kW**をめざす取り組みがあると書いています [1] 事実 。

スズの汚れとの戦い

スズのプラズマは、高速のスズのイオンやかけら（デブリ）も飛ばします。これが光を集めるミラー（**コレクター**）を汚します。ASMLの光源の開発者は、コレクターが寿命の面で**いちばん重要な部品**だとし、真空の容器に**水素**のガスを入れてイオンを減速させ、**水素のラジカル**でミラーの上のスズを取り除く技術を開発したと書いています [4] 事実 。日本のギガフォトンは、磁場でスズのイオンを閉じ込める方式を開発し、2015年の論文では、1秒間に5万回で140 Wのバースト出力を報告しています [5] 事実 。

5. 技術編④ — 歴史：始まりは日本だった

NTTの木下博雄

EUVリソグラフィの始まりは、1980年代の日本にあります。NTTの研究所にいた**木下博雄**は、1983年ごろ、X線を等倍で写す露光の研究をしていて、「**等倍から縮小へ**」との思いを強くしたと書いています。多層膜を付けた凹凸の鏡で光学系を作り、高エネルギー物理学研究所で実験を始めました。最初は鏡の位置合わせがうまくいかず、実験の日々が続き、**1985年**にようやく線とすき間のパターンを作ることに成功しました [7] 事実 。

1986年秋、木下はこの成果を応用物理学会で発表しましたが、「**X線を曲げて像を作ったんだって…**」と、眉唾ものだという反応が大勢だったと振り返っています。1993年には、初めて「EUVL」の名前を冠した国際会議を、富士山のふもとで開きました [7] 事実 。NTT-ATの芳賀恒之の2018年の論文も、軟X線の縮小リソグラフィの研究は1984年ごろにNTTの木下が始め、1986年にパターンの転写が初めて報告されたと書いています [8] 事実 。

ASMLも、EUVの歴史の記事で木下の1986年の発表を取り上げ、「聴衆はとても懐疑的だったが、自分の信念は変わらなかった」という木下の言葉を紹介しています（ASMLの記事は学会の名前を「日本光学会」としていますが、本稿では本人の記述と論文の文献表に従い、応用物理学会としました） [9] 事実 。

米国の国立研究所、そしてASMLへ

1997年、米国では、Intel、Motorola、AMDが率いる**EUV LLC**と、エネルギー省の国立研究所（ローレンス・リバモア、サンディア、ローレンス・バークレー）が、3年間で**2億5,000万ドル**の共同研究の契約を結びました。エネルギー省の共同研究開発契約として、史上最大のものでした [17] 事実 。

その後、開発の中心はオランダのASMLに移ります。ASMLは、**2006年8月**に世界初のEUVの実証機を米国オールバニの研究施設とimecに出荷し、**2013年**に最初の生産用の装置NXE:3300を出荷しました。同社は、EUVの開発に**17年間で60億ユーロを超える**投資をし、光源の会社Cymerを買収したと書いています [10] 事実 。同社の年次報告によると、2018年に出荷したNXE:3400Bが、**1時間に100枚を超える**ウェハを処理できる最初の量産用のEUVの装置でした [27] 事実 。

- **量産へ**

Samsungは、2018年10月、EUVを使った7 nmの工程（7LPP）でウェハの生産を始めたと発表しました。ArFでは**最大4枚のマスク**が必要な層を、EUVなら**1枚**で作れ、全体のマスクの枚数を**約20%減らせる**としています [18] 事実 。**TSMC**は、2019年、EUVを使った「N7+」を、業界初の商用のEUVの技術として発表しました [19] 事実 。ASMLは、2019年に、EUVを使った最初の商用の製品（Samsungのスマートフォン Galaxy Note10）が発売されたと書いています [9] 事実 。

木下の最初の実験（1985年）から、量産（2018〜2019年）まで、**30年を超える**時間がかかったことになります 本稿の計算 。

6. 技術編⑤ — High-NA：NAを0.33から0.55へ

- **解像度8 nm**

ASMLのHigh-NA世代の装置は、NAを0.33から**0.55**に上げた**High-NA**の装置です。同社によると、解像度は**8 nm**で、従来の1.7分の1の大きさの模様を描け、幾何学的な縮小によってトランジスタ密度を**2.9倍**に高められる可能性を示しています [11] 事実 。実際のチップ全体の密度や性能が自動的に2.9倍になる、という保証ではありません 解説 。$k_1 = 8 \times 0.55 \div 13.5 \fallingdotseq \mathbf{0.33}$です 本稿の計算 。ZEISSによると、High-NAの投影光学系は**4万個を超える部品**からなり、重さは**約12トン**です [24] 事実 。

- **縦と横で、縮小率が違う**

NAを上げると、光がマスクに当たる角度が大きくなります。ASMLは、角度が大きくなるとマスクが光を反射しにくくなるので、マスクの模様を**一方向には4分の1、もう一方向には8分の1に縮小**する光学系（**アナモルフィック光学系**）にしたと説明しています [12] 事実 。IRDSによると、その結果、ウェハ上の1回の露光の範囲は**26 mm × 16.5 mm**と、今の装置の**半分**になります。大きなチップを作るには、2回の露光をつなぎ合わせる（**スティッチング**）方法などが考えられています [1] 事実 。

ASMLは、High-NAの装置では、ウェハの台が8 G、マスクの台が**32 G**で加速すると書いています [12] 事実 。32 Gは、地球の重力の32倍の加速度です 解説 。

物理のツボ③：High-NAで、ピントはさらに浅く

3-5で見たとおり、焦点深度はλ / NA^2に比例します。NAを0.33から0.55に上げると、焦点深度は（0.33 ÷ 0.55）^{2} ＝ **0.36倍**になります 本稿の計算 。IRDSは、High-NAでは焦点深度がとても小さくなり、レジストの厚さを**20 nm未満**にする必要が出てくると書いています [1] 事実 。レジストが薄くなると、吸収される光子の数も減ります。これが、次の節の「ばらつき」の問題につながります 解説 。

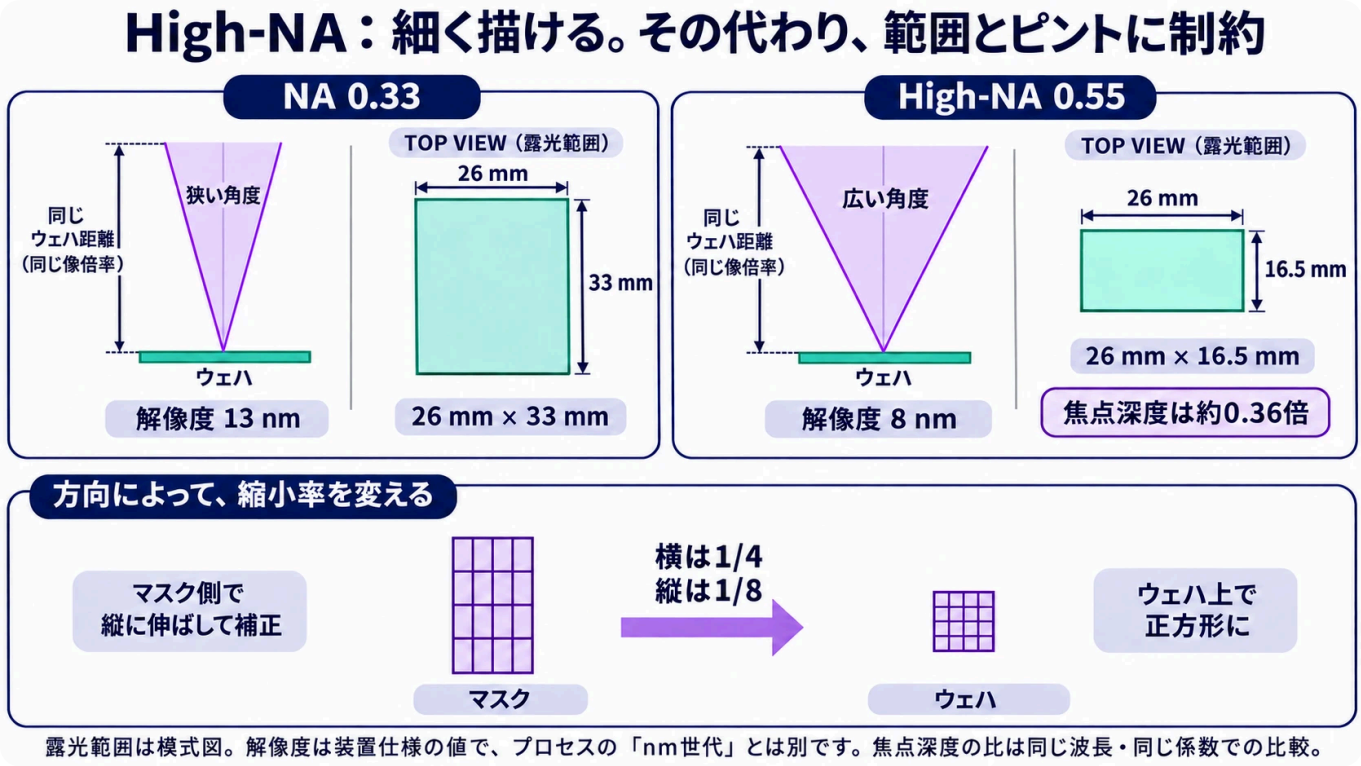


図4　High-NA：集める角度・露光範囲・方向による縮小率（概念図）

図の読み方

上段は、High-NAで光を集める角度が広がる一方、標準的な露光範囲は半分になることを示します。解像度13 nm・8 nmは装置仕様で、「3 nm世代」「2 nm世代」といった工程の呼び名やトランジスタ全体の寸法とは別です。焦点深度0.36倍は、波長と比例係数が同じ場合の比較です。下段は単純な格子の例で、横を1/4・縦を1/8に縮めるため、マスク側を縦長にしてウェハ上の正方形に対応させます。図の記号の大きさ自体は縮尺を合わせていません [1][11][12]。

7. 技術編⑥ — 光子が少ない：確率的なばらつき

- **光子1個のエネルギー**

光子の数のばらつきはArFにもありますが、EUVでは**同じ露光量でも光子の数が少ない**ことが、とくに厳しい課題になります。imecは、EUVの露光ではArFの液浸と比べて**使える光子が少ない**ため、ごく細い線の切れや、隣どうしの橋渡し、穴の抜けやつながりといった欠陥が、歩留まりに影響すると書いています [20] 事実 。

物理のツボ④：光子を数えてみる

光子1個のエネルギーは、E ＝ hc／λ（hはプランク定数、cは光の速さ）です。高校の物理で習う式です。NISTの定数の値 [26] を使って計算すると 本稿の計算 、

- EUV（13.5 nm）：約**92 eV**
- ArF（193 nm）：約**6.4 eV**

EUVの光子は、ArFの約**14倍**のエネルギーを持っています。同じ露光量（面積あたりのエネルギー）なら、光子の数は約14分の1です 本稿の計算 。

露光量30 mJ/cm^{2}で、**10 nm × 10 nm**の小さな正方形に届く光子の数を数えると 本稿の計算 、

- EUV：約**2,000個**
- ArF：約**29,000個**

光子は、雨粒のようにでたらめに降ってきます。N個が届くはずのところで、独立に到来するという単純なモデルでは、実際の数のばらつきの大きさ（標準偏差）は**√N個**です（ポアソン統計）。したがって、標準偏差を平均で割った相対的なばらつきは1／√Nなので、EUVで約2.2%、ArFで約0.6%です 本稿の計算 。しかも、これは**レジストに届いた**光子の数で、実際にレジストに**吸収される**のはその一部です。小さな正方形の一つ一つで、受け取る光の量がでたらめに違えば、線の縁のがたつきや、穴が開かない・線がつながるといった問題につながります。ただし、ここで計算した2.2%は**入射光子数の相対的なばらつき**で、線幅のばらつきや不良率そのものではありません。実際には光の吸収、放出された電子の広がり、分子や反応のばらつきも関係します [1][20] 解説 。

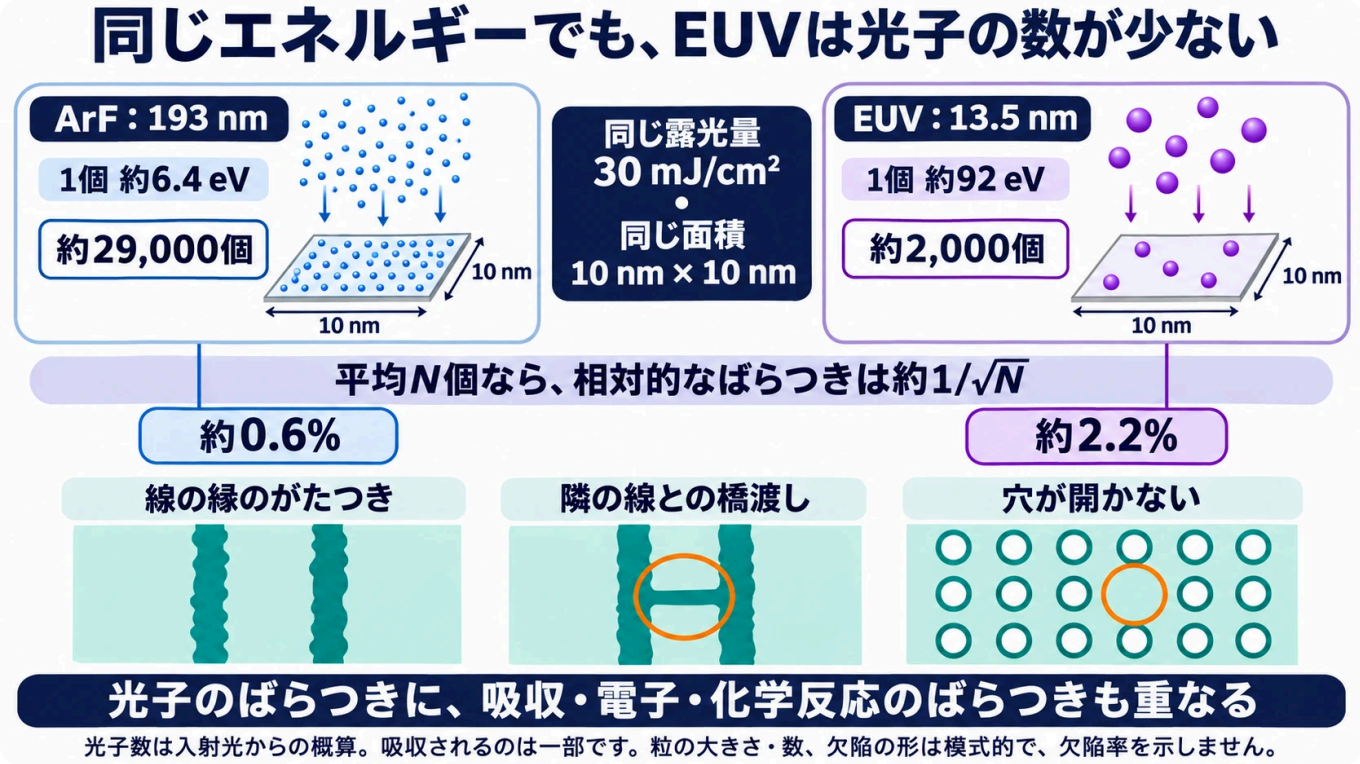


図5　同じ露光量で比べる：光子の数と確率的な欠陥（概念図）

図の読み方

同じ面積に同じエネルギーを届けても、1個のエネルギーが大きいEUVでは個数が少なくなります。図の粒は個数のイメージで、約2,000個を実際に描いたわけではありません。下段はレジストの上面の模式例で、がたつき・橋渡し・穴の抜けを示しています。特定の露光量でこの欠陥率になるという意味ではありません [1][20][26]。

● 光を増やすか、処理を遅くするか

IRDSは、こうした**確率的なばらつき（ストカスティクス）**を、ものごとが一つ一つでたらめに違って印刷される現象と定義し、線の幅の揺らぎや、模様の抜け・つながりを例に挙げています。そして、確率的な問題に対処するには、**4世代で露光量を約3倍**にする必要があるという予測が、今のところそのとおりに進んでいると書いています。レジストの膜が薄いほど、また光を吸収しにくいほど、悪くなるとしています [1] 事実 。IRDSの2022年版は、例として、ピッチ40 nmの穴を60 mJ/cm^2、13 nmの線とすき間を50 mJ/cm^{2}で印刷した例を挙げています [2] 事実 。

同じ光源出力なら、露光量を増やすほど露光に時間がかかり、処理できるウェハの枚数は減る方向になります。imecは、処理能力を保つための目標の露光量は20 mJ/cm^{2}だが、同研究所の結果は、確率的な欠陥を減らすために**もっと多い露光量が必要**なことを示していると書いています [20] 事実 。ASMLの製品ページでも、High-NAの装置の処理能力は、露光量50 mJ/cm^{2}を前提に示されています [11] 事実 。

8. 技術編⑦ — 新しいレジストと、ペリクル

金属を含むレジスト

光子が少ないなら、**光をよく吸収する**レジストが欲しくなります。IRDSは、2023年時点のロードマップで、化学増幅レジストが少なくとも1 nm世代まで主役であり続けると予測する一方、**金属を含む新しいレジスト**が有望で、光子をよく吸収し感度を高められる**金属酸化物レジスト**が、化学増幅レジストの最大の競争相手だと書いています。その導入は1.5 nm世代以降、とくにNA 0.55のHigh-NAの導入が分かれ目になると、同ロードマップは見ています [1] 事実 。

JSRは、2021年、金属酸化物レジストの先駆者である米国のInpriaを**5億1,400万ドル**で買収すると発表しました [22] 事実 。米国のLam Researchは、レジストを液体で塗るのではなく、気体から膜として積む**ドライレジスト**を2020年に発表し、2025年には大手のメモリメーカーが最先端のDRAMの量産に採用したとしています。従来の液体のレジストより、化学薬品の使用量を**5〜10分の1**にできるとしています [23] 事実 。

13 nmの膜のペリクル

3-5で見たペリクル（マスクのごみよけの膜）も、EUVでは難題です。EUVの光を通す材料がほとんどないからです。ASMLは2022年の記事で、当時の同社の最先端のペリクルは厚さ**13 nm**の極めて薄い膜で、高い真空の中で**最高500 ℃**の温度に耐えると書いています。そして、13.5 nmの光を完全に通す材料は存在せず、ペリクルを使えば光子を失う、とも書いています [14] 事実 。

次の世代として、**カーボンナノチューブ（CNT）**の膜のペリクルの開発が進んでいます。imecと三井化学は、2023年、EUVの透過率**94%以上**で、1 kWを超えるEUVの出力に耐えるCNTのペリクルの実用化に向けて提携しました [21] 事実 。

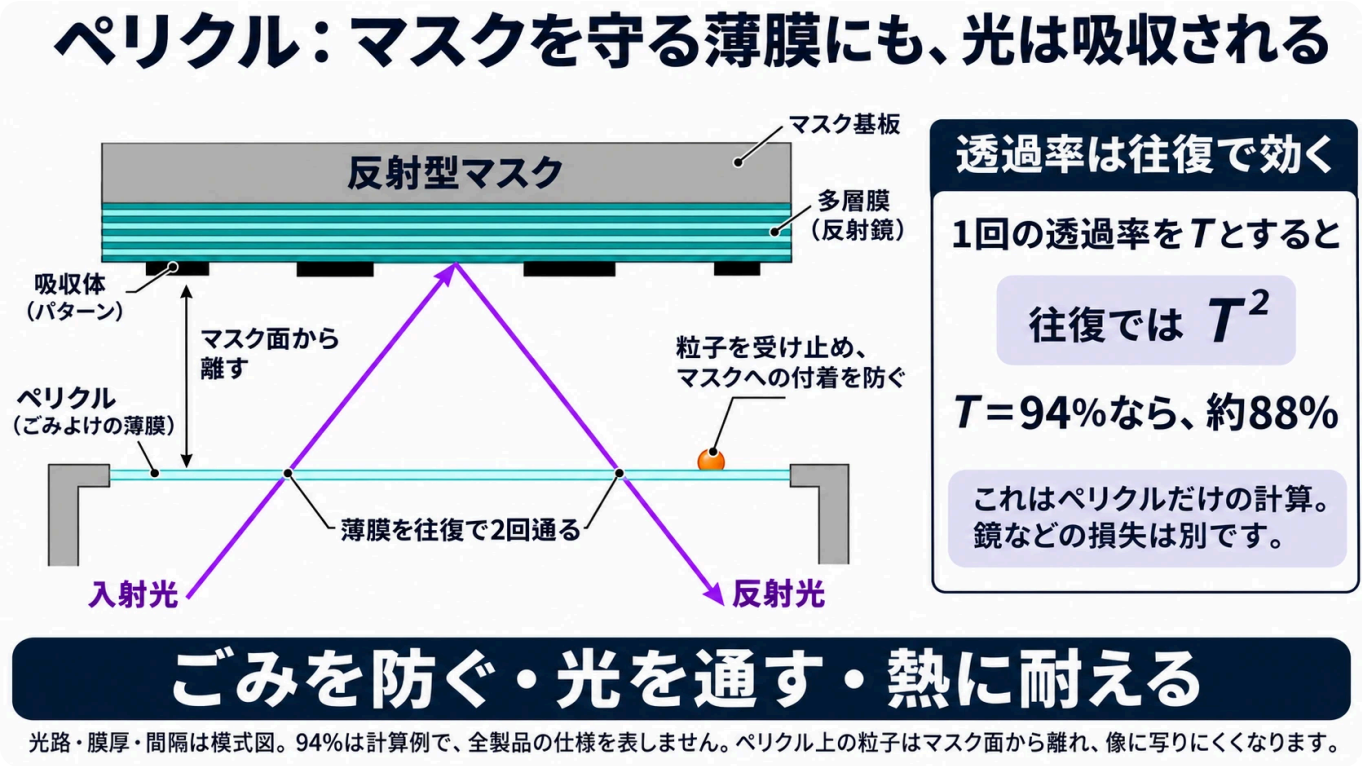


図6　EUVペリクル：ごみから守る薄膜を、光は往復する（概念図）

図の読み方

上に反射型マスク、その下に間隔を空けたペリクルがあります。光は薄膜を通ってマスクに当たり、反射したあと、もう一度薄膜を通ります。膜が粒子を受け止めてマスクへの付着を抑え、粒子をマスク面から離すことで像に写りにくくします。完全に影響がなくなるわけではありません [14]。1回の透過率を94%とした計算例なら、往復は0.94×0.94＝約88%です 本稿の計算 。これはペリクルだけの値で、マスクや光学系の損失は別に加わります。

9. 技術編⑧ — 処理能力と、電力

ASMLの製品ページによると、EUVの装置の処理能力は、世代ごとに次のように上がってきました [11] 事実 。

装置	NA	解像度	処理能力（枚/時）	前提の露光量
NXE:3400B	0.33	13 nm	125以上	20 mJ/cm^2
NXE:3400C	0.33	13 nm	170以上	20 mJ/cm^2
NXE:3600D	0.33	13 nm	160以上	30 mJ/cm^2
NXE:3800E	0.33	13 nm	220以上	30 mJ/cm^2
EXE:5000	0.55	8 nm	110以上	50 mJ/cm^2
EXE:5200B	0.55	8 nm	175以上	50 mJ/cm^2

事実（露光量の条件が違うので、処理能力をそのまま比べることはできません）

EUVの装置は、大量の電力を使います。ASMLの2025年の年次報告によると、NXE:3800Eのウェハ1枚の露光あたりの電力量は**5.5 kWh**で、2018年の基準（12.8 kWh）から57%減りました。同じ報告の表では、EUVの装置（NXE）の消費電力は約1.2〜1.4 MW、ArFの液浸の装置は約0.15〜0.17 MWです [27] 事実。EUVの装置1台で、液浸の装置のおよそ7〜10台分の電力を使う計算です 本稿の計算。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、エネルギーの節約にはならないと書いています（3-6） [2] 事実。



台湾・台南に置かれた、ASMLの航空貨物用の大型コンテナ（Commonsの説明による）。露光装置は分解され、いくつものコンテナに分けて運ばれます。
画像：4300streetcar / Wikimedia Commons / CC BY 4.0（掲載用に縮小・WebP化）

10. 産業編① — 装置：作れるのはASMLだけ

ASML — EUVの台数と売上

ASMLは、2025年の年次報告で、「**ASMLは現在、EUVの露光装置を作る世界で唯一のメーカーである**」と書いています [27] 事実。同社の年次報告（米国SECへの提出書類）によると、EUVの装置の販売台数と売上は、次のように伸びてきました [27] [28] 事実。

年	台数	売上（百万ユーロ）	1台あたりの売上（本稿の計算）
2015年	1	70.5	—
2017年	11	1,101.5	約1億ユーロ
2019年	26	2,799.7	約1.1億ユーロ
2021年	42	6,284.0	約1.5億ユーロ
2023年	53	9,124.0	約1.7億ユーロ
2025年	44（NXE）+4（High-NA）	10,445.8+1,156.9	NXE約2.4億ユーロ、High-NA約2.9億ユーロ

事実（台数と売上は各年の年次報告。2017年の値は翌年の報告で1,084.2百万ユーロに修正されています。ASMLは装置の価格を公表していないので、1台あたりの売上は売上を台数で割った本稿の計算です）

ASMLは、High-NAの装置が**2027年**に量産で使われ始めると見込んでいます [27] 事実 。

● ZEISSとTRUMPF — 光学系とレーザー

EUVの装置は、ASML1社では作れません。ASMLは、ドイツの**Carl Zeiss SMT**を、レンズ、ミラー、照明系、集光ミラーなどの大事な光学部品の「**唯一の供給元**」とし、独占的な取り決めを結んでいると書いています。ASMLは2017年に、Carl Zeiss SMTの持ち株会社の**24.9%**の持分を取得しました [27] 事実 。ZEISSは、これまでに**300を超えるEUVの光学系**を、量産のために納めたとしています [25] 事実 。

光源のCO2レーザーは、ドイツの**TRUMPF**が作ります。同社の2024/25年度の年次報告によると、EUVの事業の売上は**7億2,400万ユーロ**（前年は9億4,300万ユーロ）でした [29] 事実 。ASMLは、取引先の総数を約5,100社としています [27] 事実 。

● チップメーカーの採用

EUVは、ロジックからメモリへと広がっています。

- **Samsung**（2018年）と**TSMC**（2019年）が、7 nm世代でEUVの量産を始めました [18] [19] 事実 。
- **SK hynix**は、2021年、EUVを使った1a世代のDRAMの量産を始めました [40] 事実 。
- **Intel**は、2024年、米国オレゴン州の研究開発拠点で、業界初の商用のHigh-NAの装置（EXE:5000）を組み上げたと発表しました。装置の重さは**165トン**です [42] 事実 。
- **Micron**は、2023年、広島の工場でEUVを使った量産を行い、日本に量産用のEUVを持ち込む最初の半導体の会社になると発表しました [41] 事実 。
- **Rapidus**は、2024年12月に北海道千歳市の工場へEUVの露光装置（NXE:3800E）を運び入れ、2025年4月1日にパターンの露光と現像に成功したと発表しています [43] 事実 。

（MicronとRapidusは、それぞれ自社の発表で「日本初」としています。対象の範囲が違う表現です）

11. 産業編② — 日本の会社が支えるEUV

EUVの露光装置そのものは作れなくても、その周りで、日本の会社が大きな役割を担っています。

● マスクの材料 — AGCとHOYA

EUVのマスクのもとになる**マスクブランクス**（石英の板に多層膜と吸収膜を付けたもの）は、極めて欠陥の少ない多層膜が求められます。**AGC**は、2003年に研究を始め、2017年に量産を始めたとし、「**ガラス材料からコーティングまでを一貫して手がけられる、世界で唯一のEUVマスクブランクスメーカー**」と自社を説明しています。2025年に売上400億円以上、シェア50%を目標にしていました [30] 事実 。**HOYA**は、マスクブランクスで「非常に高い市場シェア」を持つとしつつ、EUVのマスクブランクスでは、顧客が複数の会社から買う方向に徐々に進む可能性があるとしています [31] 事実 。

マスクの検査 — レーザーテック

EUVのマスクの欠陥は、EUVの光を当てなければ見つからないものもあります。**レーザーテック**は、同社の**EUVマスクブランクスの欠陥検査装置が業界標準として採用**され、マスクの欠陥検査装置も最先端のリソグラフィで**高いシェア**を持つとしています（同社の説明。数字は示されていません） [32] 事実 。マスクの検査用のEUVの光源では、**ウシオ電機**が2019年にスズを使った光源の量産向けの初の検収を受け [33] 事実 、**ギガフォトン**も検査用のEUVの光源を展開しています [34] 事実 。

塗布現像、レジスト、ペリクル

- **塗布現像装置**：東京エレクトロンは、EUV露光用の塗布現像装置のシェアを**100%**としています（同社推定） [35] 事実 。
- **レジスト**：東京応化工業は、2025年のEUV用のフォトレジストのシェアを**29.3%で世界1位**としています（富士キメラ総研の資料による） [36] 事実 。富士フイルムは、2024年にEUV用のネガ型のレジストと現像液の販売を始めました [38] 事実 。JSRは、前述のとおりInpriaを買収し、金属酸化物レジストを手がけています [22] 事実 。
- **ペリクル**：三井化学は、2021年に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ました。CNTのペリクルは、新しいプラントの試運転を始め、顧客による評価が進んでいるとしています（2026年8月時点） [39] 事実 。

地域で見ると

分野	強い会社（国）	数字・説明	誰の数字か
EUV露光装置	ASML（オランダ）	世界で唯一のメーカー	同社 [27]
光学系	Carl Zeiss SMT（ドイツ）	ASMLの唯一の供給元、300超の光学系	ASML [27]、ZEISS [25]
レーザー	TRUMPF（ドイツ）	EUVの売上7.24億ユーロ	同社 [29]
マスクブランクス	AGC・HOYA（日本）	AGCは「世界で唯一の一貫メーカー」、HOYAは「非常に高いシェア」	各社 [30] [31]
マスクの検査	レーザーテック（日本）	ブランクスの検査装置が業界標準	同社 [32]
塗布現像装置	東京エレクトロン（日本）	EUV用100%	同社推定 [35]
EUVレジスト	東京応化工業（日本）	29.3%・世界1位	富士キメラ総研の資料による同社の説明 [36]
ペリクル	三井化学（日本）	2021年にEUV用の商業生産	同社 [39]

事実

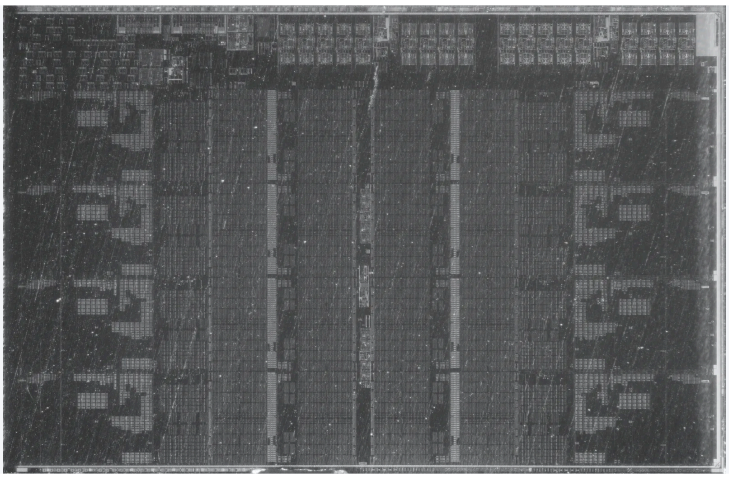
露光装置の全体では、ASMLが世界の売上の**91%**を占めます（経済産業省、グローバルネット社の資料をもとに作成） [37] 事実 。

輸出規制

EUVの装置は、輸出の許可の対象です。ASMLは、2023年の発表で、EUVの装置の販売は**すでに制限されている**と書き[45] 事実 、日本の貨物等省令には、EUV用のペリクルとその製造装置、EUV用の塗布現像装置、EUVのマスクブランクスの検査装置、EUVのマスクブランクスなどが、輸出の許可が必要な品目として並んでいます（2026年11月時点の条文）[44] 事実 。EUVの供給網の多くの部分を、日本の会社が担っていることが、規制の品目からも読み取れます 解説 。



打ち上げ前の試験中の、NASAの太陽観測衛星SDOの望遠鏡群AIA。極端紫外線で太陽を撮影します（Commonsの説明による）。宇宙の観測でも、EUVの光は多層膜の鏡で集めます。
画像：NASA/Jack Pfaller / Wikimedia Commons / パブリックドメイン（掲載用に縮小・WebP化）



AMDのプロセッサ（Ryzen 5 7600、Zen 4）のCPUのチップを、近赤外線で撮影した写真。チップの大きさは約10.4 mm × 6.7 mmです（Commonsの説明による）。5 nm世代で作られています（Commonsのファイル名による）。
画像：FritzchensFritz / Wikimedia Commons / CC0（掲載用に縮小・WebP化）

12. これから求められること

- **High-NAの量産**：ASMLは2027年の量産での利用開始を見込んでいます [27] 事実 。1回に焼ける範囲が半分になるので、大きなチップのつなぎ合わせや、より大きなマスクの検討が進んでいます [1] 事実 。
- **確率的な欠陥との戦い**：同じ光源出力で露光量を増やすと、処理能力が落ちる方向になります。光源の出力の向上（1 kWへ） [1] と、光をよく吸収するレジスト（金属酸化物、ドライレジスト） [1][22][23] の両方が求められます 事実 。
- **マスクの3D効果**：新しい吸収膜の材料が必要です [1] 事実 。
- **電力**：ASMLは、ウェハ1枚の露光あたりの電力量を、2027年に4.7 kWhに減らす目標を掲げています [27] 事実 。

素材の技術者の出番

EUVは、**材料の技術者の総力戦**です 解説 。

- **多層膜**：原子十数個ぶんの厚さの膜を40対、欠陥なく積む技術（[3][30]）
- **吸収膜**：マスクの3D効果を減らす新しい材料（[1]）
- **レジスト**：光をよく吸収し、少ない光子で反応する金属酸化物やドライレジストの化学（[1][22][23]）
- **ペリクル**：13 nmの膜や、CNTの膜で、光を通しながら熱と水素に耐える材料（[14][21]）
- **光源の材料**：スズの液滴の扱いと、ミラーをスズの汚れから守る水素の化学（[4]）

日本の先駆的な研究から、米国の国立研究所や企業、欧州の装置・光学系、各国の材料やチップメーカーへと開発がつながりました。今も日本の材料と装置の会社が大きな役割を担っています。材料や表面の化学の知識が、世界の最先端を左右しています。

13. まとめと次回予告

視点	ポイント
波長	13.5 nm（ArFの約1/14）。多層膜ミラーとスズのプラズマの都合で決まった
真空と鏡	あらゆる物質に吸収される→真空、反射光学系。Mo/Si 40対は研究例。反射率67%の鏡10回なら約2%
マスク	反射型。6°の斜め入射によるマスクの3D効果
光源	スズの液滴に2段のCO2レーザー、秒間5万回。変換効率約5%。10 W未満→250 W→600 W
歴史	NTTの木下が1985年に成功・1986年に発表。1997年EUV LLC。2006年ASMLの実証機、2018〜19年に量産
High-NA	NA 0.55、8 nm。縦横で縮小率の違う光学系、露光範囲は半分、焦点深度は約0.36倍
確率的欠陥	光子1個92 eV、ArFの約14倍。10 nm角で約2,000個→ばらつき約2%
産業	装置はASMLのみ。ZEISS・TRUMPF。日本はマスクの材料・検査、塗布現像、レジスト、ペリクル

次回は**3-8「エッチング（プラズマの物理）」**です。リソグラフィで作ったレジストの「型紙」を使って、下の膜を削り取る技術です。3-3のPECVDで見たプラズマが、今度は「削る」ために使われます。

14. 確認クイズ

1. EUVの露光装置で、レンズではなく鏡を使い、装置の中を真空にするのはなぜですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 13.5 nmのEUVの光は、空気もガラスも含めて、あらゆる物質に吸収されてしまうからです。光を通すレンズは作れないので、多層膜で反射させる鏡で光を運びます。

2. Mo/Siの多層膜ミラーで、強い反射が得られるしくみを説明してください。

> **▼ 答えを見る**
>
> モリブデンとシリコンを交互に何十層も重ね、各境目で反射した弱い光の山と山をそろえて強め合わせます（ブラッグの条件）。真上から当たる光なら、屈折率などを省く近似では1周期は波長のおよそ半分です。研究例では約6.9 nmですが、厳密な設計には入射角や材料の光学特性も必要です。

3. 反射率67%のミラーで10回反射すると、光はどれだけ残りますか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 0.67の10乗で約0.018、つまり約2%です。

4. EUVの光源で、スズの液滴にレーザーを2回当てるのはなぜですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 1回目の弱いパルスで液滴を平たくし、2回目の強いパルスでスズを蒸発させて高温のプラズマにし、EUVの光を効率よく出させるためです。

5. 光子1個のエネルギーは、EUV（13.5 nm）とArF（193 nm）で何倍違いますか。

> **▼ 答えを見る**
>
> $E=hc/\lambda$ なので、波長の比 $193\div13.5\fallingdotseq14$倍です。EUVは約92 eV、ArFは約6.4 eVです。

6. 同じ露光量で、EUVの方が確率的な欠陥が起きやすいのはなぜですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 光子1個のエネルギーが大きいので、同じエネルギーでも光子の数が約14分の1になるからです。光子の数のばらつきは$1/\sqrt{N}$の割合なので、数が少ないほど相対的なばらつきが大きくなり、吸収や電子・化学反応のばらつきとともに、線のがたつきや抜け・つながりに関わります。ArFでもショットノイズはあります。

7. 確率的な欠陥を減らすために露光量を増やすと、どんな問題がありますか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 1枚のウェハを露光するのに時間がかかり、処理できるウェハの枚数が減るので、コストが上がります。

8. High-NA（NA 0.55）の装置で、マスクの模様を縦と横で違う倍率に縮小するのはなぜですか。また、その代償は何ですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> NAを上げると光がマスクに当たる角度が大きくなり、反射型のマスクが光を反射しにくくなるので、一方向の縮小率を8分の1にして角度を抑えています。代償として、1回に焼ける範囲が26 mm×16.5 mmと半分になります。

9. EUVのリソグラフィの研究を始めたのは誰ですか。最初の発表はいつでしたか。

> **▼ 答えを見る**
>
> NTTの木下博雄です。1985年にパターンの形成に成功し、1986年秋に応用物理学会で発表しました。

0. EUVの露光装置の周りで、日本の会社が強い分野を3つ挙げてください。

> **▼ 答えを見る**
>
> マスクブランクス（AGC、HOYA）、マスクの検査装置（レーザーテック）、塗布現像装置（東京エレクトロン）、EUV用のレジスト（東京応化工業など）、ペリクル（三井化学）などです。

15. 用語集

EUV（極端紫外線）
波長が10〜数十nmほどの紫外線。半導体の露光には13.5 nmを使う。

多層膜ミラー
2つの物質の薄い膜を交互に何十層も重ね、干渉で強く反射させる鏡。

ブラッグの条件
多層の構造で反射した光の山がそろって強め合う条件。2d＝λは、真上からの入射で屈折率などを省いた最も単純な近似。

反射型マスク
光を通すのではなく反射させるマスク。多層膜の上に、光を吸収する膜で模様を作る。

マスクブランクス
マスクのもとになる、石英の板に多層膜と吸収膜を付けた板。

マスクの3D効果
斜めから当てた光に対し、マスクの吸収膜の厚みが影を作るなどして、像がゆがむ現象。

LPP（レーザー生成プラズマ）光源
スズの液滴にレーザーを当てて作るプラズマから、EUVの光を出す光源。

変換効率
レーザーのエネルギーのうち、EUVの光のエネルギーに変わる割合。

中間集光点
光源で集めたEUVの光が、照明系に入る前に集まる点。光源の出力はここで測る。

コレクター
プラズマから出た光を集める、お椀形の多層膜ミラー。

デブリ
プラズマから飛び散るスズのかけらやイオン。

High-NA
NAを0.55に上げたEUVの装置。解像度8 nm。

アナモルフィック光学系
縦と横で縮小率が違う光学系。High-NAでは4分の1と8分の1。

スティッチング
2回の露光をつなぎ合わせて、大きなチップを作ること。

光子ショットノイズ
光子の数がでたらめにばらつくこと。独立な到来のモデルでは平均Nに対して標準偏差は√N、相対的な標準偏差は1／√N。

確率的欠陥（ストカスティクス）
光子や分子の数のばらつきによって、でたらめに起こる線の切れ・つながり・穴の抜けなどの欠陥。

金属酸化物レジスト
金属を含み、EUVの光をよく吸収するレジスト。

ドライレジスト
液体で塗るのではなく、気体から膜として積むレジスト。

EUVペリクル
マスクから離して設置する、極めて薄いごみよけの膜。EUVを一部吸収し、光は往復で2回通る。

CNTペリクル
カーボンナノチューブの膜でできたペリクル。

16. 参考資料（一次情報）

1. **IRDS**「2023 Update, Lithography（PDF p.5〜10）」 — 資料を開く
2. **IRDS**「2022 Edition, Lithography（PDF p.9、p.12）」 — 資料を開く
3. **C. Montcalm, S. Bajt ほか（ローレンス・リバモア国立研究所）**「Multilayer reflective coatings for extreme-ultraviolet lithography（UCRL-JC-128289、1998年、p.3〜4）」 — 資料を開く
4. **I. Fomenkov ほか（ASML／Cymer）**「Light sources for high-volume manufacturing EUV lithography, Adv. Opt. Techn. 6(3-4), 173–186（2017年、p.2〜4、p.8、p.10）」 — 資料を開く
5. **H. Mizoguchi ほか（ギガフォトン）**「Performance of 100-W HVM LPP-EUV source, Adv. Opt. Techn. 4(4), 297–309（2015年、p.1〜2）」 — 資料を開く
6. **A. Erdmann ほか（フラウンホーファーIISB、imec）**「Characterization and mitigation of 3D mask effects in extreme ultraviolet lithography, Adv. Opt. Techn. 6, 187–201（2017年、p.1、p.3）」 — 資料を開く
7. **木下博雄**「巻頭言「加工と計測：ナノからピコの時代を迎えて」（光学 34巻3号）」 — 資料を開く
8. **芳賀恒之（NTT-AT）**「The Early Days of R&D on EUV Lithography and Future Expectations, J. Photopolym. Sci. Technol. 31(2), 193（2018年、p.3〜4）」 — 資料を開く
9. **ASML**「Making EUV: from lab to fab（2022年3月30日）」 — 資料を開く
10. **ASML**「EUV lithography systems」 — 資料を開く
11. **ASML**「製品ページ（TWINSCAN NXE:3400B、3400C、3600D、3800E、EXE:5000、5200B）」 — 資料を開く
12. **ASML**「5 things you should know about High NA EUV lithography（2024年1月25日）」 — 資料を開く
13. **ASML**「Leibinger award recognizes EUV innovations（2021年10月22日）」 — 資料を開く
14. **ASML**「Indistinguishable from magic: the EUV pellicle（2022年9月14日）」 — 資料を開く
15. **ASML**「Lithography principles: Light and lasers」 — 資料を開く
16. **ASML**「Lithography principles: Lenses and mirrors」 — 資料を開く
17. **ローレンス・バークレー国立研究所**「"Superchips" Partnership Teams Intel and Three National Labs（1997年9月19日）」 — 資料を開く
18. **Samsung**「Samsung Electronics Starts Production of EUV-based 7nm LPP Process（2018年10月18日）」 — 資料を開く
19. **TSMC**「TSMC's N7+ Technology is First EUV Process Delivering Customer Products to Market in High Volume（2019年10月7日）」 — 資料を開く
20. **imec**「Imec pushes the limits of EUV lithography single exposure for future logic and memory applications（imec Magazine、2018年3月）」 — 資料を開く
21. **imec**「Imec and Mitsui Chemicals sign strategic partnership agreement to commercialize CNT pellicle（2023年12月14日）」 — 資料を開く
22. **JSR**「JSR Agrees to Acquire EUV Pioneer Inpria Corporation（2021年9月）」 — 資料を開く
23. **Lam Research**「Breakthrough EUV Dry Photoresist Technology from Lam Research Adopted by Leading Memory Manufacturer（2025年1月29日）」 — 資料を開く
24. **ZEISS SMT**「High-NA-EUV lithography（プレスリリース、2024年1月30日）」 — 資料を開く
25. **ZEISS SMT**「EUV lithography」 — 資料を開く
26. **NIST**「CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants（h、c、e）」 — 資料を開く
27. **ASML**「Annual Report 2025（印刷 p.16〜17、p.20、p.41、p.68、p.168〜169、p.174、p.176、p.286）」 — 資料を開く
28. **ASML（米国SEC提出 Form 20-F、2017〜2024年度）**「Net system sales per technology」 — 資料を開く
29. **TRUMPF**「Geschäftsbericht 2024/25（年次報告、PDF p.2、p.40〜41）」 — 資料を開く
30. **AGC**「EUV露光用フォトマスクブランクスの生産能力を増強（2020年7月27日）」 — 資料を開く
31. **HOYA**「統合報告書2025（PDF p.4、p.87〜88）」 — 資料を開く
32. **レーザーテック**「会社案内（2026年3月、p.4、p.6）」 — 資料を開く
33. **ウシオ電機**「ニュースリリース（2019年7月17日、マスク検査用EUV光源の量産向け初検収）」 — 資料を開く

34. **ギガフォトン**「ニュース（2026年8月28日、検査用LPP-EUV光源）」 — 資料を開く

35. **東京エレクトロン**「統合報告書2026（p.15、p.48）」 — 資料を開く

36. **東京応化工業**「統合レポート2026（PDF p.12）」 — 資料を開く

37. **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）」 — 資料を開く

38. **富士フイルム**「EUV用ネガ型レジストと現像液の販売開始（2024年10月29日）」 — 資料を開く

39. **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）／2026年度第1四半期決算 質疑応答（2026年8月14日）」 — 資料を開く

40. **SK hynix**「SK hynix Starts Mass Production of 1anm DRAM Using EUV Equipment（2021年7月12日）」 — 資料を開く

41. **Micron**「Micron to Bring EUV Technology to Japan, Advancing Next-Generation Memory Manufacturing（2023年5月17日）」 — 資料を開く

42. **Intel**「Intel Foundry Achieves Major Milestone with High NA EUV（2024年4月18日）」 — 資料を開く

43. **Rapidus**「日本で初めて量産対応EUV露光装置をIIM-1へ設置開始（2024年12月18日）／2nm GAAトランジスタの試作（2025年7月18日）」 — 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号ほか、2026年11月7日時点）」 — 資料を開く

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

17. 主張と出典の対応表

本文の主張	根拠	区分
波長は多層膜ミラーで決まる、マスク3D効果に新しい吸収膜、600 W・1 kW、26 mm×16.5 mm・スティッチング・大型マスク、レジスト20 nm未満、ストカスティクスの定義・4世代で露光量約3倍・薄い膜と吸収、CARと金属酸化物レジスト・1.5 nm世代以降・High-NA	IRDS 2023 [1]	事実
40 nmピッチの穴60 mJ/cm²、13 nm L/S 50 mJ/cm²、EUVはエネルギーを節約しない	IRDS 2022 [2]	事実
Mo/Si 40対・周期6.89 nm・Mo 2.8 nm・Si 4.1 nm、67.5%、70%以上を目標	LLNL [3]	事実
スペクトルがMo/Siと合う、10回反射・67%で約2%、変換効率約5%・20 kWで200 W・6%、CO2 10.6 μm、液滴約30 μm・50 kHz、コレクターの寿命・水素・水素ラジカル	Fomenkov ほか [4]	事実
磁場でスズのイオンを閉じ込め、140 W	ギガフォトン [5]	事実
6°の入射、80 nmのタンタル系吸収膜、影と寸法の差、約50 nm入り込む	Erdmann ほか [6]	事実
1983年ごろ等倍から縮小へ、高エネルギー物理学研究所、1985年に成功、1986年秋に応用物理学会・眉唾もの、1993年の国際会議	木下 [7]	事実
1984年ごろNTTの木下が開始、1986年に初報告	芳賀 [8]	事実
4〜40 nm→13.5 nm、木下の言葉と学会名、太陽の表面の40倍、250 Wで125枚/時、2019年Galaxy Note10	ASML [9]	事実
あらゆるものに吸収され真空、反射型のレチクル・4分の1、2006年8月の実証機、2013年NXE:3300、17年で60億ユーロ超、Cymer買収	ASML [10]	事実
各装置のNA・解像度・処理能力・露光量、High-NA 8 nm・1.7倍・2.9倍	ASML製品ページ [11]	事実
4倍と8倍の縮小、8 G・32 G	ASML [12]	事実
10 W未満、80 Wの壁	ASML [13]	事実
ペリクル13 nm・500 ℃・完全に通す材料はない	ASML [14]	事実
液滴約25 μm・秒速70 m・2段のパルス・秒間5万回	ASML [15]	事実
レンズはない、100層超の多層膜ミラー	ASML [16]	事実
1997年EUV LLC、3年2.5億ドル、DOE史上最大のCRADA	LBNL [17]	事実
2018年7LPP、ArFで最大4枚→1枚、マスク約20%減	Samsung [18]	事実

本文の主張	根拠	区分
N7+は業界初の商用EUV	TSMC [19]	事実
EUVは空気を通らない、光子が少なく欠陥、20 mJ/cm²の目標とより多い露光量	imec [20]	事実
CNTペリクル94%以上・1 kW超	imec・三井化学 [21]	事実
Inpriaを5億1,400万ドルで買収	JSR [22]	事実
ドライレジスト、2020年、DRAMで採用、薬品5〜10分の1	Lam [23]	事実
High-NAの投影光学系4万部品超・約12トン	ZEISS [24]	事実
ドイツ大で凹凸約0.1 mm、約2万部品・2トン、300超の光学系	ZEISS [25]	事実
h、c、eの値	NIST [26]	事実
世界で唯一のメーカー、2027年にHigh-NAの量産利用、NXE:3400Bが最初の100枚/時超の量産機、2025年の台数と売上、Zeissは唯一の供給元・24.9%、約5,100社、5.5 kWh・12.8 kWh・57%減・4.7 kWh目標、消費電力の表	ASML AR2025 [27]	事実
2015〜2023年のEUVの台数と売上	ASML 20-F [28]（SEC原文で確認）	事実
EUVの売上7.24億ユーロ（前年9.43億）	TRUMPF [29]	事実
2003年研究開始・2017年量産、世界で唯一の一貫メーカー、2025年に400億円以上・シェア50%の目標	AGC [30]	事実
非常に高いシェア、複数社購買の可能性	HOYA [31]	事実
ブランクスの検査装置が業界標準、マスクの検査装置で高いシェア	レーザーテック [32]	事実
マスク検査用のスズのEUV光源の量産向け初検収	ウシオ電機 [33]	事実
検査用のLPP-EUV光源	ギガフォトン [34]	事実
EUV用の塗布現像装置100%（同社推定）	東京エレクトロン [35]	事実
EUV用レジスト29.3%・世界1位	東京応化工業 [36]	事実
露光装置でASML 91%	経済産業省 [37]	事実
EUV用ネガ型レジストと現像液の販売開始	富士フイルム [38]	事実
2021年にEUVペリクルの商業生産、CNTの試運転と顧客評価	三井化学 [39]	事実
1a世代のDRAMでEUVの量産	SK hynix [40]	事実
日本に量産用のEUVを持ち込む最初の会社	Micron [41]	事実

本文の主張	根拠	区分
業界初の商用High-NA、165トン	Intel [42]	事実
2024年12月に搬入、2025年4月1日に露光と現像に成功	Rapidus [43]	事実
EUV関連の規制品目	e-Gov [44]	事実
EUVの販売はすでに制限	ASML [45]	事実
193÷13.5≒14、k1約0.32・0.33、d≒6.75 nm、0.67^{10}≒1.8%・0.70^{10}≒2.8%、0.4 J・5 mJ、30年超、0.36倍、光子のエネルギー92 eV・6.4 eV、約2,000個・約29,000個、2.2%・0.6%、1台あたりの売上、電力7〜10台分	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
ペリクルの往復透過率0.94^2≒88%	1回94%とした例による本稿の計算。全製品の仕様ではない	本稿の計算
多層膜の層は原子十数個ぶん	層の厚さ2.8〜4.1 nmと原子の大きさからの目安	推測

最終更新：2026年11月7日／技術は原論文・米国の国立研究所の資料・IRDS（国際ロードマップ）・研究機関（imec）と各社の技術資料、歴史は開発者本人と関係者の記述、企業の情報は各社の年次報告書（米国SEC提出書類を含む）・統合報告書・製品ページ・プレスリリース、地域別の数字は経済産業省を出典としています。「世界初」「唯一」「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。

© 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。