

前回の復習:

高誘電率(high-k)材料: MOS-FETをスケーリング(比例縮小)則で微細化すると、ゲート絶縁膜が薄くなり過ぎて耐電圧が不足し、トンネル効果によるゲートリーク電流が増加する。さらに、ゲート電圧 V_G によるソース・ドレイン電流 I_D のon/off切替が弱くなり、ソース・ドレインリーク電流も増加する。これを回避するためにゲート酸化膜を高誘電率(high-k)材料の膜に変えて静電容量 C_0 を大きく保つ必要がある。

低誘電率(low-k)材料: スケーリング則による微細化が進むと、ゲート長が短くなりMOS-FETは速く動く。しかし、金属配線は断面積が減り電気抵抗 R が増える。さらに配線間距離も短くなり配線間寄生容量 C も増える。そのため、配線での RC 時定数による遅れが長くなる。これを改善するために、低誘電率(low-k)材料を配線間絶縁に使う。

前回の復習:CVD法によるポリシリコン(多結晶Si)膜の成膜
ポリシリコンは、ゲート電極、配線(プラグ)、金属とSiとの接触抵抗を減らすためのバッファーとして使われる。成膜は減圧CVD (10~100 Pa)で、シラン(SiH_4)を原料にして成膜する。低温成膜なので単結晶ではなく多結晶Siができる。

また、成膜中に PH_3 や AsH_3 をシランに混ぜて不純物ドーピングすることもできるが、比抵抗等は成膜条件で変化する。

ポリシリコンは比抵抗が $\sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 程度で高抵抗なので、上部に金属を成膜して、金属シリサイドにして抵抗を減らす。

高融点金属・シリサイドの比抵抗

メタル・シリサイド	融点 (°C)	比抵抗 ($\mu\Omega\text{cm}$)
W タングステン	3410	3.3
WSi ₂ タングステンシリサイド	2050	33.4
Mo モリブデン	2625	3.4
MoSi ₂ モリブデンシリサイド	1870	21.5
Ta タンタル	2850	13
TaSi ₂ タンタルシリサイド	2400	8.5
Ti チタン	1820	54
TiSi ₂ チタンシリサイド	1540	123

前回の復習:

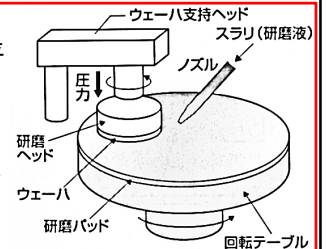
Al電極・配線形成

Alは成膜が容易で、Siとオーミック接触し、 SiO_2 との密着性も良いため、電極や配線として良く使われる。一方、Alは約300°C程度からSiとの合金化が始まり577°Cで合金化してしまうので、Al成膜後の工程は500°C程度に制限される。Alは主にスパッタリングで成膜する。

Cu電極・配線形成: CuはAlより抵抗率が低く、高融点でエレクトロマイグレーションによる断線が起きにくいので、Alより優れた配線材料である。一方、Siや SiO_2 内に拡散し易く、 SiO_2 との密着性も悪い。ダマシン(象嵌)法が2000年頃に開発されて実用化した。絶縁膜にプラグ用の穴と配線用の溝をフォトリソでつくり、そこに銅をメッキ法で成膜する。その後に、CMPで平坦化する。

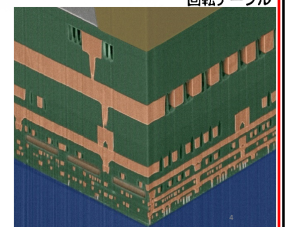
前回の復習: 平坦化技術:

配線の多層化には、表面の平坦化技術が必須である。化学機械研磨(CMP)法は、ウェハー全体を平面にでき、プラズマ損傷が起こらず、低コストのため良く使われる。

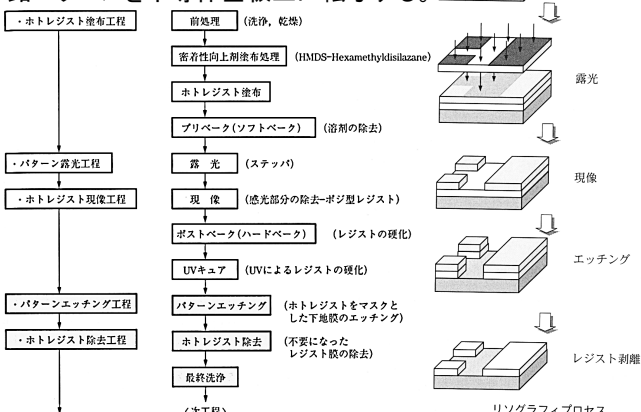


多層配線技術:

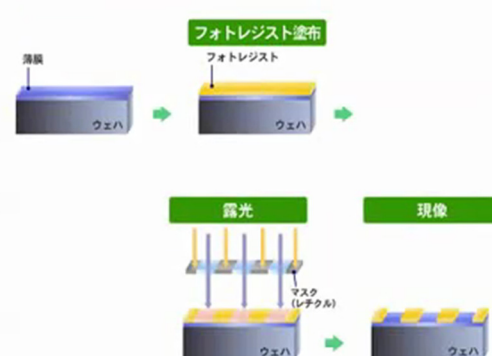
微細化による素子の高密度化に伴い、配線の多層化が進んだ。最近の金属配線は、low-k配線間絶縁膜とCuのダマシン法でつくられる。



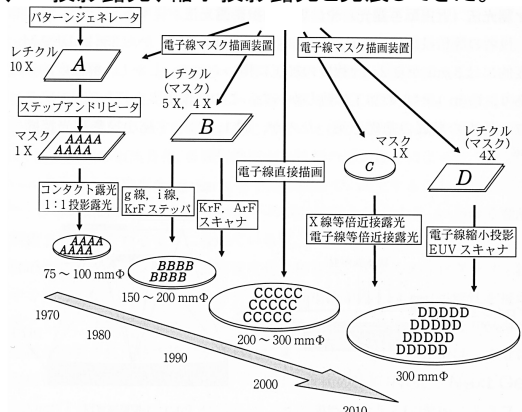
リソグラフィ技術: フォトマスク上の回路パターンを半導体基板上に転写する。



フォトリソグラフィの流れ(ステッパー方式):



リソグラフィ技術の変遷: コンタクト露光、プロキシミティ露光、1:1投影露光、縮小投影露光と発展してきた。

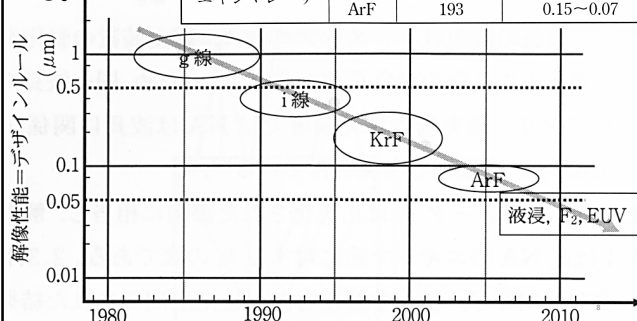


リソグラフィ技術の光源:

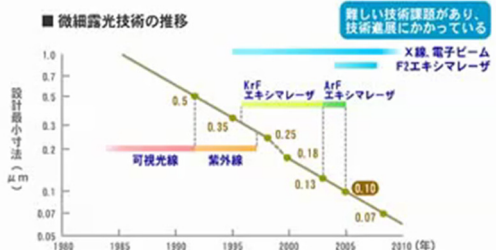
年々、露光波長とデザインルールが短くなっている。

露光光源の種類

種類	波長 (nm)	加工寸法 (μm)
高圧水銀ランプ	g 線	436
	i 線	365
エキシマレーザ	KrF	248
	ArF	193



露光光源の変遷:



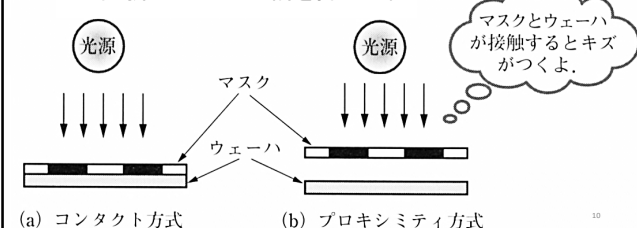
■ 各種露光技術の比較

	光露光	電子線露光	X線露光
解像度	△	○	○
焦点深度	△	○	○
露光速度	△	○	○
装置面積	△	○	×

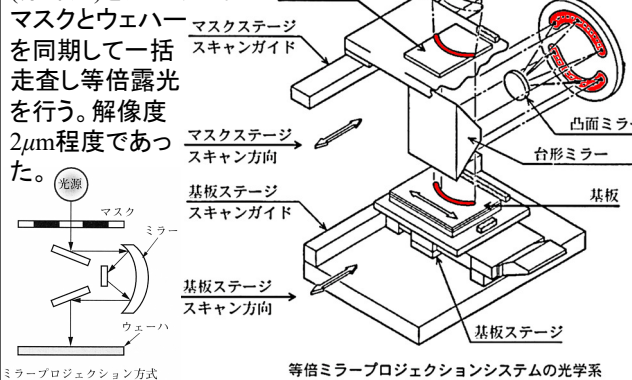
初期(1970年代)の光露光装置:

等倍露光

- 密着方式(コンタクトアライナ)解像度サブμm、マスク損傷が起きる。
- 近接方式(プロキシミティアライナ)解像度4μm程度。解像度が低下する。入射光に角度分布を付けて、フレネル回折による干渉縞を抑える。

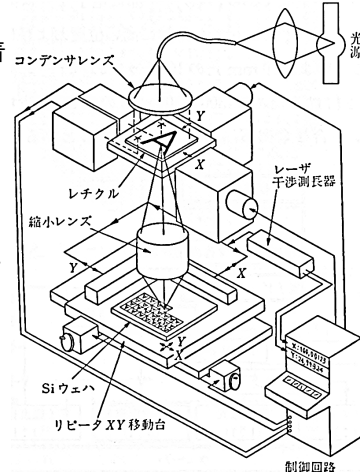


ミラープロジェクション方式(1980年前後): 凹凸面鏡の組を用いて、円弧状の光(赤部分)を照射する。

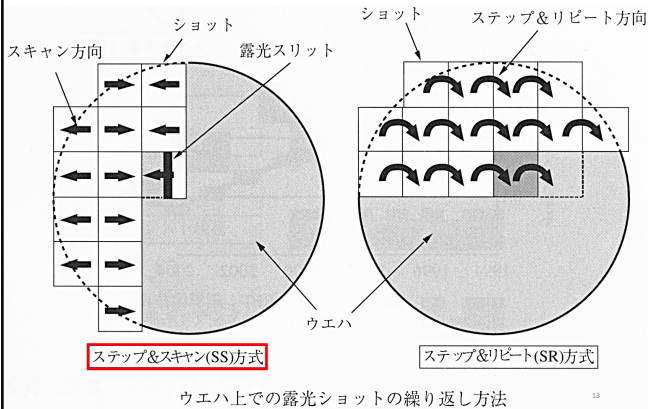


縮小投影露光法:

従来はレチクルから(密着方式の)マスクを作る方法であった。高解像度が得られる。1チップ毎にウェーハを移動し露光するので、高いアラインメント精度が必要である。1ショット毎にウェーハを移動するステッパー(SR)装置と、細長い露光領域を持ちレチクル(マスク)とウェーハを同期させて移動させるスキャナー(SS)装置がある。



近年はチップサイズが大きくなったので、露光面積が稼げるステップ&スキャン方式が主流である。



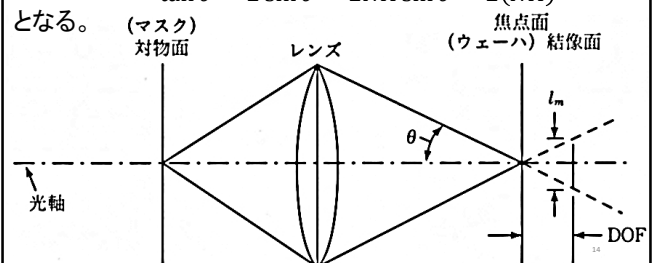
投影露光装置の解像度: 解像度 l_m は、

$$l_m = \frac{k_1 \lambda}{NA}, \quad (NA \equiv \tilde{n} \sin \theta : \text{レンズの開口数})$$

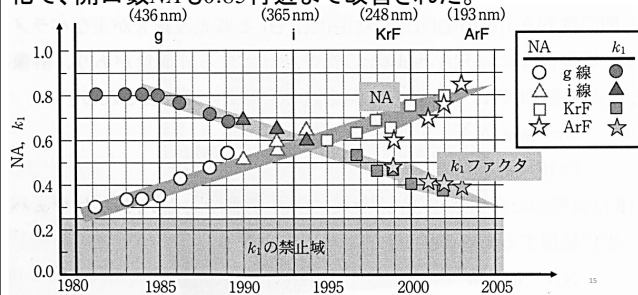
\tilde{n} : 屈折率、 k_1 : 比例定数

となる。また、焦点深度DOFは、

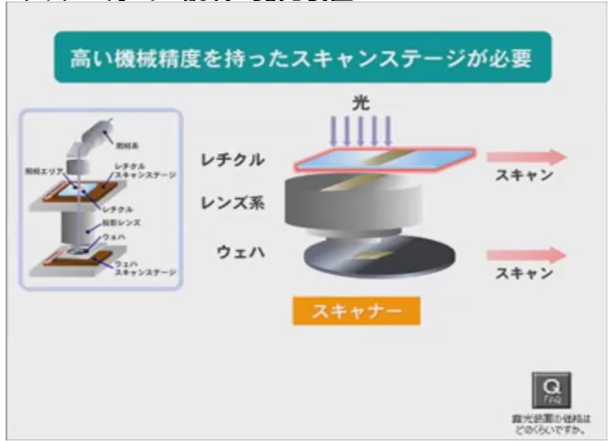
$$DOF = \frac{l_m/2}{\tan \theta} \approx \frac{l_m}{2 \sin \theta} \approx \frac{k_1 \lambda}{2 NA \sin \theta} \approx \frac{k_1 \tilde{n} \lambda}{2 (NA)^2},$$



ArFエキシマレーザー($\lambda=193\text{nm}$)の1/4倍縮小では $l_m=100\text{nm}$ 程度の解像度が得られる。比例定数 k_1 は、レジストやマスク、露光装置のセッティングなどに依存するが、解像力向上技術の進歩で0.8程度が0.4程度まで改善された。同時に、光学設計技術の進歩、非球面レンズの導入、光源の単色化で、開口数 NA も0.85付近まで改善された。

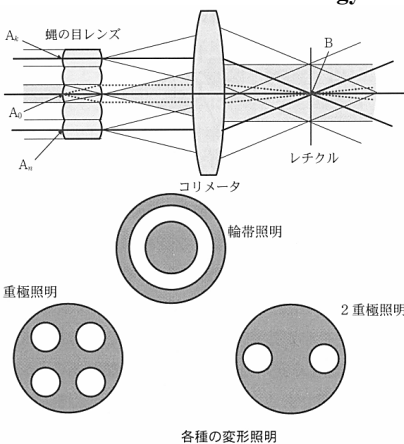


スキャナー方式の説明と露光装置:

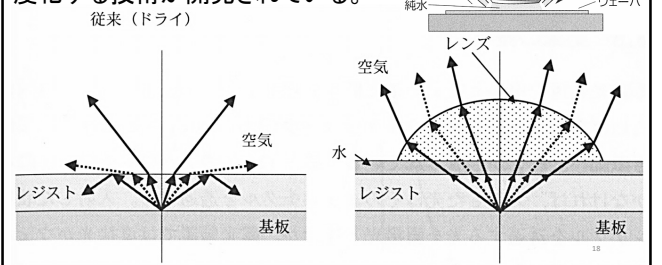


解像力向上技術(Resolution Enhancement Technology: RET): 変形照明:

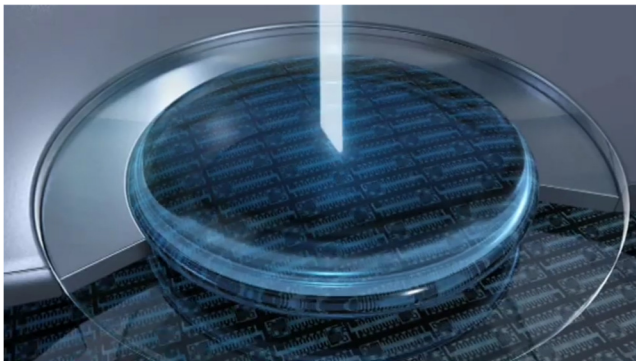
コリメータレンズの前焦平面(右上図の蠅の目レンズの直後)に各種の絞りを置いて、入射光の入射角を特定の角度に制限すると、比例定数 k_1 が改善される。しかし、各マスクパターン毎に最適な照明形状をカスタマイズしなければならない。



液浸技術: 露光装置の光学レンズとSiウエハの間を、屈折率の大きい超純水($\tilde{n}=1.44$)で満たし、見かけの開口数 NA を1.0よりも大きくして解像度 $l_m(=k_1 \lambda / NA)$ を小さくする。現在は、7nmプロセス・ノードまで高解像度化する技術が開発されている。



液浸露光装置:



19

ダブルパターニング(DP):

解像度 l_m 以下の微細パターンを作る。

シングルパターニング

最小ピッチ

レジスト塗布・露光・現像

エッチング

レジスト剥離

レジスト塗布・露光・現像

エッチング

レジスト塗布・露光・現像

エッチング

エッチング

で示した幅がこの露光装置で描画できる最小線幅

Self-Aligned DP: SADP

ハードマスク

レジスト塗布・露光・現像

エッチング

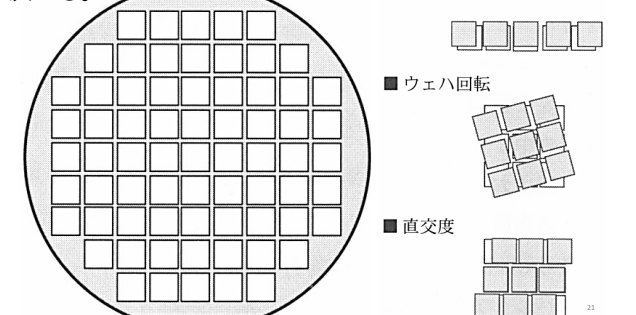
成膜

エッチバック

洗浄 (ハードマスク除去)

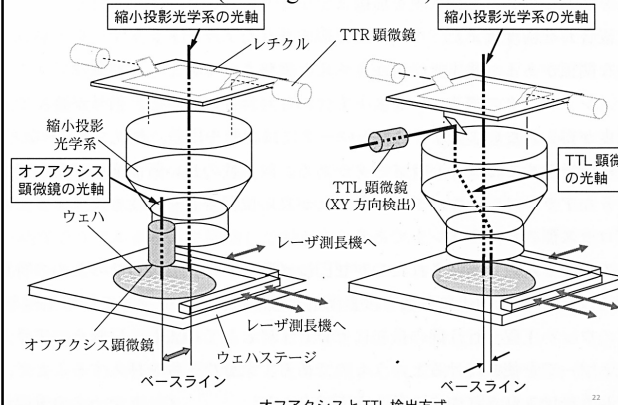
エッチング

オーバーレイ精度: リソグラフィーの工程では、高い位置合わせ精度(解像度 l_m の1/4以下)が要求される。ウェハ上にアラインメントマークという基準点をあらかじめ作っておき、その位置を基準顕微鏡で観察して、ウェハの露光位置を決める。



21

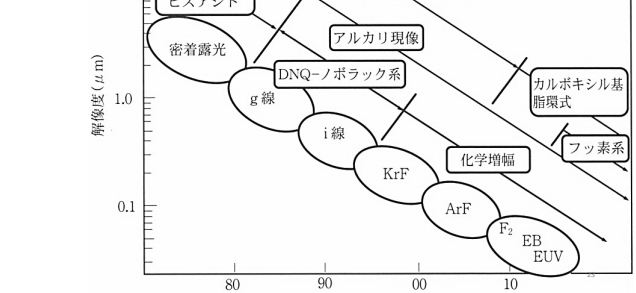
ウェハの絶対位置は、レーザ測長機で測定する。オフアクシス方式とTTL(Through The Lens)方式がある。



22

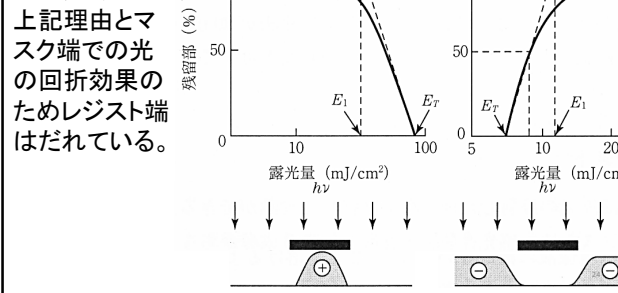
フォトレジスト: 現像時に感光した部分が溶媒に溶けるポジ型と、感光した部分が溶媒に不溶になるネガ型がある。

フォトレジストは、露光装置の短波長化に対応して、様々なものが開発されてきた。

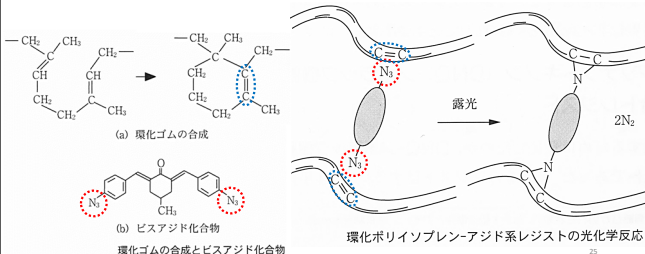


フォトレジストの感光: ポジ型(ネガ型)は E_T 以上(以下)の露光量で露光した後に現像すると溶けて無くなる。この時コントラスト比 γ は、 $\gamma = 1/\ln(E_T/E_1)$, ($\gamma = 1/\ln(E_1/E_T)$),と定義される。 γ が大きい程コントラストの良いシャープな回路パターンが作れる。

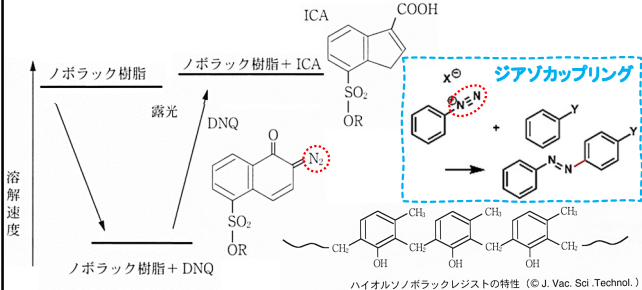
また、一般には、上記理由とマスク端での光の回折効果のためレジスト端はだれている。



ビスアジド系化合物+環化ゴム系樹脂: 初期(1970年代)には、ビスアジド系化合物+環化ゴム系樹脂のネガ型レジストが使われた。アジド化合物が感光すると環化ゴム間で架橋反応が起こり、3次元網目構造が形成されて溶媒に不溶となる。しかし、現像時に体積が膨張して、パターンが変形する欠点があり、解像度は2~3 μm 程度であった。

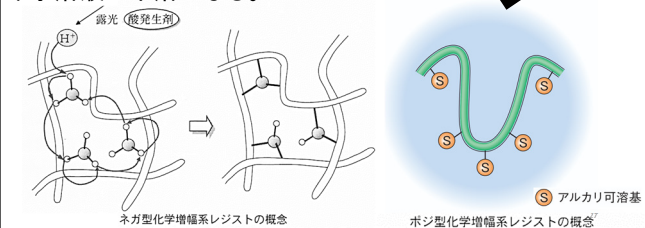


ジアゾナフトキノ(DNQ)-ノボラック系樹脂: 1980年代になると、(DNQ)-ノボラック系樹脂のポジ型レジストが使われるようになった。非感光部は疎水性のDNQがノボラック樹脂とジアゾカップリングしてアルカリ水溶液に不溶であるが、感光部はDNQがインデンカルボン酸(ICA)に変化して樹脂と結合できないのでアルカリ水溶液に可溶となる。

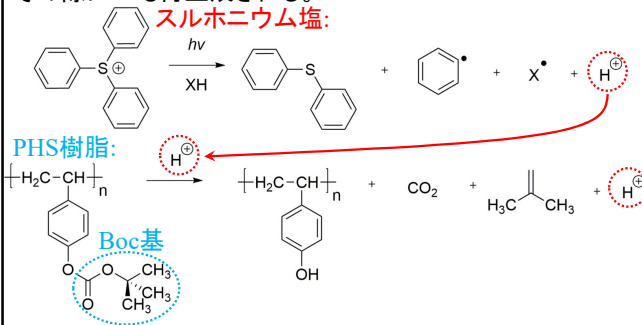


化学増幅系レジスト:

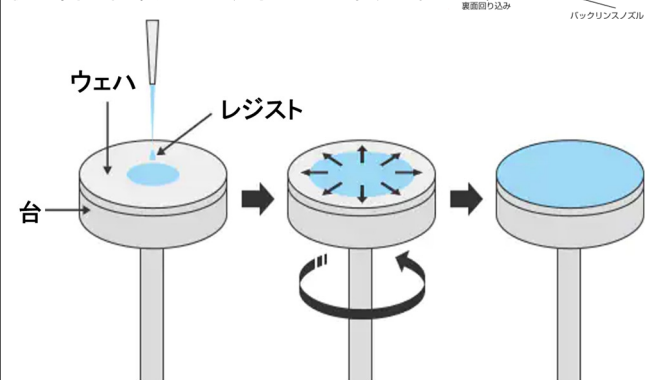
KrFやArF露光では、化学増幅系レジストが使われた。ポジ型は、露光により保護基が外れアルカリ水溶液に可溶になる。ネガはポリマーの架橋反応が起こり、アルカリ水溶液に不溶になる。



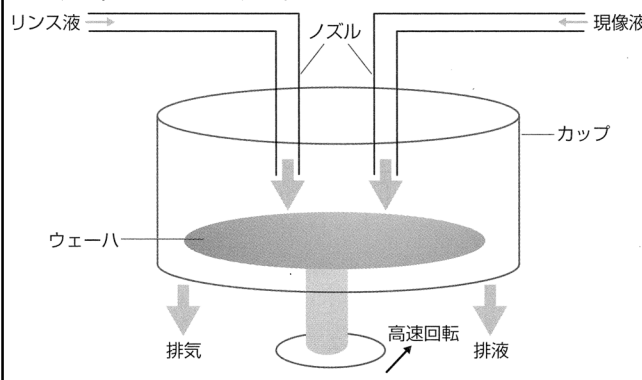
ポジ型化学増幅系レジストの例: 酸発生剤のスルホニウム塩が感光すると H^+ が生成され、ポリヒドロキシスチレン (PHS)樹脂の保護基(ボトキシカルボニル基:Boc基)がフェノール性水酸基に変化してアルカリ水溶液に可溶となる。その際に H^+ も再生成される。



スピンドクター: ウェハを台の上に真空チャックで固定し、レジストを滴下した後高速回転させて、均一に塗布する。



現像プロセス: 露光後に、スピンドクターとほぼ同じ構造をしている現像装置を使って、現像液に可溶な不要部分を除去して、超純水でリンスする。



次回の予告: フォトマスク、 次世代リソグ ラフィー技術

