

前回の復習: 解像力向上技術

渋谷-レベンソン型位相シフトマスク法:
マスクの隣接した開口部の透過光に位相差を付けて、その干渉効果でコントラストを上げる。開口部ごとに、どのような位相を与えるかを最適化しなければならない。

ハーフトーン型位相シフトマスク法:
遮光体(Cr)をハーフトーン材料に変更する。ハーフトーン材料は、透過光の位相を180°回転させて一部透過させるので、開口部の透過光との干渉効果でコントラストが上がる。

クロムレス型マスク:
ハーフトーン位相制御材料の細長いパターンを使うことで、より微細な細線パターンをつくることができる。

光学近接補正(OPC: Optical Proximity Correction)法:
露光後のレジストパターンが設計通りの形状になるように、マスクパターンにあらかじめ補正を施しておく。

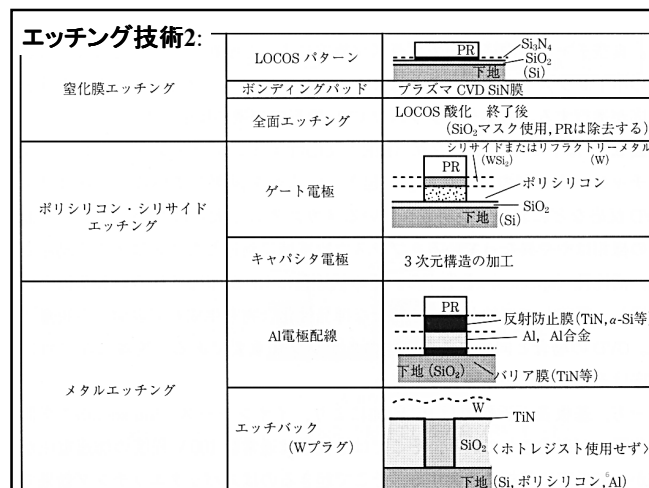
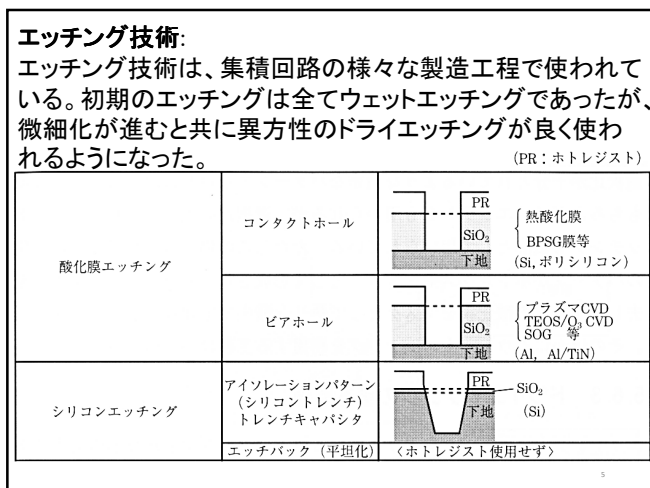
前回の復習: 次世代のリソグラフィー:

電子線リソグラフィー:
フォトマスクをつくるために使われていた電子線描画装置で、直接ウェハ上に塗布した電子線レジストを露光する。

遠紫外線(Extreme Ultra-Violet: EUV)リソグラフィー:
短波長($\lambda=13.5\text{nm}$)のEUV光を使った縮小投影露光方式。EUV光は透過レンズになる材料が無いいため、多層膜反射ミラーで光学系を構成する。

X線等倍近接転写技術:
シンクロトロン放射光($\lambda=0.5\text{nm}$)をX線源にして、近接方式(プロキシミティアライナ)の露光を行う。

ナノインプリント技術:
電子線描画法でSi基板や石英基板に回路パターンの凹凸を作製し、レジストが塗布された基板に押し当てて回路パターンを転写する。



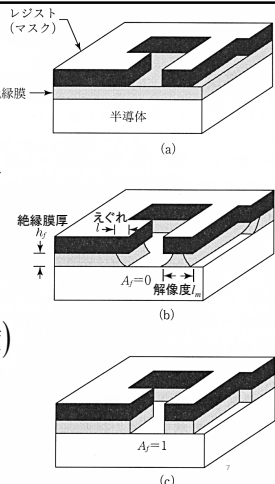
等方性と異方性エッチング:

一般にウェットエッチングは、等方で縦方向と横方向に同程度の速さでエッチングされるので、マスクの下にえぐれができる(b)。

しかし、ドライエッチングは、ほぼ異方で縦方向だけがエッチングされ、マスクの下にはえぐれができにくい(c)。異方度 A_f は、

$$A_f = 1 - l / h_f = 1 - R_f / R_l,$$

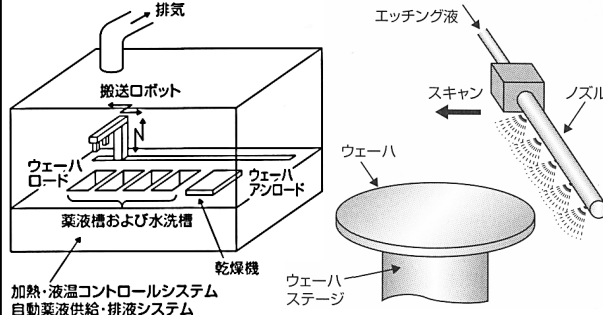
(R_f, R_l : 縦横方向のエッチ速度)と定義され、ウェットで0程度、ドライで1程度となる。等方性エッチングの場合は、絶縁膜厚 h を解像度 l_m の1/3以下にする必要がある。



ウェットエッチング: ディップ(バッチ)式とスプレー(枚葉)式がある。スプレー式の方がエッチ速度と均一性が高いため良く使われる。最近ではウェハーの全面エッチング等に使われる。

ウェットエッチング装置

ウェットエッチング(スプレー式)



ウェットエッチング装置:



ウェットエッチング液1:

材料	エッチング液	エッチ速度 (nm/min)
SiO ₂	28 ml HF	バッファー HF 液 100
	170 ml HF	
	113 g NH ₄ F	
	15 ml HF	
Si ₃ N ₄	10 ml CH ₃ COOH	P-エッチ 12
	300 ml H ₂ O	
	バッファー HF	
	H ₃ PO ₄	
Al	4 ml HNO ₃	30
	3.5 ml CH ₃ COOH	
	73 ml H ₃ PO ₄	
	19.5 ml H ₂ O	
Au	4 g KI	1000

ウェットエッチング液2:

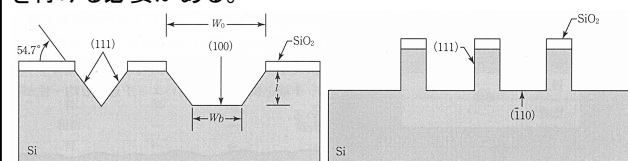
Mo	1 g I ₂	500
	40 ml H ₂ O	
	5 ml H ₃ PO ₄	
	2 ml HNO ₃	
	4 ml CH ₃ COOH	
Pt	150 ml H ₂ O	50
	1 ml HNO ₃	
	7 ml HCl	
	8 ml H ₂ O	
W	34 g KH ₂ PO ₄	160
	13.4 g KOH	
	33 g K ₃ Fe(CN) ₆	
	H ₂ O を加えて 1 l	

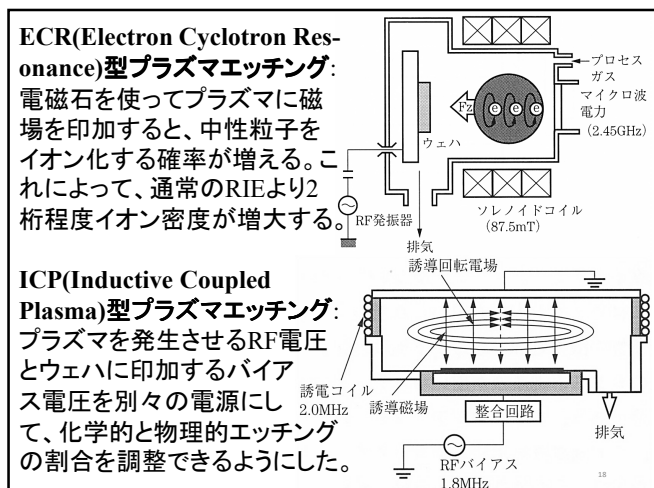
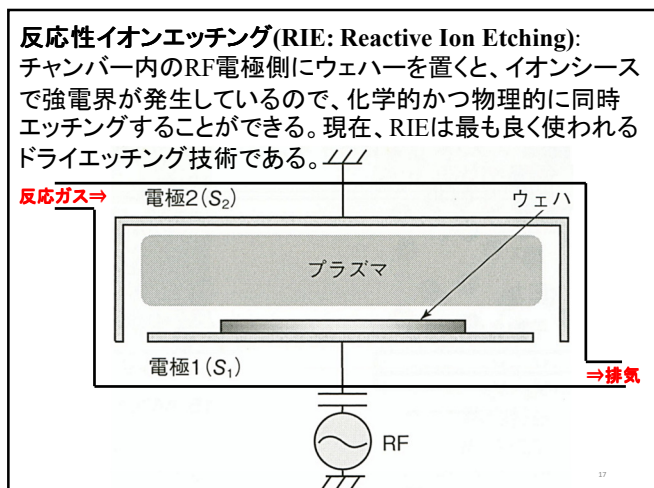
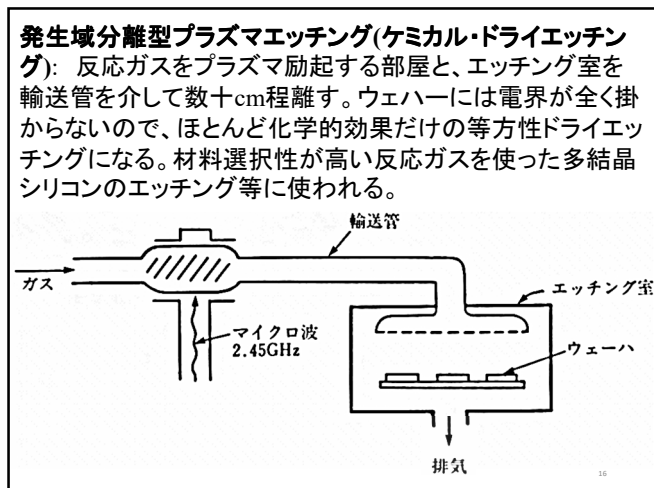
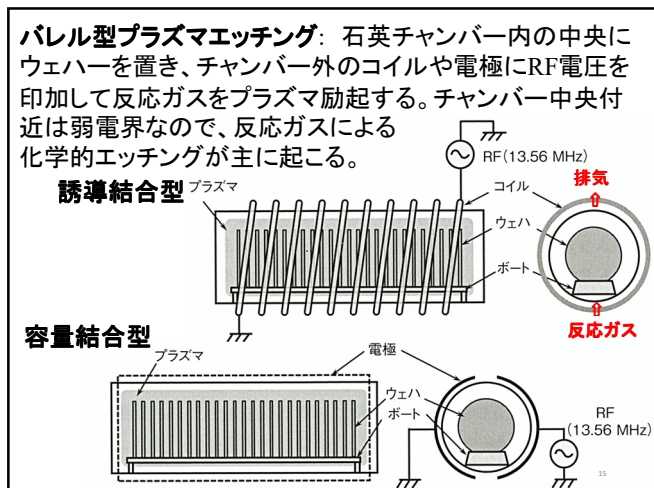
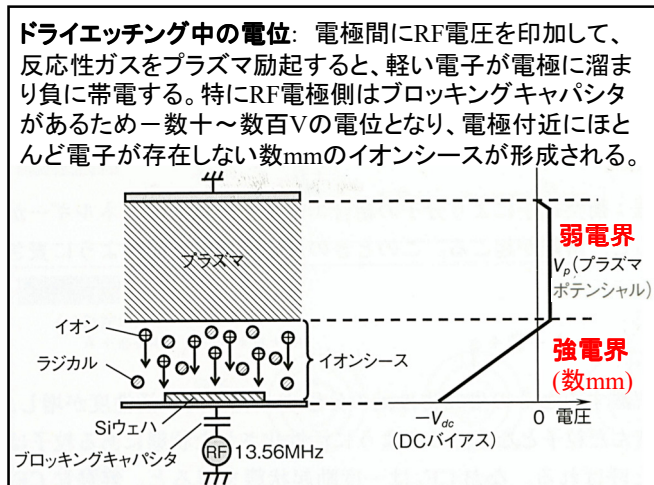
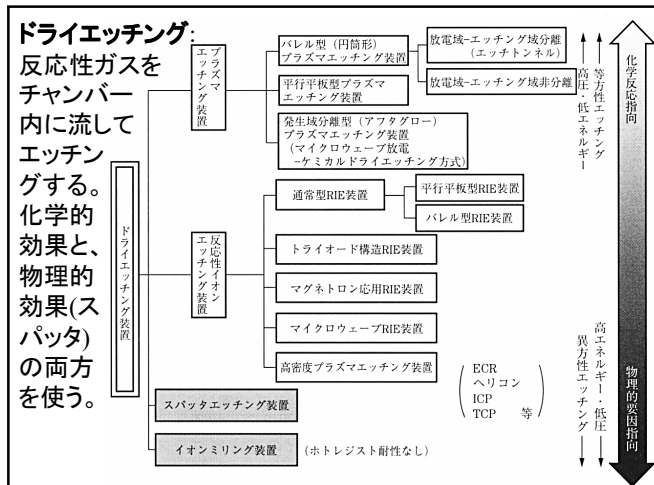
Siのウェットエッチング: Siは硝酸、フッ酸、酢酸または水の混合液でエッチングする。

硝酸がSiを酸化して($\text{Si} + 4\text{HNO}_3 \Rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{NO}_2$)、フッ酸がSiO₂を溶かす($\text{SiO}_2 + 6\text{HF} \Rightarrow \text{H}_2\text{SiF}_6 + 2\text{H}_2\text{O}$)。

または、KOHとイソプロピルアルコール(C₃H₈O)と水の混合液でエッチングする。この場合は、**結晶面方位でエッチング速度が異なる**ので、MEMS等の微細加工で用いられる。

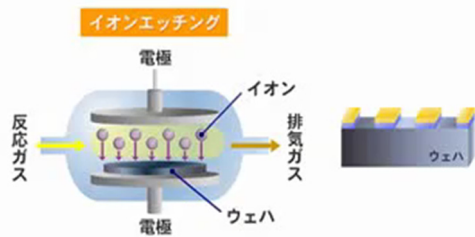
また、SiのエッチングではSiO₂も同時にエッチングされるので、SiO₂をマスクとして使う場合はあらかじめ厚いSiO₂膜を付ける必要がある。





ドライエッチングの説明:

ドライエッチング



特徴

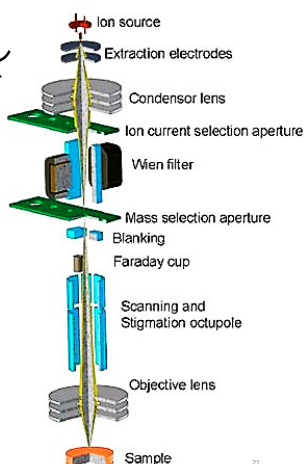
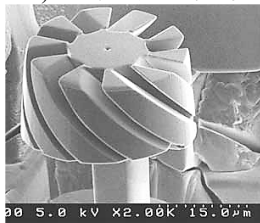
加工精度の良いエッチングができる

ウェットエッチングと比べて
優れている。

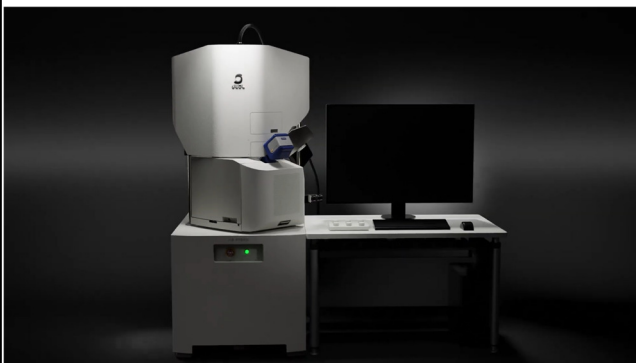
ドライエッチング装置:



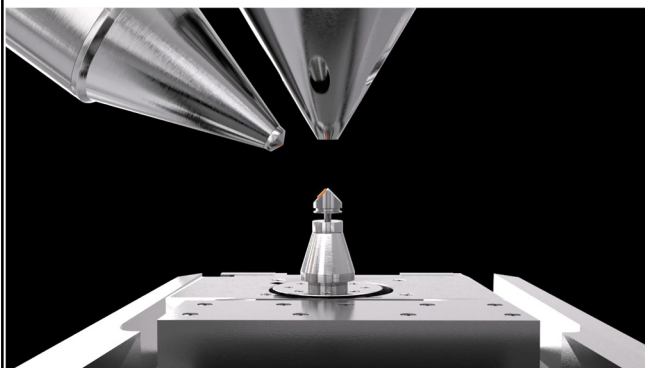
イオンミリング: 反応ガスの代わりにArやGa等の原子でイオンスパッタして、物理的エッチングを行う。材料選択性は無い。イオンビームを磁界レンズで細く絞って3次元微細加工をする収束イオンビーム(FIB: Focused Ion Beam)という手法もある。



FIB装置:

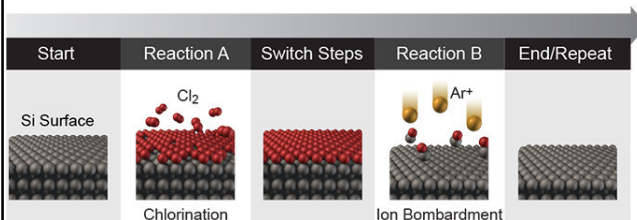


FIB装置での加工例: 電子顕微鏡用試料

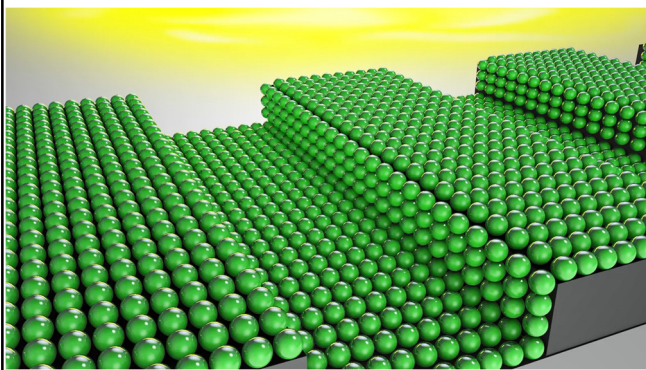


Atomic Layer Etching (ALE):

薄膜表面に反応ガス(プリカーサ)を吸着させた後で、イオン照射により反応ガス(+薄膜物質)を除去する。反応ガス吸着は1原子層分で自動的に停止し、反応ガス除去も表面の反応ガスが無くなった時点で自動的に停止するので、1サイクルでちょうど1原子層分だけエッチングされる。これを繰り返すことで、原子層単位でエッチングが進行する。



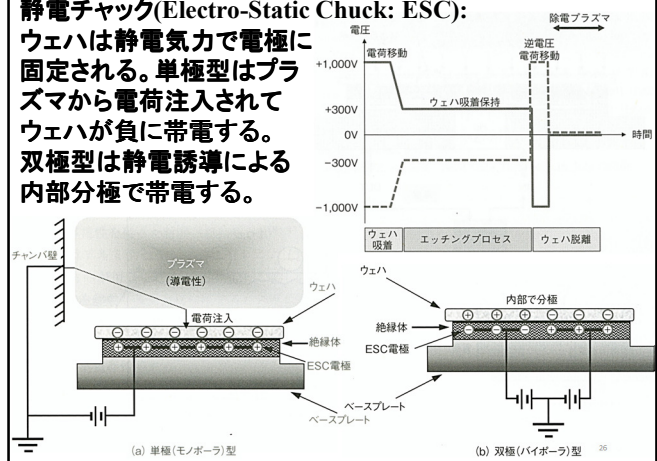
ALE:



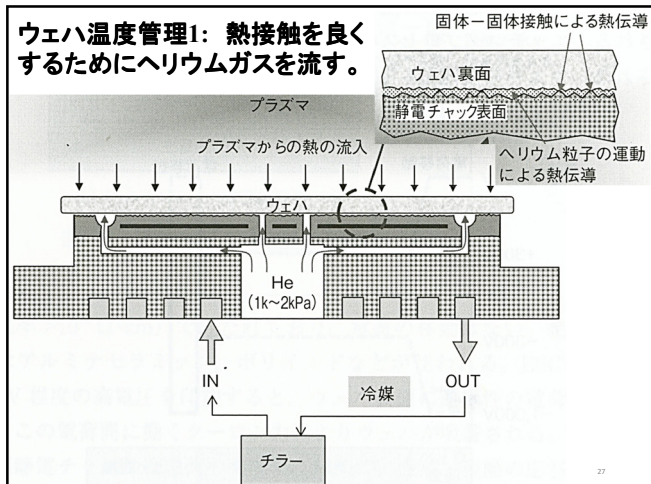
25

静電チャック(Electro-Static Chuck: ESC):

ウェハは静電気力で電極に固定される。単極型はプラズマから電荷注入されてウェハが負に帯電する。双極型は静電誘導による内部分極で帯電する。



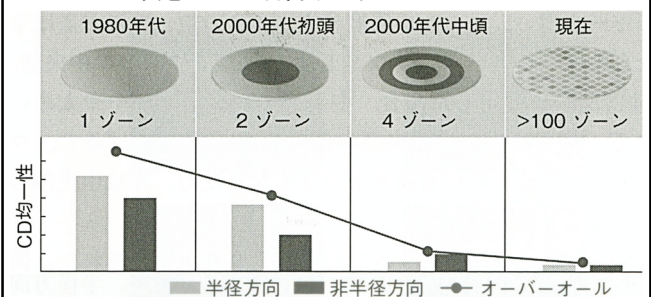
ウェハ温度管理1: 熱接触を良くするためにヘリウムガスを流す。



27

ウェハ温度管理2:

エッチング仕上がり寸法(Critical Dimension: CD)に大きく影響するウェハ面内の温度均一性を高めるために100ゾーン以上の温度を独立に制御する。



28

反応ガス: SF_6 はSiに、 CHF_3 は酸・窒化膜に選択性がある。

エッチング材料	使用ガスの種類の例			
シリコン	CF ₄ , CF ₄ -O ₂ , C ₂ H ₆ , CCl ₄ , CBrF ₃ , CF ₂ Cl ₂			
ポリシリコン	CF ₄ , CF ₄ -O ₂ , SF ₆ , CCl ₂ F ₂ , SF ₆ , C ₂ Cl ₂ F ₄			
Si ₃ N ₄	CF ₄ , CF ₄ -O ₂ , NF ₃ , CH ₂ F ₂			
SiO ₂	CF ₄ , CF ₄ -H ₂ , C ₂ F ₆ , CHF ₃ , C ₃ H ₈			
Al	BCl ₃ , CCl ₄ , SiCl ₄ , Cl ₂ , HCl, BBr ₃ , HBr			
W, Mo, Ti	CF ₄ , CF ₄ -O ₂ , NF ₃ , CCl ₄ -O ₂			
Cr	Cl ₂ , CCl ₄ -O ₂			
ポリマー	O ₂			
シリサイド (W, Mo)	CF ₄ , CF ₄ -O ₂ , CCl ₄ -O ₂			
ドライエッチングのエッチング速度 (nm/分)				
被加工材料 反応ガス	Si	SiO ₂	Si ₃ N ₄	Al
SF ₆	100	10 以下	10 以下	0.1 以下
CHF ₃	10 以下	100	100	0.1 以下
CCl ₄	100	10 以下	—	100~200

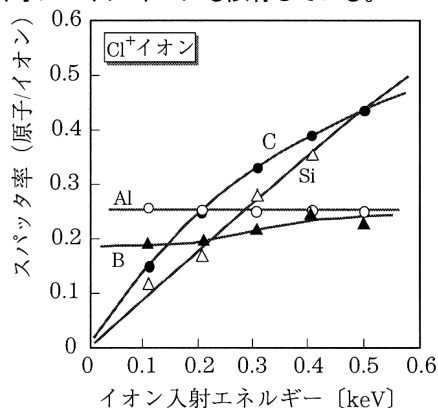
反応ガスと反応生成物: 物理的だけでなく、化学的エッチングも起こる様にガスを選定する。また、Cuは200℃以下で揮発する反応生成物が無い、化学的ドライエッチングが困難。

各種化合物の蒸気圧が10Torr になるときの温度

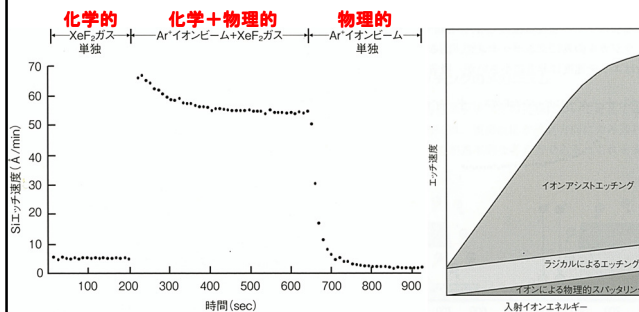
化合物	温度 [°C]	化合物	温度 [°C]	化合物	温度 [°C]
AlBr_3	118.0	Cu_2I_2	656	SbI_3	223.5
AlCl_3	123.8	FeCl_3	235.5	SiCl_4	-34.7
AlF_3	1324	GeCl_4	-15.0	SiClF_3	-127.0
AlI_3	225.8	KBr	982	SiCl_2F_2	-102.9
BBr_3	-10.1	KCl	968	SiCl_3F	-68.3
BCl_3	-66.9	MgCl_2	930	SiF_4	-130.4
BF_3	-141.3	NaI	903	SnBr_4	72.7
CrO_2Cl_2	13.8	NiCl ₂	759	SnCl_4	10.0
Cu_2Br_2	718	SbBr_3	142.7	SnI_4	175.8
Cu_2Cl_2	702	SbCl_3	85.2		

30

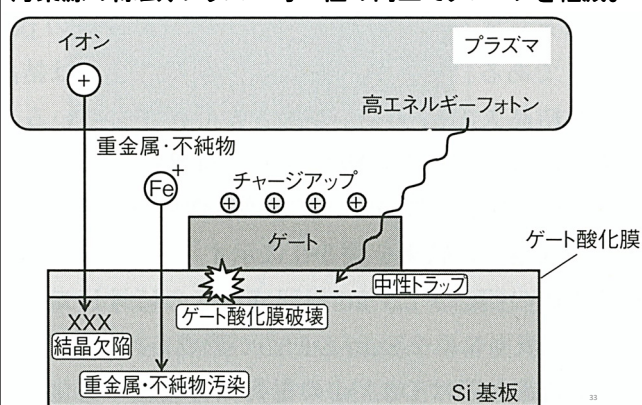
物理的/化学的エッチングの割合: 反応ガスの種類だけではなく、イオンエネルギーにも依存している。



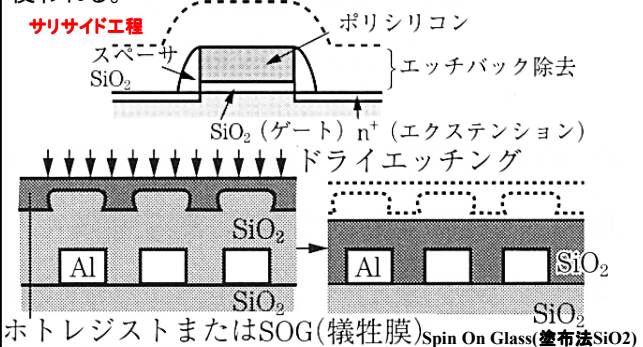
イオンアシストエッチング現象: 反応ガスによる化学的エッチング単独やイオンスパッタによる物理的エッチング単独よりも、両方同時に行くとスパッタ部が高温になるので(異方性)エッチング速度が上がる。



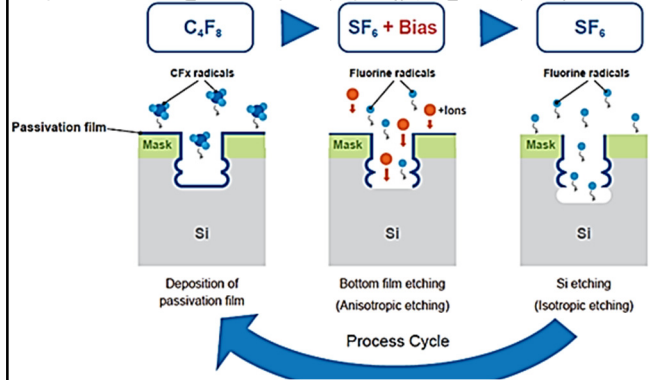
ドライエッチングダメージ：低イオンエネルギー化、重金属汚染源の除去、プラズマ均一性の向上でダメージを軽減。



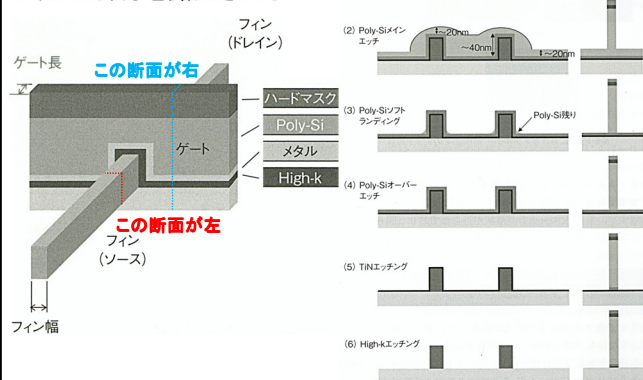
エッチバック(全面エッチング): フォトリソグラフィーを使わずにウェハー全面をエッチングすることをエッチバックという。サリサイド工程や表面の出っ張りを平坦化する工程等に用いられる。



ボッシュプロセス: 3D NANDフラッシュやTSVを作製するためには、ポリマー堆積による(側壁)表面保護と穴底部の異方性エッチングを交互に行い、深い縦穴を形成する。

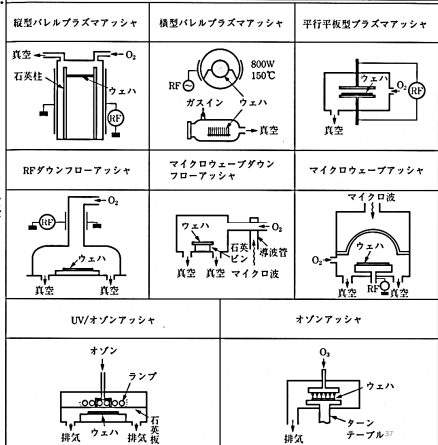


マルチゲートFETのエッチング例:
フィンの部分を露出させる



フォトレジスト除去:

ドライ剥離とウェット剥離がある。現在は、ドライ剥離が主流。プラズマアッシャは酸素を反応ガスとして、レジストを CO_2 と水蒸気に分解する。光/オゾンアッシャは、オゾン(O_3)とUV光照射で発生した酸素で、レジストを分解する。



プラズマアッシャ装置:



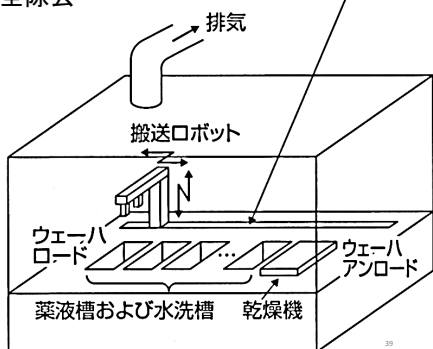
35

ドライ剥離だけではレジスト除去が不十分な場合には、その後にウェット剥離を用いて、レジストを完全除去する。

ウェット剥離は、エッチング液に有機アルカリ系の剥離液を使う(アセトン CH_3COCH_3 で代用できることもある)。

ウェット剥離装置(多槽浸漬式)

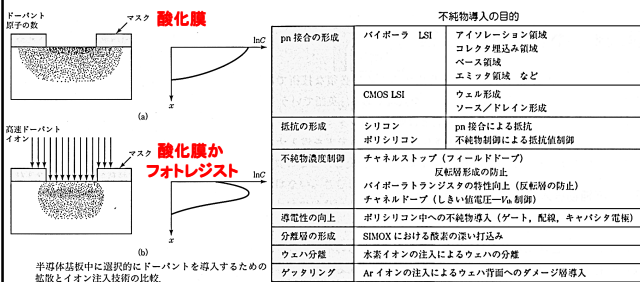
液温コントロールシステム/
自動薬液供給・排液システム



39

次回の予告: 不純物ドーピング(熱拡散法)

集積回路の製造工程で、半導体の電気的性質(n 型、 p 型)を変えたい場合は、Si基板にドナー又はアクセプタの不純物ドーピングを行う。不純物ドーピングの方法には、熱拡散法とイオン注入法がある。



40