SEMICONDUCTOR FRONT-END · PART 3-8

エッチング（プラズマの物理）
光る気体で、
まっすぐ下へ削る

リソグラフィでレジストに描いた模様は、まだ「型紙」にすぎません。その型紙を使って、下の膜を模様どおりに削り取るのが**エッチング**です。たとえば酸化膜を液体で等方的に溶かすと、レジストの下にも横から削れ込みます。そこで使われるのが、ガスに電気をかけて作る**プラズマ**です。プラズマの中では、軽い電子が壁へ逃げることで、ウェハの表面に強い電界の層ができます。その電界で加速された正イオンが、条件を整えるとほぼ垂直に入射し、化学反応と組み合わさって、膜を**まっすぐ下へ**削ります。この回では、その物理と化学、装置の進化、そして装置・ガス・部品の会社と地域の勢力図を見ていきます。

半導体前工程シリーズ 第3部 3-8／難易度 ★★★
事前学習：3-3・3-5／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 — 削り方には「横に広がる」と「まっすぐ」がある
3. 技術編② — プラズマとは何か
4. 技術編③ — シース：正イオンの向きがそろう理由
5. 技術編④ — 化学と物理の「掛け算」
6. 技術編⑤ — 何で削るか：生成物が気体になること
7. 技術編⑥ — 装置の進化：プラズマの「濃さ」と「強さ」を分けて操る
8. 技術編⑦ — エッチングの困りごと
9. 技術編⑧ — 原子層エッチング：表面の薄い改質層を、繰り返し除く
10. 技術編⑨ — 温暖化ガスとの付き合い
11. 産業編① — 装置：米国2社と東京エレクトロン
12. 産業編② — ガスと部品：日本の素材の出番
13. これから求められること
14. まとめと次回予告
15. 確認クイズ
16. 用語集
17. 参考資料（一次情報）
18. 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

- ウェットエッチングとドライエッチングの違いを、「等方性・異方性」と「選択比」の言葉で説明できる
- プラズマの中で、軽い電子と重いイオンの差から、ウェハの表面に電界の層（シース）ができ、正イオンが主に表面に垂直に入射する理由を説明できる
- 化学反応（ラジカル）とイオンの衝突を組み合わせると、どちらか一方よりずっと速く、まっすぐ削れることを説明できる
- エッチングの装置と、ガス・部品で、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

- **エッチング**は、レジストで守られていない部分の膜を削り取る工程です。等方的なウェットエッチングでは膜が横にも削れるので、細い形状の転写には、ガスに電気をかけて作る**プラズマ**を使う**ドライエッチング**が使われます。
- プラズマの中では、軽い電子がすばやく壁へ逃げ、プラズマ本体はほぼ電気的に中性を保ちながら、まわりの壁より**高い電位**になります。ウェハの表面には薄い**シース**（電界の層）ができ、正イオンはそこで加速されて、低圧で衝突が少なければ**ほぼ垂直に**ウェハに入射します。反応しやすい**ラジカル**による化学反応と、イオンの衝突を組み合わせると、どちらか一方だけより速く削れる相乗効果を利用できます。側壁保護なども組み合わせて、**下方向へ形を保って**削ります。
- エッチング装置の世界市場は約2.3兆円で、**Applied Materials・Lam Research（米国）と東京エレクトロン（日本）**の3社で8割を超えます（経済産業省の資料）。日本の会社は、装置に加えて、エッチングガスや装置の部品でも役割を担っています。

2. 技術編① — 削り方には「横に広がる」と「まっすぐ」がある

横にも削れると、型紙の下へ入り込む

1970年代まで、エッチングはもっぱら液体の薬品で行われていました（**ウェットエッチング**） [3] 事実 。たとえばSiO_2はフッ酸（HF）で溶けます。MITの講義資料には、$SiO_2 + 6HF \rightarrow H_2SiF_6 + 2H_2O$ という反応と、水で6倍にうすめたフッ酸では毎分約120 nm溶けること、シリコンに対しては約100倍速く溶けることが示されています [2] 事実 。

このようなSiO_2のウェットエッチングでは、膜が**どの向きにも同じように**溶けます（**等方性**）。下へ削り進むあいだに、レジストの下にも横から入り込みます（**アンダーカット**）。日本半導体歴史館は、この横方向の広がりが、**1975年ごろの3 μmの世代**で無視できなくなり、模様どおりの寸法で削れるRIE（後述）が使われ始めたと説明しています [10] 事実 。

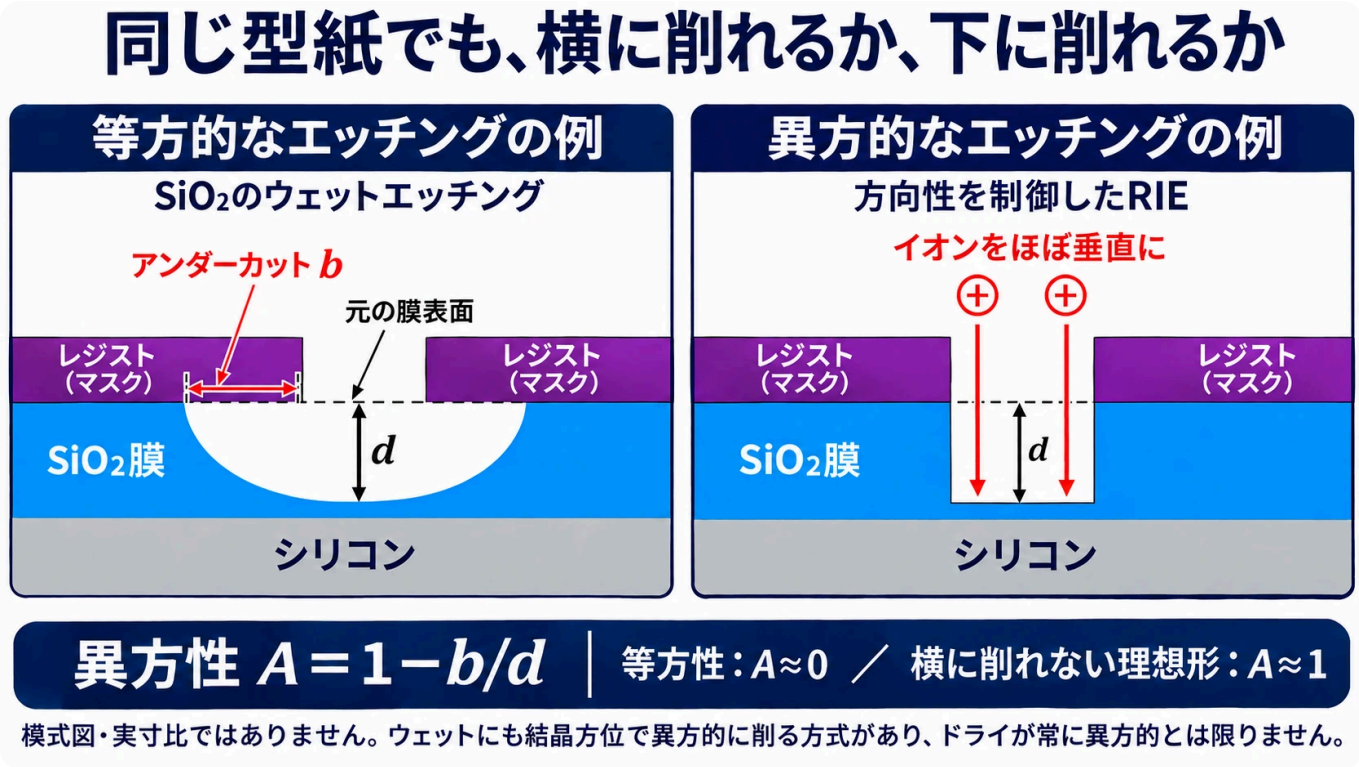


図1　等方性と異方性：横への削れ込みを比べる（概念図）

図の読み方

左は酸化膜の等方的な除去、右は方向性を制御したRIEの例です。bはマスク端の下へ入り込んだ横方向の長さ、dは元の膜表面から削った深さです。同じ開口でも、横への削れ込みで形が変わります。ウェットとドライのすべてを一対一に分類する図ではありません [1]。

- **「異方性」と「選択比」**

エッチングの良し悪しは、主に次の2つで表します 解説 。

- **異方性**：横にどれだけ削れたか（b）と、下にどれだけ削れたか（d）の比で、A ＝ 1 − b／d と表します。等方的に削れればA＝0、まっすぐ下へだけ削れればA＝1です [1] 事実 。
- **選択比**：削りたい膜と、削りたくないもの（レジストや下の層）の、削れる速さの比です。化学反応による削り方では20〜50、イオンを物理的にぶつけて叩き出す削り方（スパッタエッチング）では1〜5程度とされています [2] 事実 。

Stanfordの講義資料は、エッチングのこの性質を一文でまとめています。**「選択性は化学から、方向性はふつう物理的な過程から来る」** [1] 事実 。化学反応は相手を選ぶけれど向きを選ばず、イオンの衝突は向きをそろえられるけれど相手を選ばない — この2つをどう組み合わせるかが、ドライエッチングの物語です 解説 。これは**微細なパターンを寸法どおりに転写する場面**での説明です。ウェットエッチングや選択的な膜除去も製造工程で使われます。また、シリコンを結晶方位に依存して異方的に削るウェット方式もあります [1] 解説 。反対に、ドライでもラジカル主体なら等方的に削れる場合があります。

3. 技術編② — プラズマとは何か

- **気体の一部が、電子とイオンに分かれた状態**

ガスに強い電界をかけると、電子が加速されて気体の分子にぶつかり、分子から電子を叩き出します。こうして、**電子・イオン・中性の分子や原子**が混ざった状態ができます。これが**プラズマ**です。蛍光灯やネオンサイン、オーロラや雷も、プラズマの仲間です 解説 。



ノルウェー、ロフォーテン諸島のフラクスタッドの上空に現れたオーロラ（Commonsの説明による）。オーロラは、宇宙から降り込んだ電子などが大気の分子や原子にぶつかって光る現象で、プラズマの光の仲間です 解説 。エッチング装置の中でも、ガスは電子にぶつけられて、それぞれの気体に特有の色で光ります。
画像：Johannes Groll / Wikimedia Commons / CC0（掲載用に縮小・WebP化）

ただし、エッチングに使うプラズマで、電子とイオンに分かれている粒子は**ほんの一部**です。Lam Researchの技術者が米国テキサス大学で行った講義は、ドライエッチングのプラズマの多くは「弱く電離している」とし、平行平板型の装置（後述のCCP）の電離度（気体の粒子のうちイオンになっている割合）を10^{-6}〜10^{-3}としています [6] 事実 。100万個の気体の粒子のうち、イオンは1個から1,000個ほどしかありません 本稿の計算 。

UC Berkeleyの講義資料では、気体の粒子の数は n_g（個/cm³）≒ 3.3×10^{16} × 圧力（Torr）です [4] 事実 。圧力10 mTorr（大気圧の約7.6万分の1）なら、気体の粒子は1 cm³あたり約3.3×10^{14}個です。そこに電子が10^{9}〜10^{10}個 [4] あれば、電離度は約3×10^{-6}〜3×10^{-5}です 本稿の計算 。

電子だけが「熱い」

プラズマの不思議な点は、**電子だけが極端に熱い**ことです。Berkeleyの講義資料は、平行平板型の装置の典型的な電子温度を**2〜4 V**（ボルトで表した温度。1 Vが約11,600 Kに当たる）としています [4] 事実 。ケルビンに直すと、約23,000〜46,000 Kです 本稿の計算 。一方で、イオンの熱的な運動や中性気体の温度は、電子よりずっと低い例が示されています [6] 事実 。ただし、シースで加速されたイオンの方向性のあるエネルギーと、気体の温度は別の量です。

電子は軽いので、電界から受け取ったエネルギーを、重い分子との弾性衝突ではほとんど失いません。分子の励起や解離などの非弾性衝突では、電子のエネルギーが使われます。だから電子だけが高温になり、気体全体は冷たいままです 解説 。Berkeleyの資料はこれを「低い温度で、高温の処理ができる」と表現しています。高温の炉で気体全体を加熱しなくても、反応性の粒子を作れます [4] 解説 。一方、ウェハにはイオン衝突や反応による熱が入り、ステージの冷却・加熱で温度を管理します。「低温プラズマだからウェハが自然に室温に保たれる」という意味ではありません。

物理のツボ①：ガスを熱するのではなく、電子でこわす

エッチングに使うのは、CF_4（四フッ化炭素）やCl_2（塩素）などのガスを分解してできる、**ラジカル**（結合の手が余った、反応しやすい原子や分子のかけら。例：F、Cl、CF_3）です。Berkeleyの講義資料は、CF_4はそのままではシリコンと反応しないが、分解してできたFがシリコンと反応して、気体のSiF_4になると説明しています [4] 事実 。

$$CF_4 \rightarrow CF_3 + F \qquad Si + 4F \rightarrow SiF_4\uparrow$$

同じラジカルをガスを熱するだけで作ろうとすると、**1,000〜10,000 K**の温度が要るとされています [6] 事実 。ウェハもレジストも耐えられません。プラズマなら、熱い電子だけが分子にぶつかって分解するので、ウェハ全体をその高温にせずに、ラジカルが得られます 解説 。Stanfordの講義資料は、プラズマ中には約10^{15}個/cm³の中性の粒子があり、その1〜10%がラジカルでありうるのに対し、イオンと電子は10^{8}〜10^{12}個/cm³だとしています [1] 事実 。**削る反応の主役のひとつであるラジカルは、イオンよりずっと多い**のです 解説 。

4. 技術編③ — シース：正イオンの向きがそろう理由

軽い電子が、先に逃げる

プラズマ本体では、正と負の電荷の総量がほぼつり合っています（**準中性**）。正イオンと電子が主な荷電粒子なら、その密度がほぼ同じです。ガスによっては負イオンもあるため、常に「電子数＝正イオン数」とは限りません。ところが、動きの速さがまるで違います。Ar^+（アルゴンのイオン）の質量は電子の約7.3万倍です（陽子と電子の質量比1836.15 [14] と、アルゴンの原子量約40から計算） 本稿の計算 。

> **物理のツボ②：電子は、イオンより数千倍速い**
>
> 運動エネルギー ½mv² が同じなら、速さvは質量の平方根に反比例します。質量が7.3万倍なら、速さは√73,000 ≒ **270分の1**です 本稿の計算 。
>
> しかも、電子は2〜4 eVと熱く [4]、イオンの熱的な温度を室温（約0.026 eV）とする例を考えます 本稿の計算 。エネルギーの比（約100倍）も加えると、平均の速さの比は約**2,400〜3,400倍**になります 本稿の計算 。高周波の電界に対して電子は応答しやすく、重いイオンは多くの条件で時間平均した電界の影響を強く受けます [3][4] 解説 。ここで比べた熱的な速さと、シースで加速されたイオンの入射速度は別です。

速い電子は、壁やウェハにすぐ当たって失われます [6] 事実 。電子が先に失われると、表面付近で電荷が分かれて電位差ができます。その結果、**プラズマ本体の電位は壁より高く**なります [6] 事実 。Stanfordの講義資料は、プラズマの電位がプラスになるのは、壁に流れ込む電子とイオンの量を等しくするためだ、と書いています [1] 事実 。電位がプラスになると、電子は押し戻され、イオンは壁へ引き寄せられます。こうして、時間平均の電流のつり合いが保たれます 解説 。**電位が壁より高いことと、プラズマ全体に大量の正電荷が残ることは別です。**本体はほぼ準中性で、強い電荷分離は主に境界のシースにあります。

ウェハの上の「電界の層」

このとき、プラズマと壁（ウェハ）の境目には、電子が少なく、強い電界がかかった薄い層ができます。これが**シース**です。テキサス大学の講義は、シースの厚さを**数mm程度の例**で説明し、イオンはここで加速されてウェハにぶつかり、そのエネルギーはふつう**10〜40 eV**、ウェハにさらに電圧をかけると**約1,000 eV**まで上がりうるとしています。そして、シースの中で気体の分子とぶつからないほど圧力が低ければ、イオンは**ほぼ真上から**ウェハに届くと書いています [6] 事実 。

平坦な表面上で衝突が少ないシースでは、電界が主に表面に垂直なので、正イオンの向きを下方向へそろえられます。穴の底に届くイオンが底の反応を助けます。ただし、実際の入射角には広がりがあり、圧力・衝突・形状や帯電によって側壁にも当たりえます 解説 。

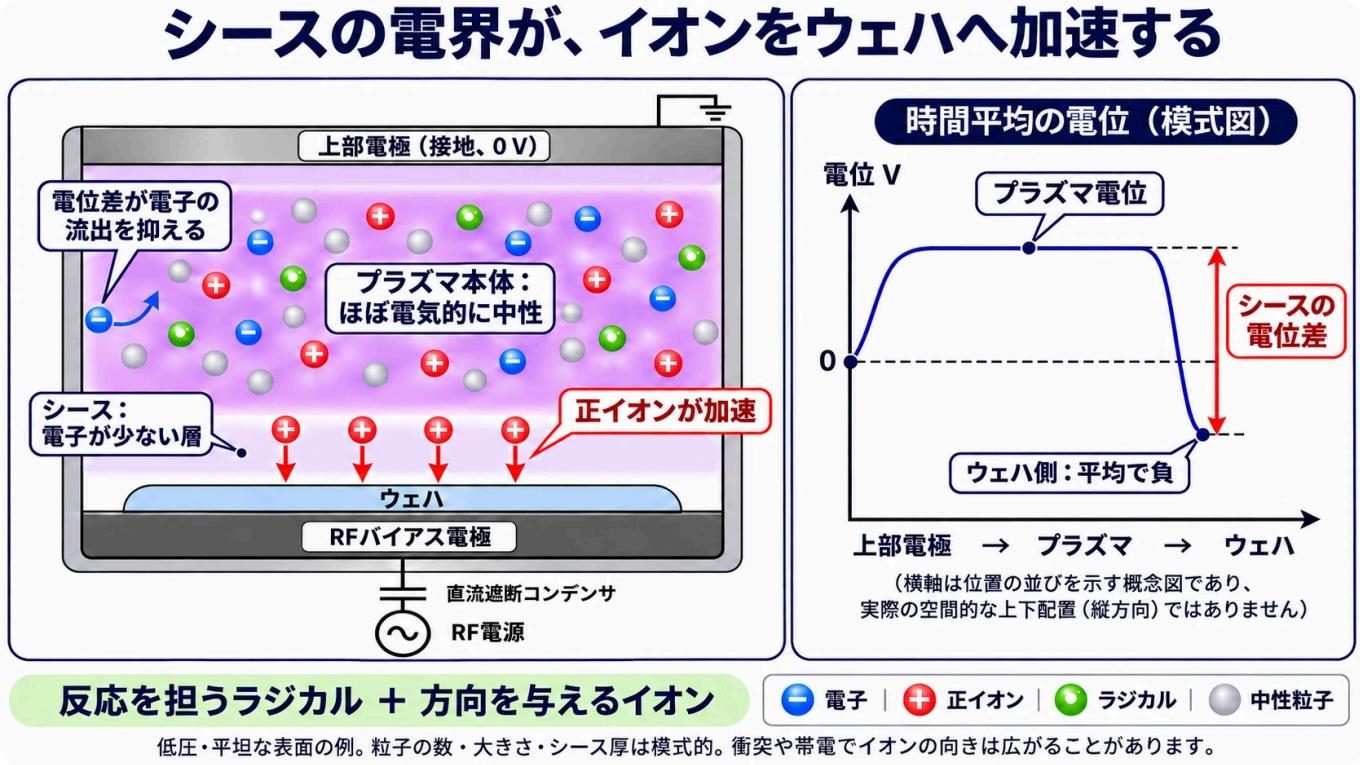


図2　シースと電位：正イオンに方向を与える（概念図）

図の読み方

左のプラズマ本体はほぼ準中性で、ウェハの直前に電子の少ないシースがあります。右は同じ経路を横軸に並べた時間平均の電位の模式図です。波形やシース厚は実機の値ではなく、RFで変動します。イオンを加速するのは本体からウェハまでの電位差です [1][4][6]。

● 非対称なRF電極では、負のセルフバイアスが生じる

典型的な容量結合RIEでは、ウェハを置く電極に、直流を遮断するコンデンサを通して高周波（RF）の電圧をかけます。電子は速く、イオンは遅いので、電極には1周期の平均で電子のほうが多く流れ込もうとします。コンデンサは直流の電流を通さないので、電極にはマイナスの電荷がたまり、電極の面積差などの非対称性がある条件では平均でマイナスの電位になります。これを**セルフバイアス**と呼びます [4][6] 事実 。

Berkeleyの講義資料は、高周波をかける電極が、接地された側（壁など）より小さいと、マイナスの直流の電圧が現れることを示しています。両側のシースにかかる電圧の比は、面積の比の q 乗（$V_a / V_b = (A_b / A_a)^q$）で、実験では q は約1〜2.5です [4] 事実 。Stanfordの講義資料は、RIEではウェハを**小さいほうの電極**に置く、と書いています [1] 事実 。小さい電極の上ほどシースの電圧が大きく、イオンが強く加速されるからです [1][3] 事実 。

13.56 MHzという周波数

Berkeleyとスタンフォードの講義資料には、高周波の電源として**13.56 MHz**が出てきます [1][4] 事実 。13.56 MHz（±7 kHz）は、国際電気通信連合（ITU）の無線通信規則で、**産業・科学・医療（ISM）用**に指定された周波数のひとつです。米国の規則も、ISM機器の周波数として13.56 MHz ± 7.0 kHzを挙げています [15][16] 事実 。ISM用の周波数は、通信以外の目的で電波のエネルギーを使う機器のために割り当てられたものです。プラズマ装置が13.56 MHzを使うのは、この割り当てがあるためだと考えられます 推測 （これを明記した技術資料は、本稿では確認できませんでした）。

5. 技術編④ — 化学と物理の「掛け算」

Coburn と Winters の実験

1979年、米国IBMの研究所（カリフォルニア州サンノゼ）のJ. W. CoburnとH. F. Wintersは、プラズマを使わずに、エッチングの「化学」と「物理」を分けて調べた論文を発表しました [12] 事実 。シリコンに、**フッ化キセノン（XeF_2）のガス**（フッ素を運ぶ化学の役）と、**アルゴンのイオンのビーム**（物理的にぶつかる役）を、別々に、または一緒に当てたのです 解説 。

この実験の図は、多くの講義資料に再掲されています。Stanfordの講義資料の図 [1] から読み取ると、シリコンの削れる速さは次のとおりです 本稿の計算 。

当てたもの	シリコンの削れる速さ（図から読み取った目安）
XeF_2のガスだけ	約0.5 nm/分
アルゴンのイオン ＋ XeF_2のガス	約5.5〜6.7 nm/分
アルゴンのイオンだけ	約0.2〜0.3 nm/分

ガスだけ、イオンだけの速さを**足しても**約0.8 nm/分にしかならないのに、一緒に当てると**約7倍以上**になります 本稿の計算 。Berkeleyの講義資料は、500 Vのアルゴンイオンを加えると、削れる速さが**10倍**になると説明しています [5] 事実 。テキサス大学の講義は、これを「Coburn と Winters の古典的な実験」とし、一緒に当てたときの速さは、それぞれの速さの和より**1桁大きい**、つまり**相乗効果**だと書いています [6] 事実 。Stanfordの講義資料も「両方があるときだけ、かなりのエッチングが起こる」と書いています [1] 事実 。

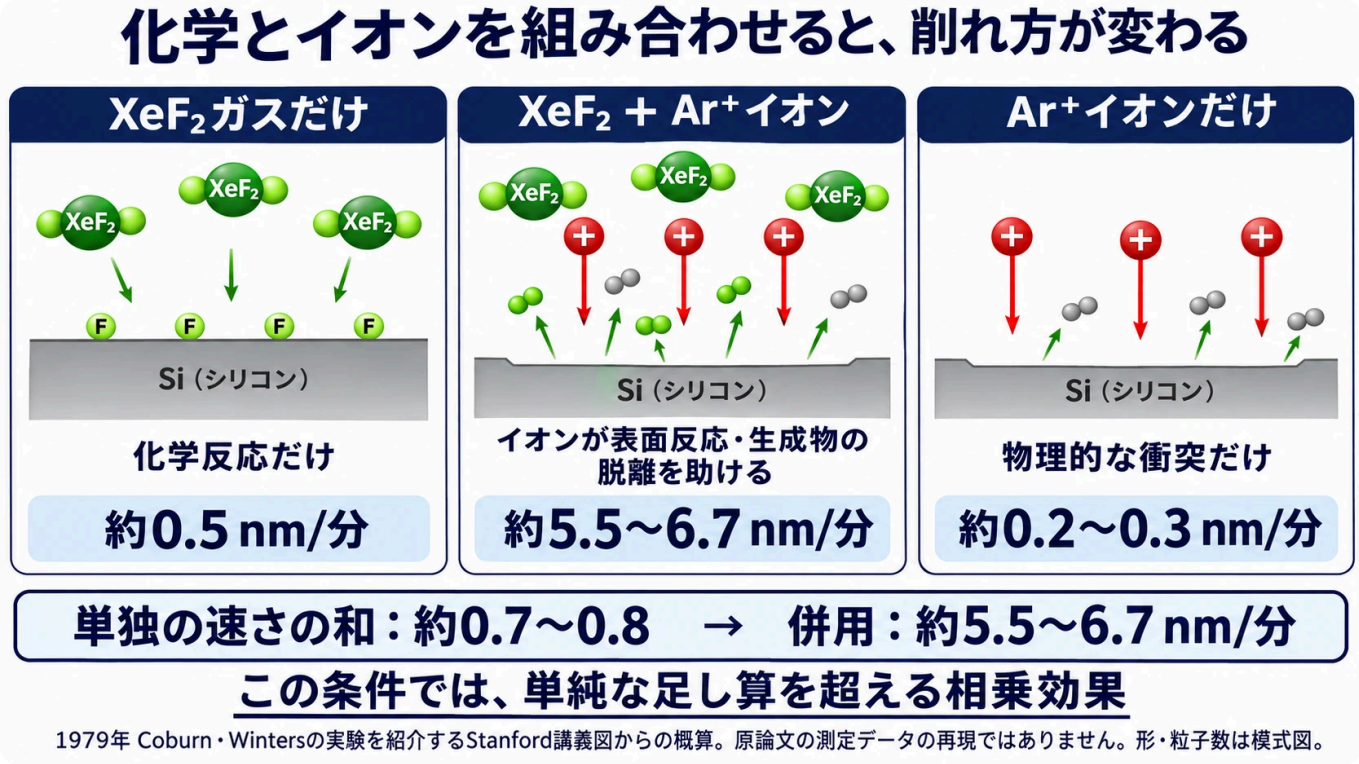


図3　化学とイオンの相乗効果：3条件を比べる（概念図）

図の読み方

XeF_2ガスだけ、Ar^+だけより、両方を同時に与えた条件で速く削れます。数値は講義図からの概算で、実験の時系列を再現したデータではありません。相乗効果の大きさは材料・エネルギー・流束などの条件で変わります [1] [12]。

「掛け算」は数式そのものではなく、**単独の速さを足した以上に効く相乗効果**のたとえです。なぜこの効果が出るのでしょうか。Stanfordの講義資料は、この相乗効果には多くのしくみが提案されているとしたうえで、代表的な2つを挙げています。ひとつは、**イオンの衝突が化学反応そのものを加速する**こと、もうひとつは、反応を妨げる**膜をイオンが叩いて取り除く**ことです [1] 事実 。イオンをほぼ垂直に入射させると、**底の反応を強く助ける**ことができます。ただし、中性の反応種は側壁にも届くので、イオンの向きだけで完全な異方性が保証されるわけではありません。次の側壁保護などと組み合わせて、速さと方向性を両立させます 解説 。

側壁を守る膜

もうひとつの工夫が、**側壁の保護膜**です。ガスやレジストに含まれる炭素から高分子（ポリマー）の膜ができたり、反応でできた物質が表面に積もったりします。底の膜はイオンに叩かれて取り除かれますが、イオンの当たり方が弱い側壁には膜が残り、横から削れるのを防ぎます [1] [6] 事実 。

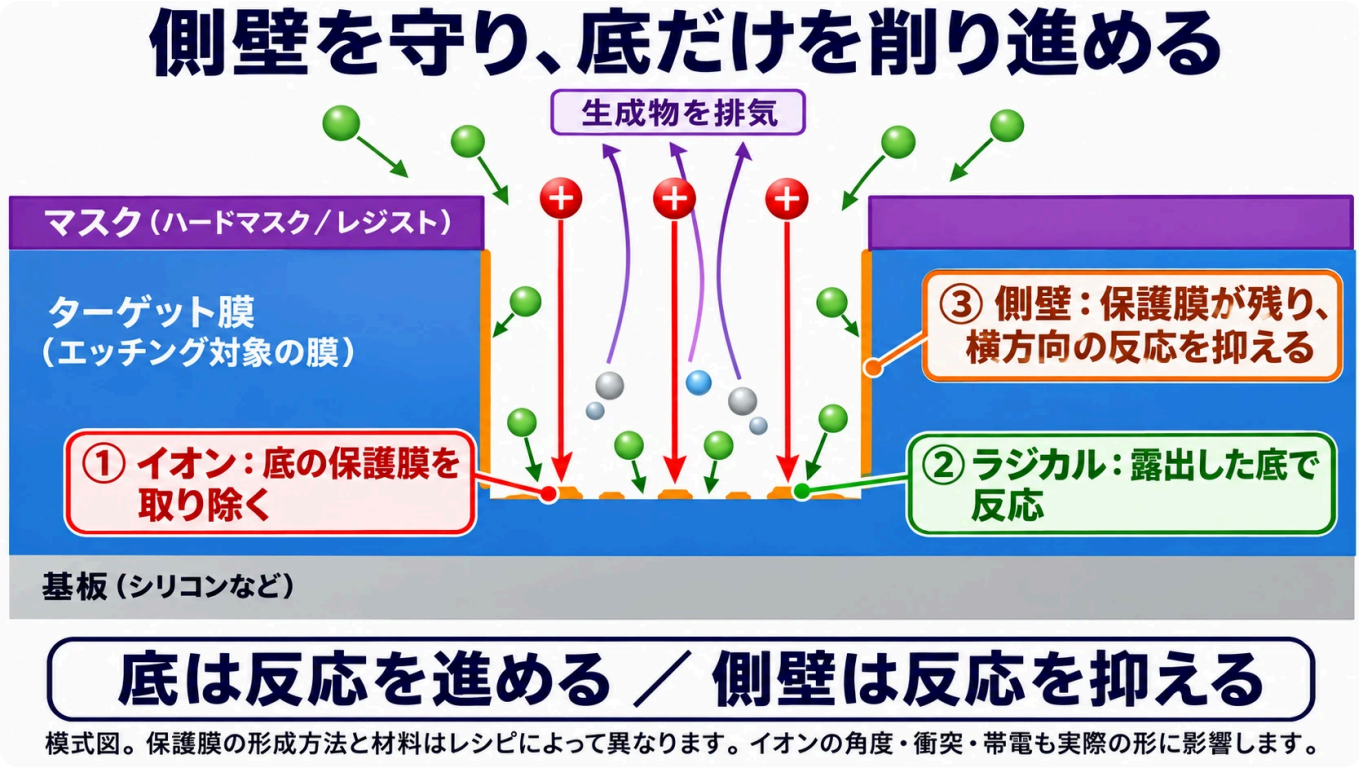
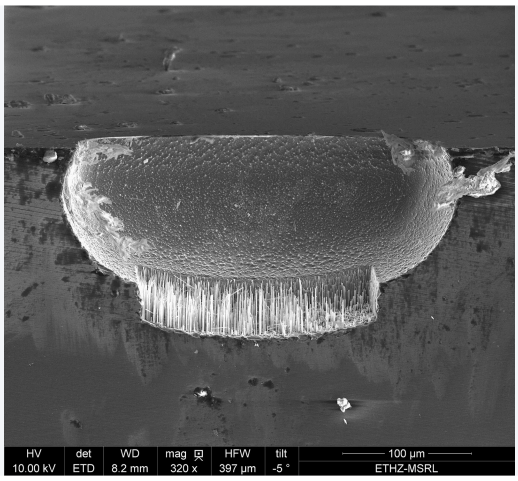


図4　底の反応と側壁保護を両立させる（概念図）

図の読み方

緑は反応性の中性粒子、赤は加速された正イオン、オレンジは保護膜です。中性粒子は側壁にも届きますが、そこでは膜が反応を抑えます。底ではイオンが膜の除去や反応を助け、生成物が外へ運ばれます。保護膜の形成と除去のバランスが形を決めます [1][6]。



シリコンを誘導結合プラズマで深く削った断面の電子顕微鏡写真。最初は保護膜を作らずに削ったため、非常に等方的に（横にも）削れ、保護膜を作るC_4F_8のガスのバルブを開いたところで、目的の異方性（まっすぐ下へ）が得られた。条件が最適化されておらず、表面に「ブラックシリコン」が生じている（Commonsの説明による）。保護膜の有無で、削れ方が大きく変わることがわかります 解説 。

画像：Mgerlt / Wikimedia Commons / CC BY 4.0（掲載用に縮小・WebP化）

ポイント：ドライエッチングの4つの役者

- **ラジカル**：化学反応で膜を気体に変える。どの向きにも動く（等方的）
- **正イオン**：シースで加速され、低圧では主に下方向へ入射する。化学反応を加速し、底の膜を叩いて除く
- **保護膜**：側壁に積もり、横から削れるのを防ぐ
- **気体になる生成物**：削れた膜は、気体になってポンプで運び出される（次の章）

この4つのバランスを、ガスの種類・圧力・電力・電極の電圧で調整するのが、エッチングの「レシピ」です 解説 。

6. 技術編⑤ — 何で削るか：生成物が気体になること

反応生成物を、表面から離して排気する

化学反応を使うドライエッチングでは、反応生成物が表面から離れ、**気体として排気できること**が重要です。MITの講義資料は、エッチングでできる物質は**沸点が低い**必要がある、としています [3] 事実 。PubChem（米国国立衛生研究所のデータベース）の値で比べてみましょう。

生成物	沸点など	出典
SiF_4（シリコン＋フッ素）	−86 ℃	[17]
$SiCl_4$（シリコン＋塩素）	約58 ℃（57.57 ℃）	[18]
$CuCl_2$（銅＋塩素）	993 ℃で分解してCuClになる	[19]
CuCl	1,490 ℃	[20]

事実

上の沸点は主に標準的な圧力での物性値で、低圧の装置内でその温度まで加熱する、という指定ではありません。実際は処理温度での蒸気圧や脱離速度も重要です。SiF_4などに比べ、銅の塩化物は通常の配線加工の温度では揮発しにくく、**従来型の塩素系RIEで銅配線を作りにくい**理由になります。Stanfordの講義資料は、この難しさに対して、絶縁膜に溝を先に掘って銅を埋める**ダマシン法**を説明しています [21] 事実 。日本半導体歴史館も、銅はRIEでのエッチングが難しく、それが実用化を妨げていたが、ダマシン法では銅のパターンをRIEで直接削り出す必要がない、と書いています [9] 事実 。銅を削る方法が一切存在しないわけではありません。物理的なイオンミリングや特殊な化学プロセスもありますが、再付着など別の課題があります。3-4のめっきとCMPは、この通常の反応生成物の揮発性の問題を避ける加工の組み合わせです 解説 。

膜ごとに、ガスを選ぶ

Stanfordの講義資料には、膜の種類ごとに使うガスの表があります [1] 事実 。

削る膜	主なガス	特徴（講義資料の記述）
ポリシリコン	HBr、Cl_2、Cl_2/HBr/O_2	非常に異方的、SiO_2に対する選択比が最も高い
ポリシリコン	SF_6、CF_4	等方的かそれに近い、SiO_2に対する選択比が低い
SiO_2	CF_4/H_2、CHF_3/O_2、C_2F_6、C_3F_8	非常に異方的、シリコンに対して選択的
SiO_2	CHF_3/C_4F_8/CO	異方的、窒化シリコンに対して選択的

事実

SiO_2を削り、シリコンで止める工夫

SiO_2の下にシリコンがあるとき、SiO_2だけを削って、シリコンの表面で止めたい場面がよくあります。フッ素が多いガスでは、シリコンもよく削れてしまいます。MITの講義資料は、$4F + SiO_2 \rightarrow SiF_4 + O_2$ では等方的すぎ、シリコンとの選択比も低いので、**フッ素を減らし、炭素を増やす**と書いています [3] 事実 。

テキサス大学の講義は、C_4F_8やC_4F_6などのフルオロカーボンでは、**フッ素と炭素の比（F/C比）**が、どれだけ高分子の膜ができやすいかを決める重要な値だとしています。SiO_2は膜の中の酸素で炭素を一酸化炭素として取り除けるので削れ続けますが、シリコンの上には炭素の膜が積もってエッチングが止まります。これがSiO_2とシリコンの**選択比**を生みます。F/C比が低すぎると、膜が積もる一方になってSiO_2も削れなくなります [6] 事実 。

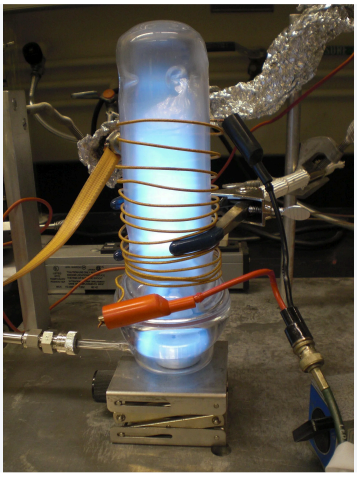
> **物理のツボ③：酸素を持っている膜だけが、炭素を「燃やせる」**
>
> SiO_2のエッチングでは、$SiO_2 + C_xF_y +$ イオン $\rightarrow SiF_4$（気体）+ CO（気体）のように、膜に含まれる酸素が炭素をCOとして運び出します。テキサス大学の講義は、SiO_2のエッチングはすべてイオンのエネルギーで駆動されている、と書いています [6] 事実 。シリコンには酸素がないので、炭素の膜を自分で取り除けず、膜の下で守られます 解説 。同じプラズマの中で、**相手の膜の組成**によって「削れる」と「積もる」が分かれる — これが、化学の力で選択比を作るしくみです 解説 。

7. 技術編⑥ — 装置の進化：プラズマの「濃さ」と「強さ」を分けて操る

バレル型：レジストを灰にする

半導体の工程でプラズマが実用になったのは、1970年代です。最初に広まったのは、筒形の容器にウェハを並べる**バレル型**の装置で、主な用途は酸素のプラズマでレジストを取り除くこと（**アッシング**、灰にすること）でした。日本では、東京応化工業が1971年にプラズマを使ったレジストの剥離装置を発表しています [8] 事実 。1978年には、プラズマを作る部屋とウェハを置く部屋を分けた「ケミカルドライエッチング」の装置を、徳田製作所（現在の芝浦メカトロニクス）が発売しました [8] 事実 。

日本半導体歴史館は、プラズマエッチングがウェットの問題（均一性の不足、高温でのレジストの耐性、終点の検出の難しさ）の多くを解決したと説明しています。とくに、プラズマそのものや反応でできた物質の**光を見て終点を自動で検出できる**ようになったことが、トランジスタの寸法を正確に作ることにつながったとしています [8] 事実 。



プラズマエッチャーの中で、明るく青く光る酸素のプラズマ。MEMS（微小な機械の部品）の表面の炭素の汚れを取り除いているところ（圧力100 mTorr、高周波50 W。Commonsの説明による）。酸素のプラズマで有機物を気体にして取り除くのは、レジストのアッシングと同じ原理です 解説 。
画像：Maxfisch / Wikimedia Commons / CC0（掲載用に縮小・WebP化）

平行平板のRIE：1980年代

模様が細くなると、まっすぐ削れる**反応性イオンエッチング（RIE）**が必要になりました。日本半導体歴史館は、RIEを、真空の中でウェハを置いた電極と向かい合う電極のあいだに高周波をかけてプラズマを作り、そのとき生じる電界でイオンをウェハに垂直に引き込む方法だと説明しています。1980年代初めに導入され、はじめは半導体メーカーやその関連会社が作った装置が使われましたが、1980年代にAMAT（Applied Materials）などの専門の装置メーカーが現れ、日本でも東京エレクトロンや日製産業（現在の日立ハイテク）などが参入した、としています [10] 事実 。

同じころ、米国では**Lam Research**が1980年に設立されました [23] 事実 。創業者のDavid Lamは、のちのインタビューで、自分が単独の創業者であり、最初の製品はポリシリコンのエッチング装置で、ウェハを**1枚ずつ**処理し、真空を保ったままウェハを出し入れする**ロードロック**と、マイクロコンピュータによる制御、処理の手順を記録する「レシピ」の機能を備えていたと語っています [22] 事実 。1枚ずつ処理する考え方を最初に試みたのはおそらくTegal社だったが、それは研究開発の観点からだった、とも語っています [22] 事実 。



米国アラバマ大学ハンツビル校の研究室にある、Plasma-Therm社の反応性イオンエッチング（RIE）装置（790シリーズ）（Commonsの説明による）。研究用の装置で、量産工場の装置とは大きさや自動化の程度が違います 解説 。
画像：AlabamaUSA / Wikimedia Commons / CC BY-SA 3.0（掲載用に縮小・WebP化）

高密度プラズマ：1990年代

平行平板の装置には、弱点がありました。Stanfordの講義資料は、ふつうのプラズマ装置では、プラズマの密度がイオンのエネルギー（シースの電圧）と強く結びついていると書いています [1] 事実 。テキサス大学の講義も、平行平板型（CCP）では、プラズマの密度とイオンのエネルギーを独立に制御できないとしています [6] 事実 。電力を上げてイオンを増やすと、イオンのエネルギーも上がってしまう ―「たくさんのイオンを、やさしく当てる」ことが難しいのです 解説 。

そこで1990年代に、**プラズマを作る仕組み**と、**ウェハにイオンを引き込む電圧**を分ける装置が広まりました。日本半導体歴史館は、0.35 μmの世代以降、深い溝の加工にもっと密度の高いプラズマが必要になり、**1989年にアネルバのECRエッチャー、1990年に日立のマイクロ波プラズマエッチャー、1992年にLam ResearchのTCPエッチャー、1993年にApplied MaterialsのICPエッチャー**などが次々に登場したと説明しています [11] 事実 。

- **ICP（誘導結合プラズマ）／TCP**：装置の上のコイルに高周波を流し、その磁界の変化で生じる電界でプラズマを作ります [10] 事実 。ウェハの台には別の電源をつなぎ、イオンのエネルギーを調整します 解説 。
- **ECR（電子サイクロトロン共鳴）**：電磁石の磁場とマイクロ波（2.45 GHz）を使います [11] 事実 。磁場の中で電子がぐるぐる回る周期と、マイクロ波の周期を合わせると、電子が効率よく加速されます 解説 。
- **2周波のCCP**：平行平板のまま、高い周波数（27〜160 MHz程度）と低い周波数（2〜13.56 MHz程度）の2つの電源を使い、高い周波数側で主にプラズマ密度を、低い周波数側で主にイオンのエネルギーを調整しやすくします [5] 事実 。

テキサス大学の講義によると、平行平板型（CCP）の電離度は10^{-6}〜10^{-3}、プラズマの密度は10^{8}〜10^{10}個/cm³、圧力は10〜2,000 mTorrです。これに対しICPは、電離度10^{-3}〜10^{-1}、圧力1〜80 mTorrです [6] 事実 。ICPの密度については、資料によって10^{11}〜10^{12}個/cm³ [3] や、10^{13}までとするもの [6] があります 事実 。圧力が低いと、シースの中でイオンが気体とぶつかりにくく、まっすぐ届きます [6] 事実 。Lam Researchの技術者らの2015年の論文は、1990年代に複数の周波数を加えることで、プラズマの密度とイオンのエネルギーを、少なくとも部分的に**切り離して制御**できるようになったと書いています [13] 事実 。

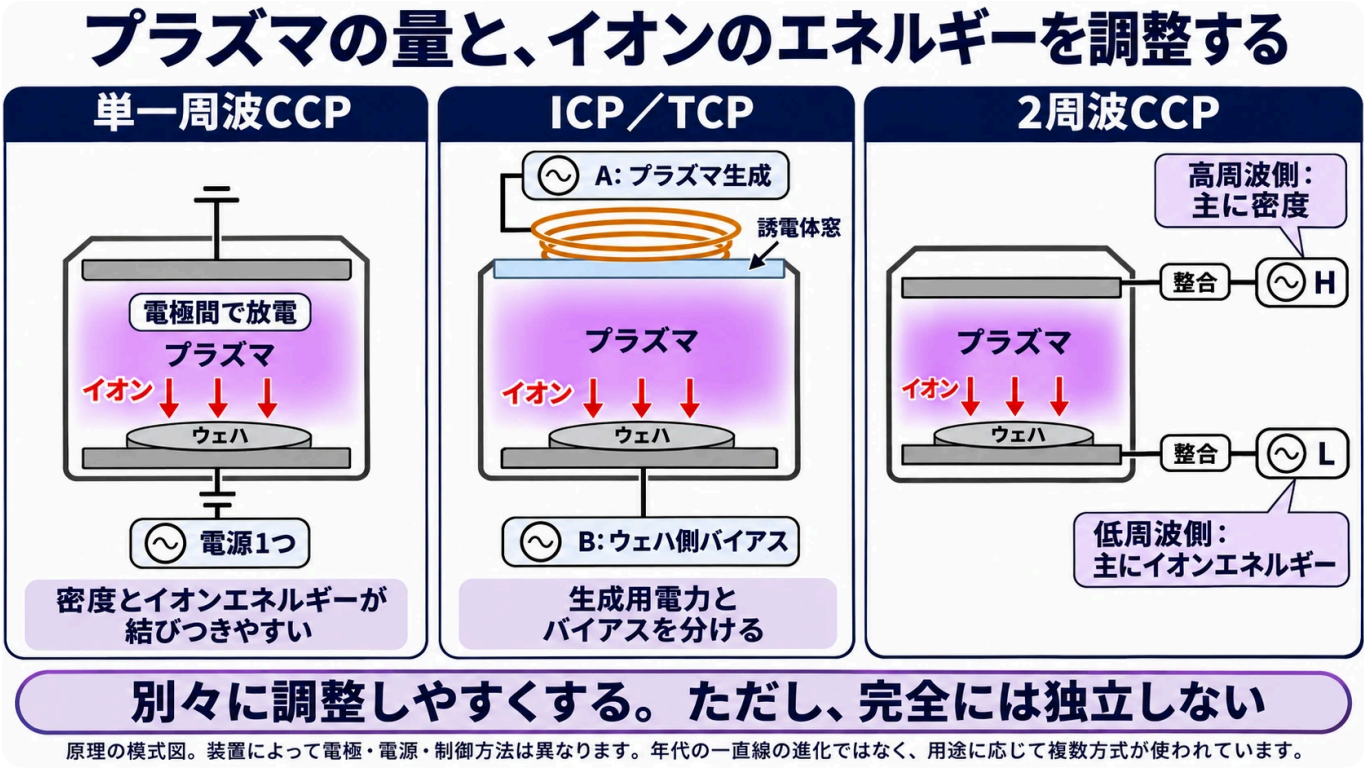


図5　CCP・ICP・2周波CCP：電力の役割を比べる（概念図）

図の読み方

ICPはコイルでプラズマを生成し、ウェハ側バイアスを別に設けます。2周波CCPでも密度とイオンエネルギーを調整しやすくしますが、互いの影響は残ります。図の配線は機能の説明で、具体的な装置の回路図ではありません [4] [5] [6] [13]。

8. 技術編⑦ — エッチングの困りごと

ドライエッチングは万能ではありません。日本半導体歴史館は、RIEの普及とともに、ウェハの表面の帯電によるゲート絶縁膜の静電破壊、模様の密度の違いによるエッチングの特性のばらつき、副生成物の付着による異物の発生などの問題が次々に表れ、装置メーカーとデバイスメーカーの恒常的な課題になったと書いています [10] 事実 。

- **ローディング効果**：削る面積が多いと、ラジカルが使い尽くされて、削れる速さが落ちます。ウェハの枚数や、削る部分の面積の割合で速さが変わります [3][7] 事実 。
- **マイクロローディング**：同じウェハの中でも、模様が密な場所と、まばらな場所で、削れる速さが変わります [3][7] 事実 。
- **ノッチング**：模様を削ったあと、側壁の根元に小さな溝（えぐれ）ができる現象です。Berkeleyの講義資料は、ポリシリコンの線を削る例で、端の線と、絶縁物でできた溝の底との間の電位差（表面の帯電）が原因だと説明しています [5] 事実 。
- **帯電ダメージ**：プラズマから流れ込む電荷が、トランジスタのゲートの薄い絶縁膜（2〜20 nm）を壊すことがあります [5] 事実 。

穴が深く細くなるほど、底にイオンやラジカルが届きにくくなり、削れる速さが落ちます。この「深い穴を掘る」話は、次の3-9で取り上げます 解説 。

光で「どこまで削れたか」を知る

エッチングを止めるタイミング（**終点**）も大切です。削りすぎれば下の層を傷め、足りなければ膜が残ります。テキサス大学の講義は、プラズマの光が終点の検出に使えるとし、たとえばSiO_2を削るときに出るCO（一酸化炭素）は**520 nm付近**の光を出す、という例を示しています [6] 事実 。SiO_2が削り終わってCOができなくなると、その光が弱くなり、終点がわかります 解説 。

9. 技術編⑧ — 原子層エッチング：表面の薄い改質層を、繰り返し除く

3-3では、表面反応を区切って薄膜を少量ずつ積む**ALD**を見ました。**原子層エッチング（ALE）**は、表面の改質と除去を分けて繰り返し、除去量を原子スケールで制御する考え方です。名前に「原子層」とあっても、**1サイクルで必ず原子1個分の厚さだけ除去する、という定義ではありません。**Lam Researchの技術者らの2015年の論文は、ALEを「互いに独立した反応のステップに分けて繰り返すこと、そして少なくとも1つのステップができるだけ自己制限的（一定量で自然に止まる）であること」と定義しています [13] 事実 。

シリコンの例では、

1. **改質**：塩素（Cl_2）をシリコンの表面に吸着させ、表面の薄い領域を塩素化して$SiCl_x$の状態にする
2. **除去**：約50 eVのアルゴンのイオンを当て、表面の$SiCl_x$だけを叩き出す

を繰り返します [13] 事実 。同じ論文によると、Si–Cl結合のエネルギーは4.2 eVで、Si–Si結合（3.4 eV）より強く、塩素と結びついたシリコンの下のSi–Si結合は約2.3 eVまで弱まると推定されています。これらは結合の状態を考える目安で、イオンのエネルギーと1本の結合エネルギーを直接比べて、除去量が決まるわけではありません。改質層を除去でき、未改質の下地を強く削りにくい**エネルギーの範囲**を選ぶことが要点です [13] 事実 。2013年にLamのTCP装置で行った実験では、1サイクルで約0.7 nm削れたとしています [13] 事実 。これはその材料・条件での結果で、全ALEに共通の値や、Siの原子面1枚の厚さではありません。改質の後と除去の後に余分なガスや生成物を排気し、反応を分離します。

ふつうの（連続の）エッチングでは、イオンが表面を荒らして、数nmの「混ざった層」ができます。同じ論文は、50 eVで約4 nm、高いエネルギーでは20 nmを超えるとしています [13] 事実 。連続エッチングと比べ、ALEは適切な条件で損傷やばらつきを抑えやすくします。時間や装置制御との両立は課題で、すべてのALEが無損傷になるわけではありません 解説 。

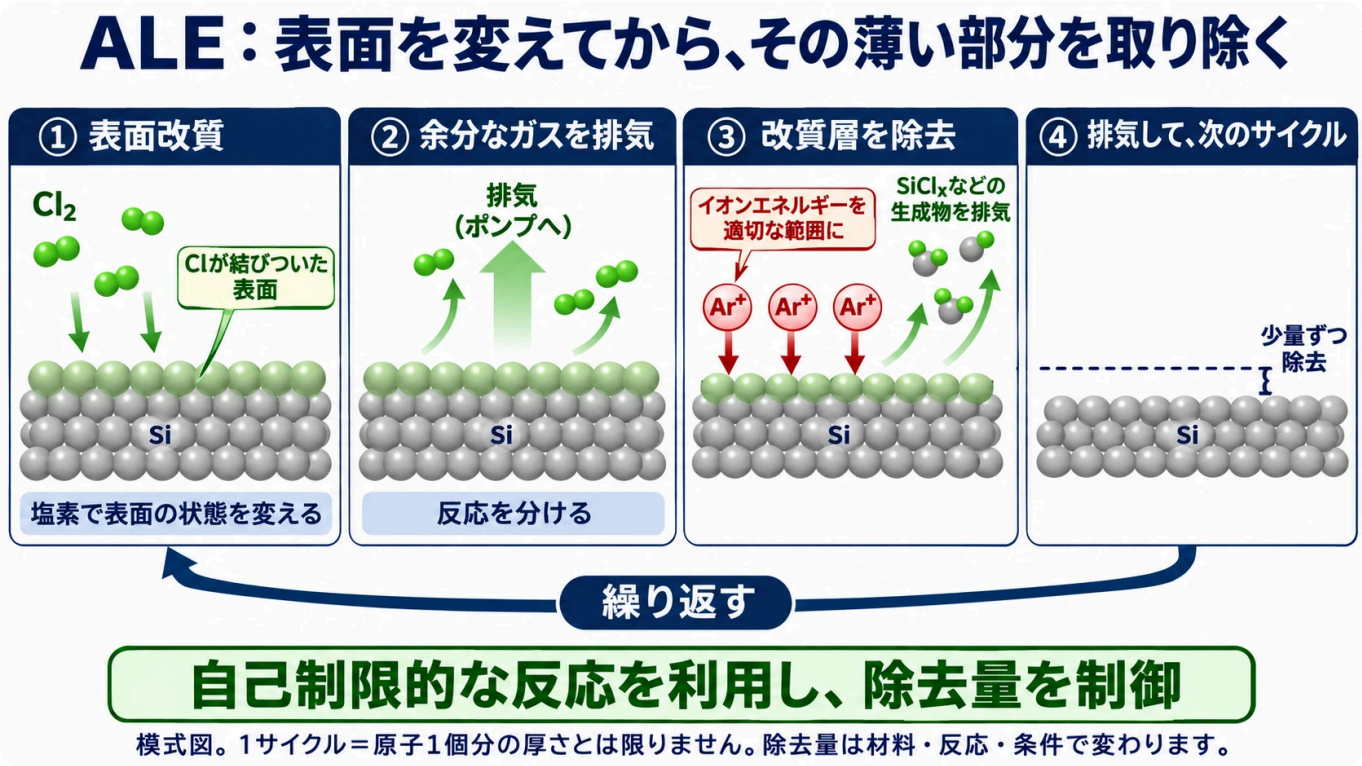


図6　ALE：改質と除去を分けるサイクル（概念図）

図の読み方

①表面を改質し、②余分な反応種を排気し、③改質層を除き、④生成物を排気して繰り返します。球は状態変化の記号で、正確な結晶構造や原子数を示しません。改質層の除去が進んだところで反応が弱まる自己制限性を利用します。0.7 nm/サイクルは本文の実験例で、すべてのALEに共通ではありません [13]。

10. 技術編⑨ — 温暖化ガスとの付き合い

SiO_2などのエッチングや、装置の掃除に使うフッ素のガス（PFCなど）には、二酸化炭素よりはるかに強い温室効果を持つものがあります。国連の気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第6次評価報告書の値は、次のとおりです [24] 事実 。

ガス	100年間の地球温暖化係数（CO_2＝1）	大気中の寿命
CF_4	7,380	50,000年
C_2F_6	12,400	10,000年
c-C_4F_8	10,200	3,200年
CHF_3	14,600	228年
NF_3	17,400	569年
SF_6	24,300	1,000年

事実

CF_4を1 kg大気に出すことは、温暖化への効果（100年間）でみると、CO_2を約7.4トン出すのと同じです 本稿の計算 。日米欧韓台中の半導体業界でつくる世界半導体会議（WSC）は、1999年に、2010年末までにPFCの排出を基準年より10%以上減らすことに合意し、10年間で32%減らしたとしています。その後の目標では、2020年に、ウェハの面積あたりの排出量を2010年より30%減らすことを掲げました。2018年の時点では、面積あたりの排出量は2010年より18%減った一方、排出量の総量は18%増えたとしています [25] 事実 。生産が増えるなかで総量をどう減らすかは、エッチングのガスと、排ガスを分解する装置の課題です 解説 。

11. 産業編① — 装置：米国2社と東京エレクトロン

市場の8割超を3社で

経済産業省の資料（2025年12月、グローバルネット社の資料をもとに作成）によると、エッチング装置の世界市場は**2兆3,383億円**で、露光装置（3兆5,561億円）に次ぐ大きさです。会社別のシェアは次のとおりです（図中に市場データの対象年は記されていません。2025年は資料の公表年です） [26] 事実 。

会社（国）	シェア
Applied Materials（米国）	33%
Lam Research（米国）	30%
東京エレクトロン（日本）	20%
NAURA（北方華創、中国）	5%
日立ハイテク（日本）	5%
その他	7%

事実

上位3社で83%、国別に足すと米国の2社で63%、日本の2社で25%です 本稿の計算 。経済産業省は同じ資料で、この資料の比較では日本のシェアが高い装置群は市場規模が比較的小さく、市場の大きい露光装置・薄膜形成・**エッチング**でシェアを取れていない、と分析しています [26] 事実 。

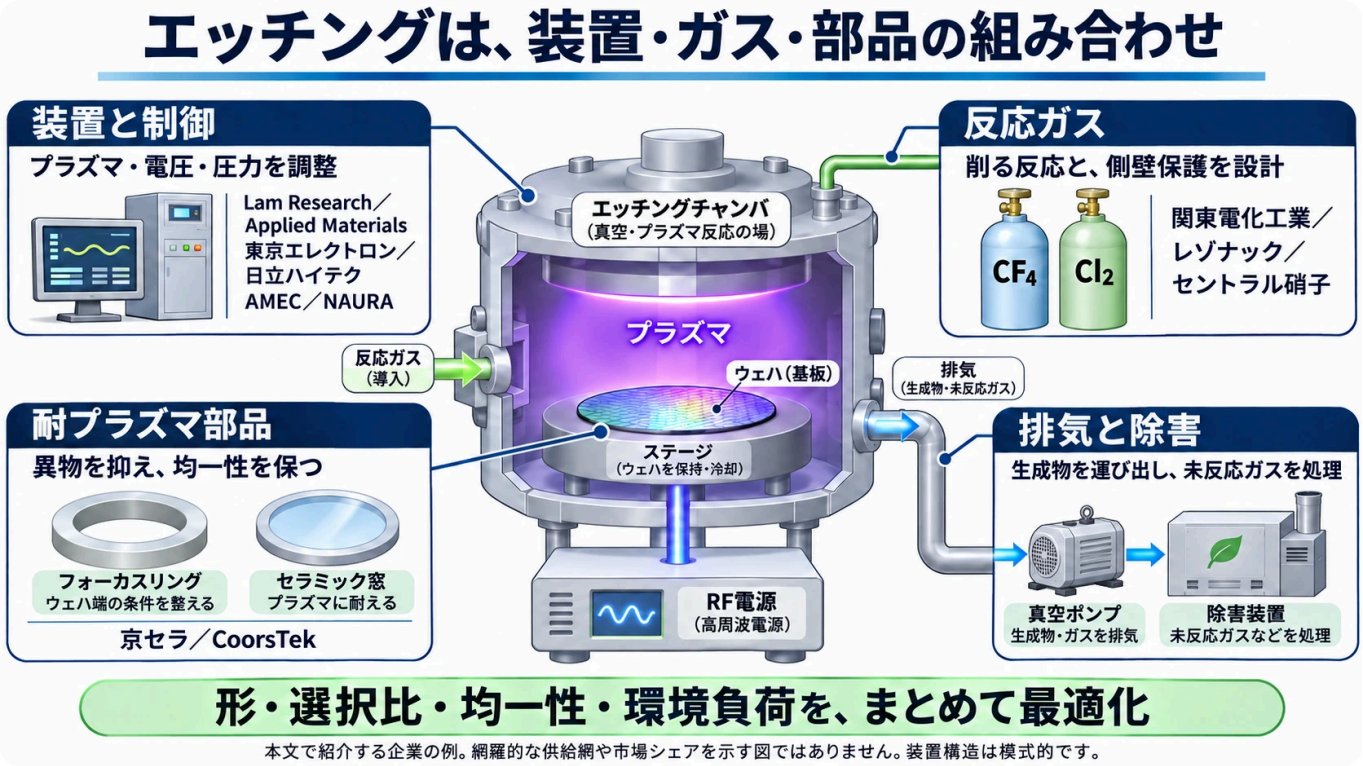


図7　エッチングを支える装置・ガス・耐プラズマ部品（概念図）

図の読み方

装置がプラズマやバイアスを制御し、ガスが反応と保護膜を作り、部品が汚染や形状のばらつきを抑えます。排気・除害も工程の一部です。会社名は本文の例で、図の並びや大きさは順位・市場シェア・すべての取引関係を示しません [23] [29] [31] [34–45]。

Lam Research — エッチングで育った会社

Lam Researchは1980年にDavid K. Lamが米国カリフォルニア州で創業し、1981年に最初の製品「AutoEtch」を出しました。1992年に最初のTCP（変圧器結合プラズマ）の導体エッチング装置、1995年に最初の2周波の誘電体エッチング装置、2014年に量産向けの原子層エッチング装置（Kiyo Fシリーズ）を出したとしています [27] 事実 。

同社は年次報告書（2026年6月期）で、成膜・**エッチング**・洗浄の市場で強い地位にあるとし、エッチングの市場での主な競合として**Applied Materials、日立、東京エレクトロン**を挙げています [23] 事実 。製品には、導体（シリコンや金属）のエッチングのKiyoやAkara、誘電体（絶縁膜）のFlex、3D NANDの深い穴に使うVantexなどがあります [23] 事実 。売上の**約34%は中国**で（前の期も34%、その前は42%）、上位の顧客4社がそれぞれ約12〜16%を占めています [23] 事実 。

同社は2024年7月の発表で、2019年に**世界で初めて**極低温（クライオ）エッチングを量産に投入したとし（同社の説明）、3D NANDの生産に使われている同社の高アスペクト比の誘電体エッチング用のチャンバー7,500超のうち、約1,000がクライオエッチングを使っているとしています [28] 事実 。クライオエッチングは、深い穴を掘る技術として3-9で取り上げます 解説 。

Applied Materials — 成膜と並ぶ柱

Applied Materialsは、年次報告書（2025年10月期）で、半導体製造装置の部門にエッチングを含めています。売上の30%が中国で（前の期は37%）、上位2社の顧客がそれぞれ約19%と15%を占めます [29] 事実 。同社の製品ページは、エッチング装置のSym3シリーズを「当社の歴史で最も速く立ち上がった製品ライン」とし、パルス状の電圧でイオンのエネルギーを制御する技術を使っていると説明しています [30] 事実 。

東京エレクトロン — プラズマとガスケミカルの装置

東京エレクトロンは、統合報告書2026で、プラズマエッチングで**世界2位**、ガスによる化学エッチング（プラズマを使わない方式）で**1位**としています（同社推定） [31] 事実 。前の表とは市場の区分・集計条件が異なるため、順位やシェアをそのまま同じ母集団として比べられません。2026年3月期の新しい装置の売上1兆7,754億円のうち、**エッチング装置は36%**です [31] 事実 。金額にすると約6,400億円です 本稿の計算 。製品には、チャンバーを向かい合わせに並べる設計の「Tactras」（2006年発売、最大6チャンバー） [32]、最大12チャンバーの「Episode UL」（2020年発売） [33] があります 事実 。同社は、深い穴に使う極低温エッチングで、温暖化係数の高いフルオロカーボン系のガスの多くを**フッ化水素ガス**に置き換え、第1世代の装置と比べてウェハ1枚あたりのCO_2の排出量を84%、電力を43%減らしたとしています [31] 事実 。

日立ハイテク — マイクロ波ECR

日立ハイテクは、0.1 Pa以下の高い真空で、安定した高密度のプラズマを作れる**マイクロ波ECR方式**のエッチング装置を展開しています。トランジスタの素子分離やゲート、マルチパターニング、配線などの導体のエッチングに使われるとしています [34] 事実 。同社自身によるシェアの記述は、本稿では見つかりませんでした。

中国の装置会社

- **AMEC（中微公司）**：2025年のエッチング装置の売上は約98億元（前年比35%増）です。平行平板型（CCP）の装置は2025年に1,000チャンバー（反応室）以上を出荷して累計5,000を超え、ICPは累計1,800チャンバーになったとしています。海外の3 nm以下の生産ラインでもCCPの装置を量産向けに販売しているとし、アスペクト比60対1の誘電体エッチング装置が国内の標準装置になったとしています [35] 事実 。同社は、世界のエッチング装置の市場は、海外の少数の会社が大きなシェアを占める寡占の状態だとも書いています [35] 事実 。
- **NAURA（北方華創）**：2025年のエッチング装置の売上が100億元を超えたとしています [36] 事実 。

数字は、装置の台数ではなく**チャンバーの数**で示されている点に注意が必要です 解説 。

12. 産業編② — ガスと部品：日本の素材の出番

エッチングガス

エッチングに使う特殊なガスでも、日本の会社が役割を担っています。

- **関東電化工業**：自社を「世界有数の製造能力と品質を誇る半導体・液晶用特殊ガスメーカー」とし、C_4F_6（ヘキサフルオロブタジエン）、COS（硫化カルボニル）、CH_3Fなどに力を入れるとしています [37] 事実 。温暖化係数の低い新しいエッチングガスとして、KSG-14がキオクシアの3D NANDの穴のエッチングに採用され [38]、KSG-5（温暖化係数1未満）がサムスン電子にCF_4の代わりのガスとして2025年から採用されたとしています [39] 事実 。
- **レゾナック**：エッチングに使う**高純度フッ化水素ガス**の製造を、川崎に加えて徳山でも2026年内に始める予定で、クライオエッチングなどの先端技術で需要が高まっているとしています [40] 事実 。
- **セントラル硝子**：1988年に高純度フッ化物ガスの多目的プラントを完成させ、装置のクリーニングガスで有力なサプライヤーの地位を確立したとし、次世代のエッチングガス「CEGシリーズ」を製品化しています [41] 事実 。

日韓の輸出管理と「フッ化水素」

2019年7月、経済産業省は、**フッ化水素・フッ化ポリイミド・レジスト**の3品目について、韓国向けの輸出を包括的な許可の対象から外し、1件ごとの許可を求める運用に切り替えました（7月4日施行） [42] 事実 。2023年3月23日からは、3品目を再び包括的な許可（特別一般包括許可）の対象にしました [43] 事実 。エッチングや洗浄に使うフッ素の化学品が、国と国の関係の中で注目された例です 解説 。

装置の部品：プラズマに耐える材料

エッチング装置の中では、ウェハだけでなく、装置の内側の部品もプラズマにさらされます。部品が削れると、異物（パーティクル）になってウェハを汚します 解説 。

- **京セラ**は、エッチングや成膜の装置には、プラズマに強く、異物が出にくく、熱に強く、電気の損失が少ないセラミックスの採用が広がっているとし、静電チャック（ウェハを静電気で吸着する台）やドーム・チャンバーの部品を挙げています [44] 事実 。
- **CoorsTek**（米国）は、エッチング装置の部品として、ウェハの周りを囲む**フォーカスリング**（ウェハの縁でのエッチングの均一性を高める）、ガスを吹き出すシャワーヘッド、窓などを挙げ、CVDで作った炭化ケイ素（SiC）、イットリア（Y_2O_3）とそのコーティング、単結晶シリコンのフォーカスリングなどの材料を示しています [45] 事実 。

素材の技術者の出番

エッチングは、**プラズマと材料の戦い**です 解説 。

- **ガスの分子設計**：選択比と形を保ちつつ、温暖化係数の低いガス（[38] [39] [41]）。F/C比で「削る」と「積もる」を操る化学（[6]）
- **高純度化**：フッ化水素などの不純物を極限まで減らす技術（[40]）
- **耐プラズマ材料**：イットリアやSiC、セラミックスで、削れにくく異物を出さない装置の部品（[44] [45]）
- **レジストとハードマスク**：エッチングに耐える「型紙」の材料。選択比は型紙の側の材料でも決まる（[1]）
- **温暖化ガスの分解**：排ガスのPFCを分解する技術（[24] [46]）

13. これから求められること

- **原子レベルの制御**：原子層エッチング（ALE）のように、表面の薄い領域を少量ずつ除去し、損傷やばらつきを抑える技術 [13] 事実 。
- **深い穴**：3D NANDなどの深い穴（アスペクト比60対1超） [13] [35] と、そのためのクライオエッチング [28] [31] 事実 。3-9で取り上げます。
- **温暖化ガスを減らす**：WSCは、2030年までに「PFC削減率」を85%にすること（2022年は82.6%）を約束しています [46] 事実 。同じ声明は、一部のHFCは半導体の製造に欠かせず、今のところ代わりの物質が知られていないとしています [46] 事実 。

14. まとめと次回予告

視点	ポイント
ウェットとドライ	SiO_2の等方的ウェットではアンダーカット。微細な形状の転写に方向性を持つRIEを利用。ウェットにも異方的な方式がある
2つのものさし	異方性 A＝1−b／d、選択比（化学20〜50、物理1〜5）
プラズマ	弱電離（CCPで10^{-6}〜10^{-3}）。電子は2〜4 eV（数万K）、電子より気体の温度は低い。ウェハは別途温度管理。ラジカルはイオンより多い場合がある
シース	軽い電子が逃げ、プラズマは＋。電子の少ないシースで正イオンが加速され、低圧では主に垂直に入射。小さい電極ほどマイナスに偏る（セルフバイアス）。13.56 MHzはISM周波数
化学×物理	Coburn と Winters：ガスだけ、イオンだけの和より約1桁速い。側壁は保護膜で守る
ガス	生成物が気体になること（SiF_4 −86 ℃、CuClは1,490 ℃→銅はダマシン）。SiO_2はフルオロカーボンのF/C比で選択比
装置	バレル型（1970年代）→ 平行平板RIE（1980年代）→ ECR・ICP・2周波（1990年代）。イオンの量とエネルギーを分ける
困りごと	ローディング、マイクロローディング、ノッチング、帯電ダメージ。終点は光（COは520 nm付近）で検出
ALE	表面改質・排気・除去・排気を繰り返す。0.7 nm/サイクルは実験例で、1原子層という意味ではない
環境	CF_4のGWPは7,380、寿命5万年
産業	市場2.3兆円。AMAT 33%・Lam 30%・TEL 20%・NAURA 5%・日立ハイテク 5%。ガス（関東電化・レゾナック・セントラル硝子）、部品（京セラなど）

次回は**3-9「エッチング（高アスペクト比）」**です。3D NANDのメモリでは、直径の数十倍の深さの穴を、何十億個も一度に掘ります。穴が深くなると、なぜ底まで削れなくなるのか ― そして、ウェハを極低温に冷やす「クライオエッチング」まで見ていきます。

15. 確認クイズ

1. ウェットエッチングが、細い模様の加工に向かないのはなぜですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> SiO_2の等方的なウェットエッチングなどでは、レジストの下に横から削れ込み（アンダーカット）、型紙の寸法を保ちにくいからです。結晶方位によって異方的に削るウェット方式もあります。日本半導体歴史館は、1975年ごろの3 μmの世代でこれが無視できなくなったとしています。

2. 「選択比」とは何ですか。化学反応による削り方と、イオンを物理的にぶつける削り方では、どちらが選択比が高いですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 削りたい膜と、削りたくないもの（レジストや下の層）の削れる速さの比です。化学反応による削り方のほうが高く（講義の例で20〜50）、物理的な削り方は低い（同1〜5）とされています。値は材料と条件で変わります。

3. エッチングに使うプラズマで、電子だけが数万Kと熱く、イオンや気体の熱的な温度が比較的低いのはなぜですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 電子はとても軽いので、電界から受け取ったエネルギーを、重い分子との弾性衝突ではエネルギーをあまり渡さないからです。励起や解離には電子のエネルギーが使われます。そのため気体全体を高温にせずに分子を分解できます。ただしウェハにはイオン衝突などで熱が入り、冷却・加熱による温度管理が必要です。

4. プラズマが、まわりの壁よりプラスの電位になるのはなぜですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 軽くて速い電子が先に壁へ逃げ、境界で電荷が分かれ、壁に対して高い電位ができるからです。本体はほぼ準中性を保ちます。高い電位は電子を押し戻し、イオンを壁へ引き寄せて、流れ出る電子とイオンの量をつり合わせます。

5. ドライエッチングで、膜が「まっすぐ下へ」削れるのはなぜですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> シースの電界により、正イオンは主にウェハ面に垂直に加速されます。穴の底ではイオンが保護膜の除去や反応を助け、側壁には保護膜が残りやすいためです。実際の入射角には広がりがあり、圧力・帯電・形状にも影響されます。

6. Coburn と Winters の実験は、何を示しましたか。

> **▼ 答えを見る**
>
> シリコンにXeF_2のガスだけ、アルゴンのイオンだけを当てても、ほとんど削れませんが、両方を一緒に当てると、それぞれの速さの和より約1桁速く削れること（化学と物理の相乗効果）を示しました。

7. 銅の配線は、なぜエッチングではなくダマシン法で作るのですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 銅の塩化物は通常の処理温度では揮発しにくく、一般的な塩素系RIEで配線を削り出しにくいからです。表の沸点は装置内の処理温度の指定ではありません。そこで、絶縁膜に溝を掘ってから銅を埋め込みます。

8. SiO_2だけを削って、下のシリコンでエッチングを止めるには、どんな工夫をしますか。

> **▼ 答えを見る**
>
> フッ素が少なく炭素が多い（F/C比の低い）フルオロカーボンのガスを使います。SiO_2は自分の酸素で炭素をCOとして運び出せるので削れ続けますが、シリコンの上には炭素の膜が積もってエッチングが止まります。

9. ICPや2周波のCCPの装置は、平行平板型の装置の何を改善しましたか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 平行平板型では、電力を上げるとイオンの数とエネルギーが一緒に上がってしまいます。ICPや2周波のCCPでは、プラズマを作る電源と、イオンを引き込む電源を分けて、イオンの数とエネルギーを（少なくとも部分的に）別々に調整できるようにしました。

0. エッチング装置の世界市場で、シェアの大きい会社を3社挙げてください。

> **▼ 答えを見る**
>
> Applied Materials（33%）、Lam Research（30%）、東京エレクトロン（20%）です（経済産業省の資料。年の記載なし）。

16. 用語集

エッチング
レジストなどで守られていない部分の膜を削り取る工程。

ウェットエッチング
液体の薬品で膜を溶かすエッチング。等方的になりやすい。

ドライエッチング
液体に浸さず、気体との反応やイオンなどで除去する方式。この回は主にプラズマを使う方式を扱う。プラズマを使わない気相エッチングもある。

等方性
どの向きにも同じ速さで削れること。

異方性
特定の向き（ふつうは真下）に削れること。A＝1−b／dで表す。

アンダーカット
等方的なエッチングで、レジストの下に横から削れ込むこと。

選択比
削りたい膜と、削りたくないものの削れる速さの比。

プラズマ
気体の一部が電子とイオンに分かれ、中性の粒子と混ざった状態。

電離度
気体の粒子のうち、イオンになっている割合。

ラジカル
結合の手が余った、反応しやすい原子や分子のかけら（F、Cl、CF3など）。

電子温度
電子の平均の運動エネルギーを温度で表したもの。1 eVは約11,600 K。

シース
プラズマと壁（ウェハ）の境目にできる、電子が少なく強い電界がかかった薄い層。

プラズマ電位
プラズマの電位。電子が先に逃げるので、壁よりプラスになる。

セルフバイアス
高周波をかけた電極が、電子とイオンの速さの差によって、平均でマイナスの電位になること。

ISM周波数
産業・科学・医療の機器のために国際的に割り当てられた周波数。13.56 MHzなど。

RIE（反応性イオンエッチング）
イオンをウェハに垂直に引き込んで、異方的に削るドライエッチング。

側壁保護膜
側壁に積もって、横から削れるのを防ぐ膜。底の膜はイオンで取り除かれる。

F/C比
フルオロカーボンのガスの、フッ素と炭素の比。小さいほど高分子の膜ができやすい。

ダマシン法
絶縁膜に溝を掘り、銅を埋めてから余分を削る配線の作り方。

アッシング
酸素プラズマなどで有機物を反応させ、主に揮発性の生成物として取り除くこと。「灰」がそのまま残る意味ではない。

CCP（容量結合プラズマ）
平行な電極の間に高周波をかけて作るプラズマ。

ICP（誘導結合プラズマ）
コイルに流す高周波の磁界の変化で作るプラズマ。LamはTCPと呼ぶ。

ECR（電子サイクロトロン共鳴）
磁場とマイクロ波で電子を効率よく加速し、低い圧力で高密度のプラズマを作る方式。

ローディング効果
削る面積が多いと、ラジカルが足りなくなって削れる速さが落ちること。

マイクロローディング
模様の密な場所とまばらな場所で、削れる速さが変わること。

ノッチング
側壁の根元に小さなえぐれができる現象。表面の帯電が原因になる。

終点検出
エッチングが下の層に達したことを、プラズマの光の変化などで検出すること。

原子層エッチング（ALE）
表面改質と除去を分離し、自己制限性を利用して少量ずつ削る方法。1サイクルの除去量は材料・条件によって変わる。

地球温暖化係数（GWP）
ある気体1 kgの温暖化への効果を、CO2 1 kgと比べた値。

フォーカスリング
ウェハの周りを囲み、ウェハの縁のエッチングを均一にする部品。

17. 参考資料（一次情報）

1. **J. D. Plummer, M. D. Deal, P. B. Griffin（Stanford大学 EE212、1999〜2000年。ワシントン大学 Dunham の講義ページに掲載）**「Class Handout #27 ETCHING - Chapter 10（PDF p.1〜17）」 — 資料を開く
2. **MIT OpenCourseWare**「6.152J Micro/Nano Processing Technology, Lecture 16 Wet Etching（2005年、p.8〜9、p.16）」 — 資料を開く
3. **MIT OpenCourseWare**「6.152J Micro/Nano Processing Technology, Lecture 17 Dry Etching（2005年、p.1〜5、p.18、p.22、p.26、p.28）」 — 資料を開く
4. **M. A. Lieberman（UC Berkeley）**「A Short Course on the Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, Day 1（2015年、PDF p.10〜17、p.24、p.63、p.97〜98）」 — 資料を開く
5. **M. A. Lieberman（UC Berkeley）**「同 Day 2（2015年、PDF p.90、p.98、p.112〜113、p.133）」 — 資料を開く
6. **S. Sirard（Lam Research）、テキサス大学オースティン校の講義**「Introduction to Plasma Etching, Day 1（2017年、p.10〜11、p.15、p.17、p.23、p.26、p.28〜30、p.38、p.40、p.53〜61）」 — 資料を開く
7. **S. Sirard（Lam Research）、テキサス大学オースティン校の講義**「Introduction to Plasma Etching, Day 2（2017年、p.11、p.14）」 — 資料を開く
8. **日本半導体歴史館**「1970年代後半 等方性プラズマエッチングの利用」 — 資料を開く
9. **日本半導体歴史館**「1990年代後半 銅配線の形成にダマシン法を採用」 — 資料を開く
10. **日本半導体歴史館**「1980年代前半 異方性プラズマエッチング装置（RIE）の導入」 — 資料を開く
11. **日本半導体歴史館**「1990年代前半 高密度プラズマ（ECR・ICP）のエッチングとCVD」 — 資料を開く
12. **J. W. Coburn, H. F. Winters（IBM Research Laboratory）**「Ion- and electron-assisted gas-surface chemistry—An important effect in plasma etching, J. Appl. Phys. 50(5), 3189–3196（1979年。書誌はCrossrefで確認。図は[1][5]の再掲による）」 — 資料を開く
13. **K. J. Kanarik ほか（Lam Research）**「Overview of atomic layer etching in the semiconductor industry, J. Vac. Sci. Technol. A 33, 020802（2015年、Sec. I〜IV）」 — 資料を開く
14. **NIST**「CODATA 2022 proton-electron mass ratio」 — 資料を開く
15. **米国連邦規則集（eCFR）**「47 CFR §18.301 Operating frequencies（ISM機器の周波数）」 — 資料を開く
16. **米国連邦規則集（eCFR）**「47 CFR §2.106 周波数分配表（ITU無線通信規則の国際脚注5.150を収録）」 — 資料を開く
17. **PubChem（米国国立衛生研究所）**「Silicon tetrafluoride（CID 24556）Boiling Point」 — 資料を開く
18. **PubChem（米国国立衛生研究所）**「Silicon tetrachloride（CID 24816）Boiling Point」 — 資料を開く
19. **PubChem（米国国立衛生研究所）**「Cupric chloride（CID 24014）Boiling Point」 — 資料を開く
20. **PubChem（米国国立衛生研究所）**「Cuprous chloride（CID 62652）Boiling Point」 — 資料を開く
21. **K. Saraswat（Stanford大学 EE311）**「Copper Interconnect（講義ノート、p.3、p.5、p.7）」 — 資料を開く
22. **Computer History Museum／SEMI**「Oral History of David K. Lam（2004年収録、p.3〜5）」 — 資料を開く
23. **Lam Research**「Form 10-K（2026年6月期、p.4、p.6〜7、p.11、p.24、p.70）」 — 資料を開く
24. **IPCC**「AR6 WG1 Chapter 7 Supplementary Material, Table 7.SM.7（PDF p.17、p.21）」 — 資料を開く
25. **World Semiconductor Council**「Joint Statement of the 23rd Meeting（2019年5月、厦門、p.4〜5）」 — 資料を開く
26. **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
27. **Lam Research**「History（会社の沿革）」 — 資料を開く
28. **Lam Research**「Lam Research Introduces Lam Cryo 3.0 Cryogenic Etch Technology…（2024年7月31日）」 — 資料を開く
29. **Applied Materials**「Form 10-K（2025年10月期、p.7、p.30〜31）」 — 資料を開く
30. **Applied Materials**「Sym3 Z Magnum Etch（製品ページ）」 — 資料を開く
31. **東京エレクトロン**「統合報告書2026（PDF p.11、p.15、p.20、p.55、p.83）」 — 資料を開く
32. **東京エレクトロン**「Tactras シリーズ（製品ページ）」 — 資料を開く
33. **東京エレクトロン**「Episode UL シリーズ（製品ページ）」 — 資料を開く
34. **日立ハイテク**「マイクロ波ECRエッチング装置（製品ページ）」 — 資料を開く

35. **中微公司（AMEC）**「2025年年度報告（p.25、p.32、p.42〜43、p.55）」 — 資料を開く
36. **北方華創（NAURA）**「2025年年度報告（p.19）」 — 資料を開く
37. **関東電化工業**「有価証券報告書（第118期、p.27）」 — 資料を開く
38. **関東電化工業**「KSG-14（製品ページ）」 — 資料を開く
39. **関東電化工業**「KSG-5 採用のお知らせ（2026年5月7日）」 — 資料を開く
40. **レゾナック**「半導体向け「高純度フッ化水素ガス」の製造体制を強化（2026年6月25日）」 — 資料を開く
41. **セントラル硝子**「電子材料（製品ページ）」 — 資料を開く
42. **経済産業省**「「輸出貿易管理令の運用について」等の一部を改正する通達について（2019年7月1日）」 — 資料を開く
43. **経済産業省**「同（韓国向けの輸出管理制度の見直し、2023年3月）」 — 資料を開く
44. **京セラ**「半導体製造装置用部品（製品ページ）」 — 資料を開く
45. **CoorsTek**「Etch（半導体のエッチング装置向け部品）」 — 資料を開く
46. **World Semiconductor Council**「第29回 共同声明（2025年5月、日本語版、p.8、p.10）」 — 資料を開く

18. 主張と出典の対応表

本文の主張	根拠	区分
選択性は化学・方向性は物理、選択比25〜50が望ましい、A＝1−b／d、ウェットは主流ではほぼ使われない、10^{15}個の中性粒子と1〜10%のラジカル・10^{8}〜10^{12}のイオン、密度とイオンのエネルギーが結びつく、プラズマ電位が＋の理由、RIEは小さい電極、Coburn–Wintersの図と「両方あるときだけ」、2つのしくみ、側壁保護、ガスの表	Stanford EE212 [1]	事実
6:1のフッ酸で120 nm/分・Siに対し約100、選択比20〜50と1〜5	MIT L16 [2]	事実
1970年代までウェット、13.6 MHzで電子10 ns・Ar^{+} 2 μs、ICP 10^{11}〜10^{12}、ローディング、生成物は沸点が低い必要、4F＋SiO_2は等方的・Fを減らしCを増やす	MIT L17 [3]	事実
CF_4→CF_3＋F・Si＋4F→SiF_4、1 V⇔11,600 K、低温プラズマでもウェハの温度管理が必要、n_g≒3.3×10^{16}p、CCPのTe 2〜4 V・n 10^{9}〜10^{10}、セルフバイアスとq 1〜2.5、13.56 MHz	Lieberman Day1 [4]	事実
500 Vのアルゴンイオンで10倍、ゲート酸化膜2〜20 nm・帯電ダメージ、ノッチングの原因、2周波（27〜160 MHzと2〜13.56 MHz）	Lieberman Day2 [5]	事実
弱電離・CCP 10^{-6}〜10^{-3}・10^{8}〜10^{10}・10〜2,000 mTorr・独立に制御できない、ICP 10^{-3}〜10^{-1}・1〜80 mTorr・10^{11}〜10^{13}、熱では10^{3}〜10^{4} K、イオンと気体の熱的温度は電子より低い、電子が壁へ逃げる・プラズマ電位＋、シース数mm・10〜40 eV・約1,000 eV・ほぼ垂直、Coburn–Wintersの古典的実験・1桁、OESのCO 520 nm、F/C比と選択比・炭素の膜・エッチストップ、SiO_2はイオンのエネルギーで駆動	Sirard Day1 [6]	事実
マクロローディング・マイクロローディング	Sirard Day2 [7]	事実
1970年代のバレル型・東京応化1971年・徳田製作所1978年、ウェットの3つの問題、終点の自動検出	日本半導体歴史館 [8]	事実
銅はRIEが難しく、ダマシンでは不要	日本半導体歴史館 [9]	事実
1975年ごろ3 μmでアンダーカットが無視できなくなりRIEへ、RIEの原理、1980年代のAMAT・TEL・日製産業の参入、ICPはコイル、RIEの課題	日本半導体歴史館 [10]	事実
1989年アネルバECR・1990年日立マイクロ波・1992年Lam TCP・1993年AMAT ICP、ECRの2.45 GHz	日本半導体歴史館 [11]	事実
Coburn と Winters の論文の書誌・所属	Crossref [12]	事実
1990年代の複数周波数、ALEの定義、Si–Cl 4.2 eV・Si–Si 3.4 eV・約2.3 eV、約50 eV、約0.7 nm（2013年）、混合層4 nmと20 nm超、60対1超	Kanarik ほか [13]	事実

本文の主張	根拠	区分
陽子と電子の質量比	NIST [14]	事実
13.56 MHz ± 7 kHz がISM周波数	47 CFR 18.301、ITU脚注5.150 [15][16]	事実
SiF_4 −86 ℃、$SiCl_4$ 57.57 ℃、$CuCl_2$ 993 ℃で分解、CuCl 1,490 ℃	PubChem [17–20]	事実
銅はドライエッチングできずダマシン	Stanford EE311 [21]	事実
David Lam が単独で創業、1枚ずつ・ロードロック・レシピ、Tegal	オーラルヒストリー [22]	事実
1980年設立、強い地位、競合3社、製品、中国34%、顧客4社	Lam 10-K [23]	事実
GWPと寿命	IPCC AR6 [24]	事実
1999年の目標・32%減、2020年の目標、2018年の実績	WSC 2019 [25]	事実
市場2兆3,383億円・各社のシェア、日本はエッチングでシェアを取れていない	経済産業省 [26]	事実
1980年創業・1981年AutoEtch・1992年TCP・1995年2周波・2014年ALE	Lam [27]	事実
2019年に世界初（同社の説明）・7,500超のうち約1,000	Lam [28]	事実
中国30%、顧客2社	AMAT 10-K [29]	事実
Sym3は最も速く立ち上がった製品ライン	AMAT [30]	事実
プラズマエッチング2位・ガスケミカル1位（同社推定）、エッチング36%、クライオでCO_2 84%減・電力43%減	TEL [31]	事実
Tactras 2006年・6チャンバー、Episode UL 2020年・12チャンバー	TEL [32][33]	事実
マイクロ波ECR・0.1 Pa以下・用途	日立ハイテク [34]	事実
売上約98億元・CCP 1,000超／累計5,000超・ICP 1,800・3 nm以下・60対1・寡占	AMEC [35]	事実
エッチング装置の売上100億元超	NAURA [36]	事実
世界有数のガスメーカー、C_4F_6・COS・CH_3F	関東電化 [37]	事実
KSG-14 キオクシア、KSG-5 サムスン	関東電化 [38][39]	事実
高純度フッ化水素ガス・徳山	レゾナック [40]	事実
1988年のプラント、クリーニングガス、CEG	セントラル硝子 [41]	事実
2019年の3品目・2023年の見直し	経済産業省 [42][43]	事実

本文の主張	根拠	区分
耐プラズマのセラミックス	京セラ [44]	事実
フォーカスリング・SiC・イットリア	CoorsTek [45]	事実
PFC削減率85%（2030年）、HFCの代替がない	WSC 2025 [46]	事実
電離度の試算、質量比7.3万・速さの比270倍と2,400〜3,400倍、23,000〜46,000 K、Coburn–Wintersの図からの読み取り、上位3社83%・国別の合計、TELのエッチング約6,400億円、CF_4 1 kg＝CO_2 7.4トン	本稿の計算	本稿の計算
13.56 MHzを使うのはISMの割り当てのため	本稿の推測	推測

最終更新：2026年11月7日／技術は大学の講義資料（Stanford・MIT・UC Berkeley・UT Austin）、原論文、日本半導体歴史館、米国の規則と国際規則、IPCC、物性値はPubChemとNIST、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。