SEMICONDUCTOR FRONT-END · PART 3-4

成膜（スパッタ・めっき）
― 原子をはじき飛ばし、液の中で銅を育てる

前回のCVDとALDは、ガスの化学反応で膜を積みました。今回は、もっと「力ずく」に見える2つの方法です。**スパッタ**は、プラズマの中のイオンを金属の板（ターゲット）にぶつけ、ビリヤードのように原子をはじき飛ばしてウェハに積みます。**電気めっき**は、硫酸銅の液の中で電流を流し、銅を育てます。チップの銅配線は、スパッタで「下地」を作り、めっきで穴を「底から」埋める、この2つの組み合わせで作られています。なぜ磁石を使うと速く積めるのか。なぜ穴は入り口からふさがってしまうのか。めっきの液に混ぜるわずかな添加剤が、なぜ穴を底から埋めるのか。装置で強い米国の会社と、ターゲット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 3-4／難易度 ★★☆（3-3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 ― 金属の膜は、なぜ「はじき飛ばして」積むのか
3. 技術編② ― スパッタ：原子のビリヤード
4. 技術編③ ― 磁石で、プラズマを濃くする（マグネトロン）
5. 技術編④ ― 深い穴の奥まで、膜を付けられるか
6. 技術編⑤ ― チップのどこで、スパッタを使うか
7. 技術編⑥ ― 電気めっき：電気の量で、銅の量が決まる
8. 技術編⑦ ― 穴を「底から」埋める（スーパーフィル）
9. 技術編⑧ ― これからの配線と成膜
10. 産業編① ― 装置で勝っているのは誰か
11. 産業編② ― ターゲットとめっき液 ― 材料の会社の戦い
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（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

- スパッタで膜ができるしくみを、イオンと原子の「衝突」で説明できる
- マグネトロン、コリメーター、イオン化PVDが、それぞれ何を解決するための工夫かを説明できる
- 電気めっきで積める銅の量が電気の量で決まること（ファラデーの法則）と、添加剤で穴を底から埋めるしくみを説明できる
- スパッタ装置・めっき装置・ターゲット・めっき薬品の分野で、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

- **スパッタ**は、アルゴンのイオンを金属の板（ターゲット）にぶつけて原子をはじき出し、ウェハに積む方法です。半導体の成膜では広く、磁石で電子を閉じ込めてプラズマを濃くする**マグネトロン**で行われます。原子の飛ぶ向きと表面への付きやすさのため、深い穴では**入り口にたまって**、奥に届きにくいのが弱点です。
- **電気めっき**は、硫酸銅の液に電流を流して銅を積む方法です。積める量は、流した**電気の量**で決まります（ファラデーの法則）。液に混ぜた**添加剤**の働きで、穴を**底から**すき間なく埋められます。IBMが1997年に発表した銅配線は、この技術から始まりました。
- スパッタ装置では米国のApplied Materialsが、自社の装置で「この20年に作られたチップの大多数が作られた」としています。めっき装置では米国のLam Researchのほか、中国で開発・生産するACM Researchが世界3位（調査会社Gartnerの数字の引用）です。スパッタのターゲットでは、日本の**JX金属が約65%**（同社推定）を掲げます。

2. 技術編① — 金属の膜は、なぜ「はじき飛ばして」積むのか

CVDだけでは足りない

3-3で見たCVDとALDは、原料のガスを表面で反応させて膜を作りました。けれども、すべての金属に、ちょうどよいガスの原料があるわけではありません 解説 。アルミニウムやチタンのような金属の膜は、**金属そのものを原子にばらして、ウェハまで飛ばす**ほうが簡単です。これを**物理気相成長（PVD）**といいます 解説 。

スタンフォード大学の講義資料は、配線に使う材料と、その作り方を次のようにまとめています [1] 事実 。

膜の材料	主な作り方（講義資料の記述）
アルミニウム（Al）	マグネトロンスパッタ
チタン（Ti）、チタンタングステン（Ti-W）	マグネトロンスパッタ（ふつうの方式、イオン化、コリメート）。CVDは難しい
窒化チタン（TiN）	反応性スパッタ（チタンを窒素のプラズマ中でスパッタ）
銅（Cu）	電気めっきが、今いちばん一般的な方法

事実 （1999年度の講義資料の記述です。用途は代表例です）

PVDとめっきは、どちらも**金属の膜**を作るのが得意です。配線やその下地は、この2つの方法で作られています 解説 。

● 蒸着から、スパッタへ

PVDのいちばん素朴な方法は、**蒸着**です。金属を高い真空（10^{-5} Torrより低い圧力）の中で熱して蒸発させ、ウェハに付けます [1] 事実 。けれども、同じ講義資料は、蒸着には次の弱点があり、**当時の集積回路の成膜では、あまり使われない**と説明しています [1] 事実 。

- 合金や化合物を蒸発させにくい（成分ごとに蒸発のしやすさが違うため）
- 段差の被覆が悪い（原子がまっすぐ飛び、当たったところにくっつくため）

これは1999年度の集積回路向け講義の説明で、蒸着が研究や他の薄膜分野からなくなったという意味ではありません 解説 。

そこで使われるのが**スパッタ**です。プラズマを使ってターゲットをたたき、原子をはじき出してウェハに積みます。圧力は1〜100 mTorrと蒸着より高く、**合金や化合物を積むのも蒸着より得意**です [1] 事実 。

3. 技術編② — スパッタ：原子のビリヤード

● イオンが、原子をはじき出す

スパッタの装置は、真空の容器の中に、**ターゲット**（積みたい金属の板）とウェハを向かい合わせに置いたものです。アルゴンのガスを薄く入れ、ターゲットに大きなマイナスの電圧をかけると、プラズマができます。プラスの電気を持つアルゴンのイオン（Ar^+）は、マイナスのターゲットに向かって加速され、ぶつかって、ターゲットの原子をはじき出します [1] 事実 。はじき出された原子が飛んでいき、ウェハに積もって膜になります。

MITの講義資料は、典型的な条件を、圧力**10〜100 mTorr**、電圧**約1 kV**としています。アルゴンをイオンにするのに必要なエネルギーは約16 eVです [2] 事実 。

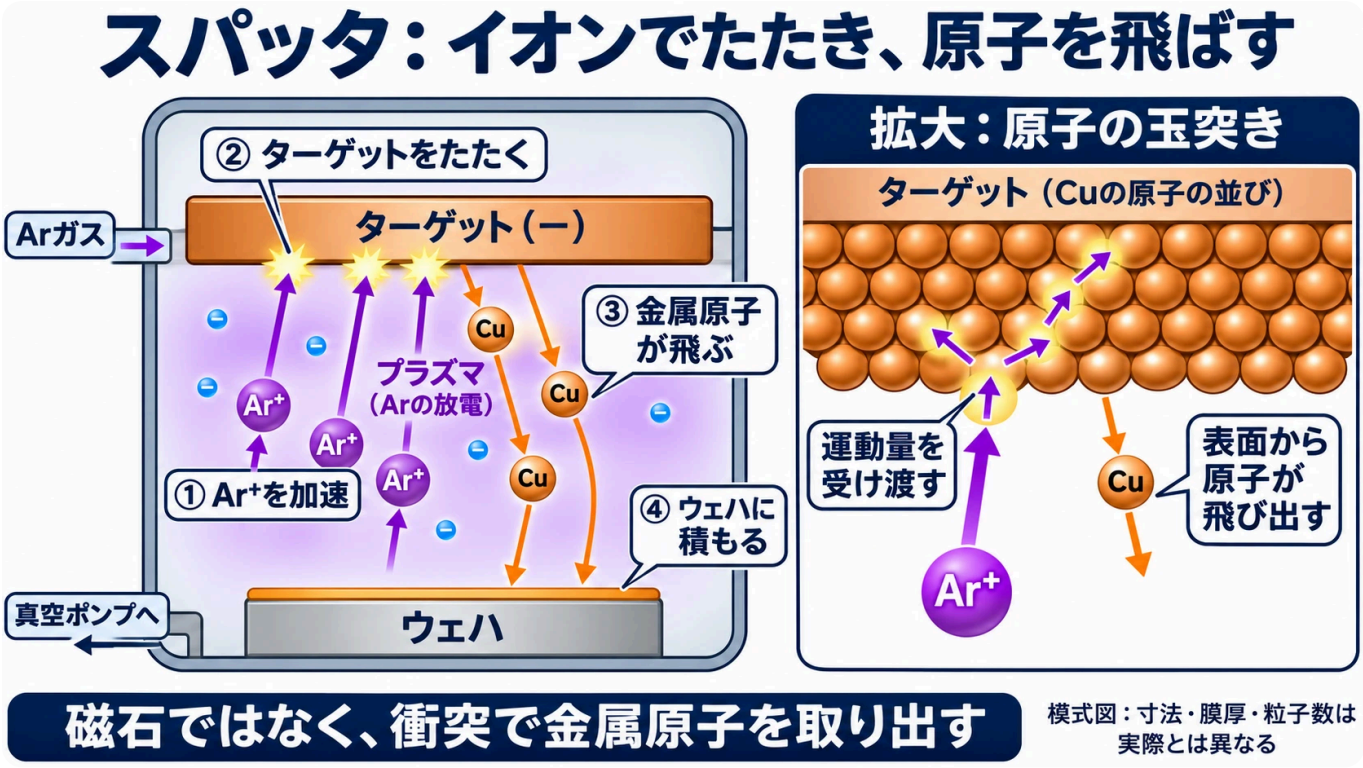


図1　スパッタのしくみ — アルゴンのイオンが、ターゲットの原子をはじき出す（概念図）

図の読み方

左は装置の全体、右はターゲットの表面の拡大です。プラスのイオンがマイナスのターゲットへ加速されて当たり、原子が玉突きのように動いて、表面の原子が外へ飛び出します。数値は講義資料の典型的な範囲で、大きさは模式的です。

スパッタ率 — イオン1個で、何個はじき出せるか

イオン1個が当たったときに、ターゲットから飛び出す原子の数を**スパッタ率（Y）**といいます [1] 事実 。MITの講義資料は、Yの代表的な範囲を**0.1〜3個**とし、蒸気圧ほど極端な材料差がないと書いています [2] 事実 。スタンフォード大学の講義資料も、Yはイオンのエネルギーと質量、ターゲットの材料、当たる角度で決まり、**材料による違いは、蒸気圧の違いほど大きくない**ので、合金の組成をそろえやすいと説明しています [1] 事実 。

これが、蒸着との大きな違いです。成分ごとのスパッタ率の差や再スパッタによって組成がずれることはあり、完全に同じ組成になる保証ではありません 解説 。蒸着では、蒸発しやすい成分から先に飛んでいってしまいます。スパッタでは、衝突で原子を取り出すため、蒸発のしやすさの差に左右されにくく、ターゲットの組成に近い膜を作りやすいのです 解説 。

物理のツボ①：重さが近いほど、エネルギーはよく伝わる

静止している原子にイオンが弾性的に正面衝突する単純モデルでは、ぶつけた球（質量M_1）が、ぶつけられた球（質量M_2）に渡せるエネルギーの割合は、次の式で表されます。MITの講義資料は、これを「**原子のビリヤード**」と呼び、M_1とM_2が近いほど、多くのエネルギーが伝わると説明しています [2] 事実 。

$$E_2 / E_1 = 4M_1M_2 / (M_1 + M_2)^2$$

（静止した原子との二体弾性衝突での最大値。実際の固体では、衝突が連鎖してエネルギーが分配されます）

計算してみる：アルゴン（原子量40）が、各金属の原子に正面からぶつかった場合です 本稿の計算 。

- 銅（63.5）：$4\times40\times63.5\div103.5^2 \fallingdotseq$ **0.95**
- アルミニウム（27）：$\fallingdotseq$ **0.96**
- タンタル（181）：$\fallingdotseq$ **0.59**

このモデルで渡せるエネルギーの最大割合は、銅やアルミニウムでは9割以上です。ずっと重いタンタルでは、約6割です。実際のスパッタ率には、表面の結合や連鎖衝突、入射角なども効きます 本稿の計算 。高校の物理で習う「同じ質量の球の正面衝突では、ぶつけた球が止まり、ぶつけられた球が同じ速さで飛び出す」の、原子版です 解説 。

一方、電子は原子よりはるかに軽いので、原子にぶつかっても、弾性衝突ではほとんどエネルギーを渡せません [2] 事実 。電子の質量はアルゴンの原子の約7万分の1です 本稿の計算 。ターゲットをたたくのは、重いイオンの役目なのです 解説 。

- **金属にはDC、絶縁体にはRF**

ターゲットが金属のように電気を通すなら、ターゲットに**直流（DC）**の電圧をかければスパッタできます [1] 事実 。ところが、ターゲットが酸化物のような絶縁体だと、当たったイオンのプラスの電気が表面にたまり、MITの講義資料によると、**1〜10マイクロ秒でプラズマが消えてしまいます** [2] 事実 。

そこで、絶縁体には**高周波（RF）**の電圧を使います [1] 事実 。RFの周期の一部で電子が表面へ届き、正の電荷の蓄積を打ち消せるためです。電子とイオンの動きやすさの差により、ターゲットには時間平均で負の自己バイアスが生じ、イオンを引き込みます 解説 。周波数には、スパッタ用に割り当てられた**13.56 MHz**が使われます [2] 事実 。

4. 技術編③ — 磁石で、プラズマを濃くする（マグネトロン）

- **電子を、ターゲットの近くに閉じ込める**

スタンフォード大学の講義資料は、**半導体用PVDの主流として、マグネトロンスパッタを説明しています。**電気を通すターゲットにはDC、絶縁体にはRFの電源を使います [3] 事実 。

マグネトロンは、ターゲットの裏に**磁石**を置いた装置です。磁石の力で、電子をターゲットの表面の近くに閉じ込めます。電子がアルゴンにぶつかる回数が増え、イオンがたくさんできて、プラズマが濃くなります [3] 事実 。同じ資料によると、マグネトロンで流せる電流の密度は**10〜100 mA/cm^2**で、ふつうのRFスパッタ（1 mA/cm^2）よりはるかに大きくなります。ターゲットとウェハの距離は5〜10 cm、圧力は2〜10 mTorr、電圧は数百Vです [3] 事実 。

物理のツボ②：電子は、磁場の中でくるくる回る

磁場の中を動く電子は、**ローレンツ力**を受けて、円を描くように回ります。高校の物理で習う式です。

$$r = mv_{\perp} / (|q|B)$$

MITの講義資料は、電子の磁場に垂直な速さを約6×10^6 m/s、磁場を0.1 Tとして、回る半径が**1 mmより小さい**と書いています [2] 事実 。

計算してみる：電子の質量m = 9.11×10^{-31} kg、電気量q = 1.60×10^{-19} Cを入れると、r ≒ 9.11×10^{-31}×6×10^6÷（1.60×10^{-19}×0.1）≒ **約0.34 mm**です 本稿の計算 。

この0.34 mmは、磁力線の周りを回る**旋回半径**で、ターゲット表面からの距離ではありません。電場、磁場、衝突が組み合わさり、電子の滞在時間が延びてArの電離が増えます [2] 事実 。重いAr$^+$は電子ほど磁場で曲がりやすくなく、主にターゲット近傍の電場で加速されて負のターゲットへ向かいます。磁石が金属原子を直接引き寄せているわけではありません 解説 。

ターゲットに刻まれる「レーストラック」

電子が閉じ込められ、電離とイオンの照射が集中する領域ほど、ターゲットが速く削られます。磁場の強さだけでなく、その向きや電場との関係も重要です 解説 。講義資料は、この部分を「**レーストラック**」と呼んでいます [3] 事実 。使い込んだターゲットには、磁石の形に沿って、輪の形の溝が刻まれます。

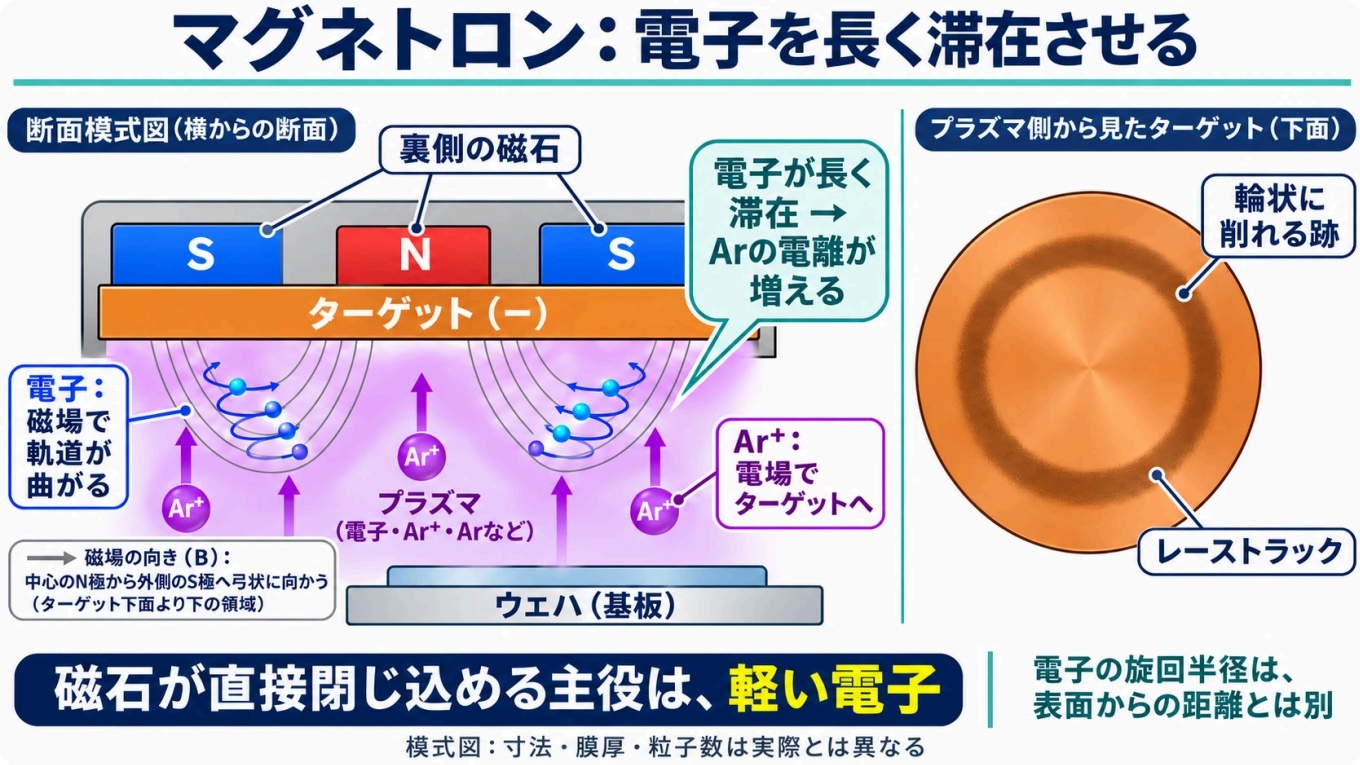
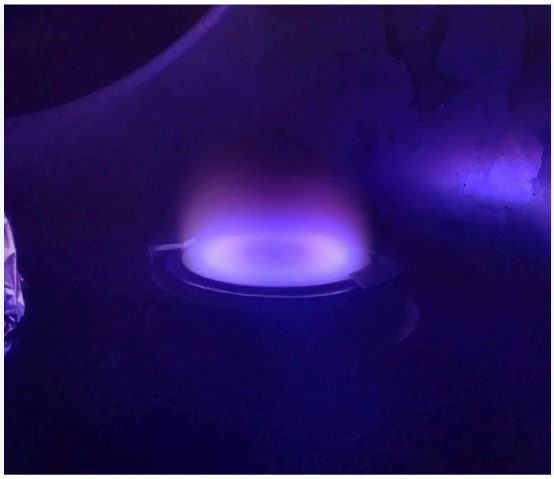


図2　マグネトロン ― 磁石で電子を閉じ込め、プラズマを濃くする（概念図）

図の読み方

左は断面、右はターゲットを上から見た図です。ターゲット近傍で電子が長く滞在することで電離が増え、イオンの照射が多い領域が輪の形に削れます。量産装置では、ターゲットの裏で磁石を回して削れる範囲を広げる設計もあります。



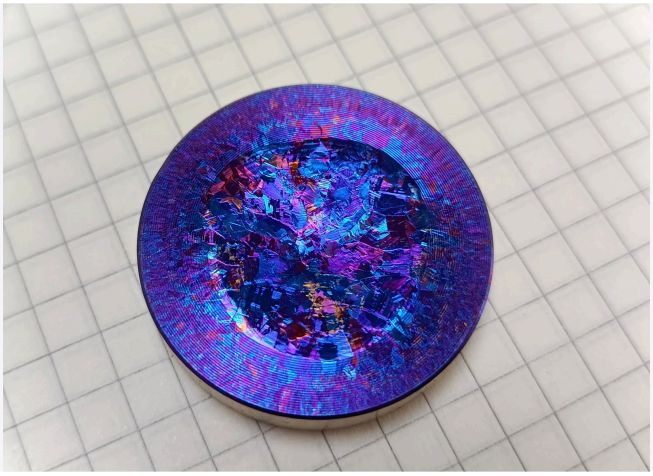
マグネトロンスパッタ源（カソード）の上で、アルゴンのプラズマが紫色に光っている様子（Commonsの説明による）。プラズマが輪の形に光っているのは、磁石で電子が閉じ込められている場所です。

画像：Inmodus / Wikimedia Commons / CC BY-SA 3.0（掲載用に縮小・WebP化）

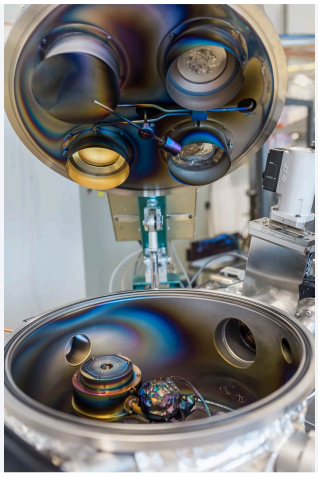


DCマグネトロンスパッタで使った、円形で平らなアルミニウムのターゲット。磁石の配置に沿って、輪の形の溝（エロージョン）が削れています（Commonsの説明による）。
画像：Axelfusillo / Wikimedia Commons / パブリックドメイン（元の画像から写真の部分を切り出し、縮小・WebP化）

溝が深くなって板を突き抜けそうになったら、ターゲットはそこで使えなくなります。ガラスなどに大面積で成膜する平らなマグネトロンについての特許は、平らなターゲットの利用率を「**40%以下**」、筒の形のターゲットを回す方式では「**90%以上**」と書いています [4] 事実 。ウェハ用の装置では、ターゲットの裏で**磁石を回して**、削れる場所を広げています [5] 事実 。高価な高純度の金属を、どれだけ無駄なく使い切れるかも、装置とターゲットの設計の腕の見せどころです 解説 。



円形のチタン製スパッタリングターゲット。加熱で表面が酸化し、青や紫の干渉色が出ています（Commonsの説明による）。
画像：范皓程 / Wikimedia Commons / CC BY 4.0（掲載用に縮小・WebP化）



金・チタン・パラジウムのターゲットを取り付けた、マグネトロンスパッタ装置の真空容器（チェコ科学アカデミー物理学研究所）（Commonsの説明による）。上のふたに、いくつものターゲットが付いています。研究用の装置で、量産の装置とは形が違います。
画像：Czech Academy of Sciences (Pavlína Jáchimová) / Wikimedia Commons / CC BY-SA 3.0（掲載用に縮小・WebP化）

- **窒素を混ぜれば、化合物の膜もできる（反応性スパッタ）**

アルゴンに窒素や酸素のような**反応するガス**を混ぜてスパッタすると、化合物の膜ができます。MITの講義資料は、チタンまたは窒化チタンのターゲットを、アルゴンと窒素の混合ガスでスパッタして、**窒化チタン（TiN）**を作る例を挙げています [2] 事実 。チタンのターゲットを窒素を含む雰囲気でスパッタして、TiNのバリア層を作る方法は、1990年代の特許にも書かれています [6] 事実 。

5. 技術編④ — 深い穴の奥まで、膜を付けられるか

- **原子は、まっすぐ飛んできて、くっつく**

3-3で、深い穴の奥まで膜を付けるには、分子が「くっつきにくい」ほうがよい、と見ました。スパッタは、その逆です。スタンフォード大学の講義資料は、**代表的なPVDを付着係数ほぼ1のモデルで扱い**、原子が届いた場所に取り込まれやすいと説明しています。CVDのほうが、穴の形に沿った膜（コンフォーマルな膜）を作れます [1] 事実 。

方法	原子の飛んでくる向きのそろい方（目安）	付着係数
ふつうのスパッタ	1〜4（ほとんどそろっていない）	1
イオン化・コリメートしたスパッタ	8〜80（よくそろっている）	1
LPCVDの酸化シリコン（TEOS）	1	0.05〜0.1

事実 （[1]のモデル表から抜粋。付着確率は材料・温度・表面状態で変わり、すべてのPVDで1とは限りません。左の数字は、飛んでくる向きの分布を$\cos^n\theta$で表したときのnで、大きいほど真上から飛んでくる原子が多いことを表します）

さらに、ふつうのスパッタでは、原子がいろいろな向きに飛び出します。Applied Materialsの特許は、ふつうのPVDで飛ぶのは**ほとんどが電気を持たない原子**で、イオンの密度は10^{9} cm^{-3}未満、飛ぶ向きは$\cos\theta$に比例する広い分布だと書いています [5] 事実 。

入り口が、ふさがってしまう

斜めに飛んできた原子は、穴の**入り口の角**にたくさん積もります。同じ特許は、これが入り口に張り出し（**オーバーハング**）を作り、ひどいときには入り口をふさいで、中に**空洞（ボイド）**を残すと書いています。そして、後で電気めっきで銅を埋める予定なら、**入り口がふさがった穴には、めっきができない**と指摘しています [5] 事実 。

穴の壁が、斜めから飛んでくる原子をさえぎる「影」になるので、穴の底の角には膜が薄くしか付きません [3] 事実 。1991年に出願された特許は、窒化チタンの膜が上面で135 nmなのに、穴の底では**40 nmしか付かなかった**例を挙げています [6] 事実 。

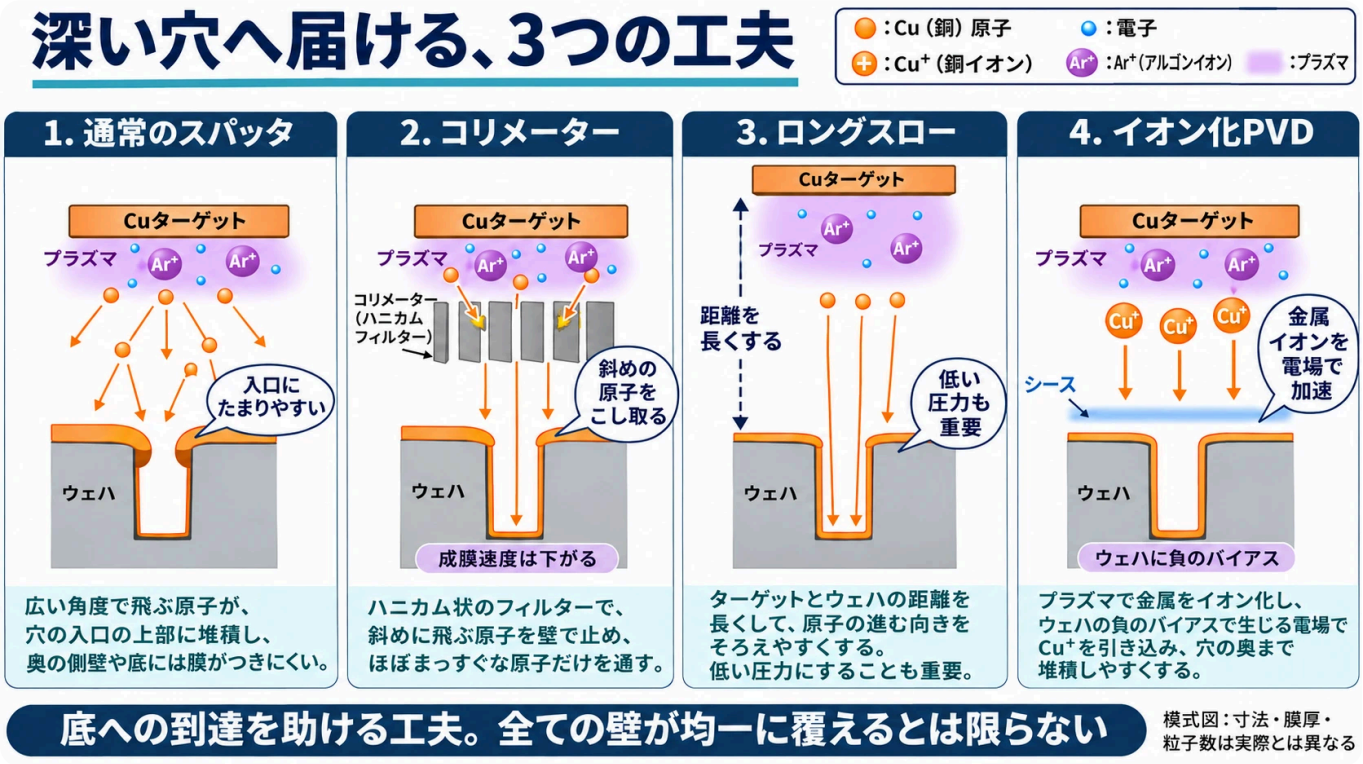


図3　深い穴へのスパッタ ― 入り口にたまる原子と、それを防ぐ3つの工夫（概念図）

図の読み方

同じ穴に、4つの方法で膜を付けたところを比べています。ふつうのスパッタでは入り口の角に膜がたまり、底が薄くなります。残りの3つは、どれも「真下に向かって飛ぶ原子」を増やす工夫です。数値は1990年代の特許に書かれた一例で、条件によって変わります。

工夫① コリメーター — 斜めの原子を、板でこし取る

ターゲットとウェハの間に、ハチの巣のような穴の開いた板（**コリメーター**）を置くと、斜めに飛ぶ原子は板に付いて、まっすぐ飛ぶ原子だけが通り抜けます。1991年に出願された特許の例では、厚さ1 cmの鋼の板にハチの巣の形に穴を開けたものを使いました [6] 事実 。

その結果、深さが幅の2倍の穴（アスペクト比2）で、穴の底に付く膜の厚さ（上面に対する割合）は、コリメーターなしの**約4%から、11%（穴の深さと幅が同じ板）、17%（深さが幅の2倍の板）**に増えました。ただし、成膜の速さは、穴の深さと幅が同じ板から2倍の板に替えると、**4分の1に落ちました** [6] 事実 。底によく付くようになる代わりに、原子の多くが板に付いてしまい、無駄になるのです 解説 。

工夫② ロングスロー — 距離を遠くする

ターゲットとウェハの距離を長くすると、遠くまで届くのは、まっすぐ飛んだ原子が中心になります。Applied Materialsの特許は、距離をウェハの直径の50%以上、好ましくは90%以上、さらに好ましくは140%以上にする**ロングスロー**を紹介しています。ただし、コリメーターと同じように**成膜の速さが落ちる**こと、穴の壁の上半分にはよく付くものの、**壁の下のほうと底には付きにくい**ことを、欠点として挙げています [5] 事実 。

ロングスローでは、途中でガスにぶつかって向きが変わらないように、圧力を低くすることも大事です 解説 。スタンフォード大学の講義資料は、気体の分子がほかの分子にぶつかるまでに進む距離（**平均自由行程**）を、およそ1／（260P） cm（Pは Torr）としています [3] 事実 。これを使うと、5 mTorrで約0.8 cm、1 mTorrで約3.8 cmです 本稿の計算 。この目安では、5〜10 cmという装置内の距離に対して衝突を無視しにくく、減圧するとその影響を減らせることがわかります 解説 。スパッタされた金属原子とArの衝突距離は、両者の衝突断面積やエネルギーにも依存するので、気体の平均自由行程から飛行中の衝突回数がそのまま決まるわけではありません（平均自由行程の見積もりは、資料や仮定する分子の大きさによって数倍違います。ここでは目安です）。

工夫③ イオン化PVD — 金属をイオンにして、電気で引き込む

飛んでいる金属の原子を、濃いプラズマの中で**イオン**にしてしまえば、ウェハにマイナスの電圧をかけて、**真下へ引き込める**はずです。IBMのニコルズ、ロスナゲルらの1996年の論文は、銅の原子の約**85%**をイオンにできると報告しています。イオンは、ウェハの表面の薄い層（シース）を通るときに電気で加速され、「**静電的にそろえられ**」て、穴の奥まで届きます [7] 事実 。同じ論文は、ふつうのスパッタでは、原子の飛ぶ向きがほぼばらばらなので、ダマシンの溝を埋めると**入り口がふさがって大きな空洞ができる**と書いています [7] 事実 。

Applied Materialsの特許は、さらに、プラズマの密度が10^{11} cm^{-3}以上の高密度プラズマで、イオンの向きが前方にそろい、穴の奥まで引き込まれると説明しています。一方で、この方式はふつう30 mTorr以上の高い圧力で行うため、たくさんのアルゴンのイオンが膜に当たってその熱が膜にたまり、銅が窒化タンタルなどのバリアの上で、50〜75 ℃という低い温度でも縮れてはじかれてしまう（ぬれなくなる）と書いています [5] 事実 。

そこで同社が出願したのが、**自己イオン化プラズマ（SIP）**です。強い磁石と大きな電力で、ターゲットから飛び出した銅の原子そのものをイオンにし、そのイオンが再びターゲットをたたきます。銅のイオンは、**1個で1個以上の銅の原子をはじき出す**ので、アルゴンのガスを減らしても、自己スパッタの維持が可能になります。ただし、放出された銅の電離率とターゲットへ戻る割合も十分である必要があります [5] 事実 。圧力を5 mTorr未満、好ましくは1 mTorr未満にでき、ロングスローと組み合わせると穴の埋め込みがよくなるとしています [5] 事実 。

もう一つの方法は、ウェハにも電圧をかけて、積もった膜を**アルゴンのイオンで少し削り直す**ことです（バイアススパッタ）。イオンは向きがそろっているので、入り口の張り出しを選んで削り、膜を穴の形に沿わせやすくなります [1] 事実 。

6. 技術編⑤ — チップのどこで、スパッタを使うか

銅の配線の「下地」を作る

今のチップの配線の主役は**銅**です。けれども、銅は、そのまま絶縁膜の上に置くことができません。スタンフォード大学の講義資料は、銅の下には、銅が周りへ広がるのを防ぐ**バリア層**が必要で、窒化チタン（TiN）、窒化タンタル（TaN）などの遷移金属の化合物が広く使われていると書いています [8] 事実 。

そして、電気めっきは、**絶縁膜の表面では起きない**ので、めっきの前に、銅の薄い膜（**シード層**）が必要です。講義で扱う従来のバリア上への直接めっきは難しく、連続した銅シードが使われます [8][9] 事実 。同じ資料は、バリア・ライナーやシード層は、主にPVDで作られていると書いています [8][9] 事実 。

つまり、銅の配線は、次の順番で作られます 解説 。

1. 絶縁膜に、配線の溝や穴を掘る（エッチング、3-8・3-9で扱います）
2. 溝や穴の内側に、**バリア層**を薄く付ける（主にスパッタ）
3. その上に、**銅のシード層**を薄く付ける（主にスパッタ）
4. **電気めっき**で、溝や穴を銅で埋める
5. はみ出した銅を、研磨で削り取る（CMP、3-11で扱います）

溝を掘ってから金属を埋め、余分を削るこの作り方を、**ダマシン**といいます。古代ダマスカスの象眼細工にちなんだ名前です 解説 。ダマシンと配線そのものは、3-12で詳しく扱います。この回では、2〜4の「膜の付け方」に注目します。これは代表的な工程例で、先端構造ではバリアやライナーにCVD・ALDなども組み合わせます 解説 。

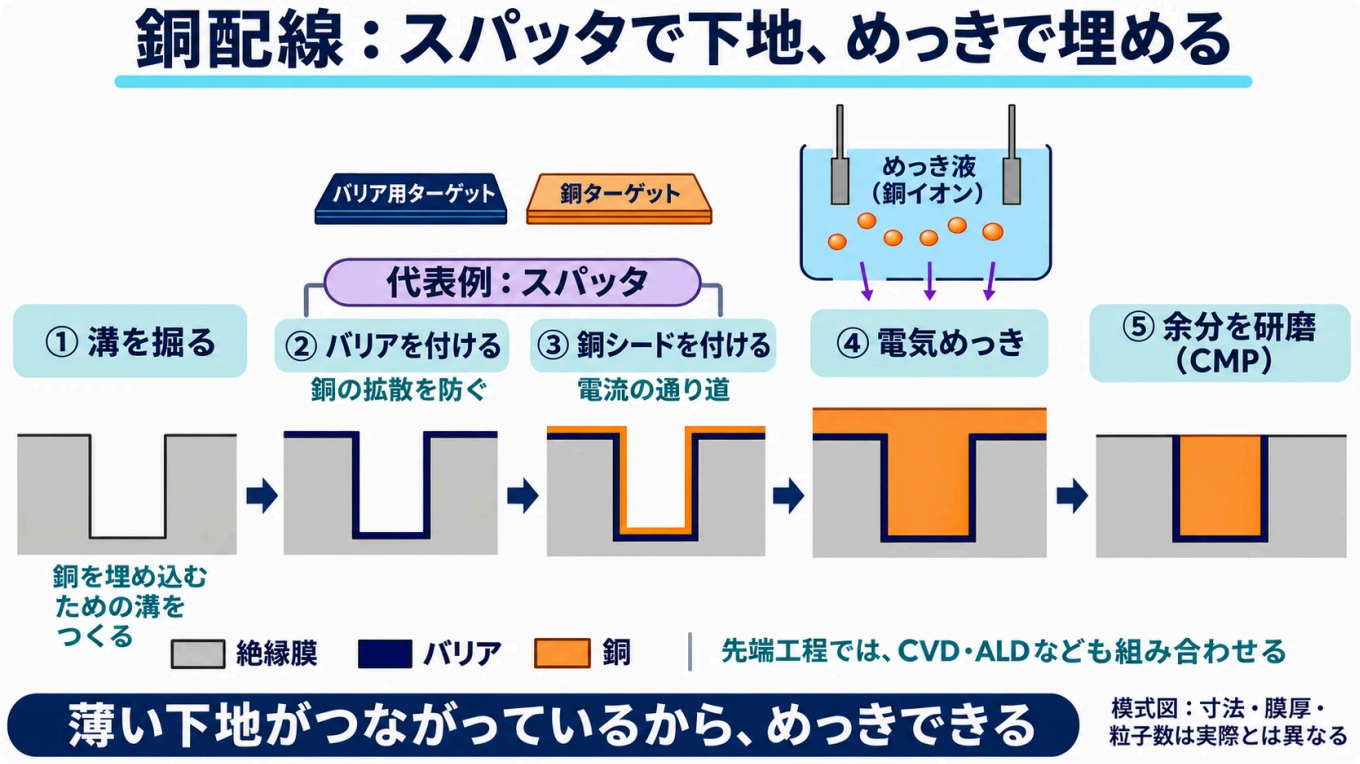


図4　銅の配線ができるまで ― スパッタで下地、めっきで埋める（概念図）

図の読み方

銅の配線1本ができるまでを、左から順に追っています。スパッタで付ける2つの薄い膜（バリアとシード）が、めっきで銅を埋めるための「下ごしらえ」です。膜の厚さは見やすくするために強調しています。

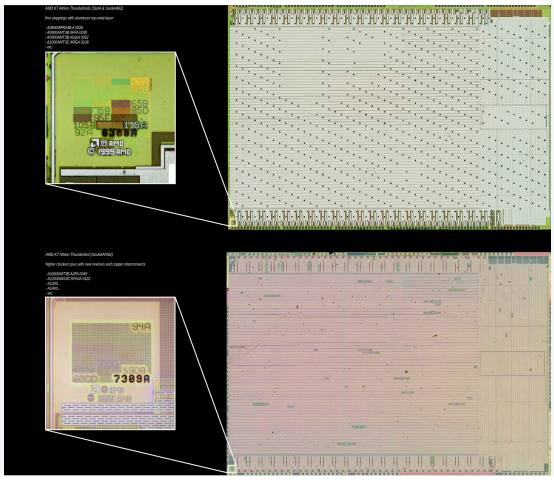
アルミニウムの時代から、銅の時代へ

それまでのチップの配線には、**アルミニウム**（後に信頼性を高めたアルミニウムと銅の合金）が使われていました。銅への移行は、1997年9月のIBMの発表から始まりました [11] 事実 。アルミニウムはマグネトロンスパッタで積まれていました [1] 事実 。銅に替えると何がよいのでしょうか。スタンフォード大学の講義資料は、金属の電気の通しにくさ（抵抗率）を次のように並べています [9] 事実 。

金属	抵抗率（μΩ·cm）
銀（Ag）	1.63
銅（Cu）	1.67
金（Au）	2.35
アルミニウム（Al）	2.67
タングステン（W）	5.65

事実 （[9]による）

同じ資料は、銅は**2番目に電気をよく通す元素**だとしています。さらに、融点はアルミニウムの660 ℃に対して銅は1,083 ℃と高く、電流による原子の移動（エレクトロマイグレーション）の試験では、銅の寿命がアルミニウム合金の**110倍以上**だったという結果を載せています [9] 事実 。



AMDのプロセッサ（Athlon）のチップの写真の比較。画像の中の注記によると、上は配線にアルミニウムを使った初期の版、下は銅の配線に切り替えた後の版です（Commonsの説明と画像内の注記による）。
画像：FritzchensFritz / Wikimedia Commons / CC0（掲載用に縮小・WebP化）

7. 技術編⑥ — 電気めっき：電気の量で、銅の量が決まる

めっきの液の中で起きること

銅が溶ける陽極を使う基本例では、**硫酸銅**を含む液にウェハを浸し、ウェハ（の銅のシード層）をマイナスの電極（陰極）、銅の板をプラスの電極（陽極）にして電流を流します。スタンフォード大学の講義資料は、反応を次のように書いています [8] 事実 。

$$CuSO_4 \rightarrow Cu^{2+} + SO_4^{2-}$$

$$\text{陰極（ウェハ）：} Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$$

$$\text{陽極（銅の板）：} Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2e^-$$

ウェハの上では、液の中の銅イオンが電子を2個もらって銅になり、膜として積もります。陽極では、銅の板が溶けて、液に銅イオンを補います 解説 。硫酸銅水溶液を使う理科実験と、基本の電極反応は共通です。ただし、半導体用の液には酸や塩化物イオン、添加剤なども含まれます。装置には不溶性の陽極を使う方式もあり、その場合は陽極反応と銅イオンの補給方法が異なります 解説 。

電子が流れるのは金属配線と電極の中で、液の中では主にイオンが電荷を運びます。Cu^{2+}がウェハ上の銅シードの表面で電子を受け取ることで、金属のCuになります 解説 。

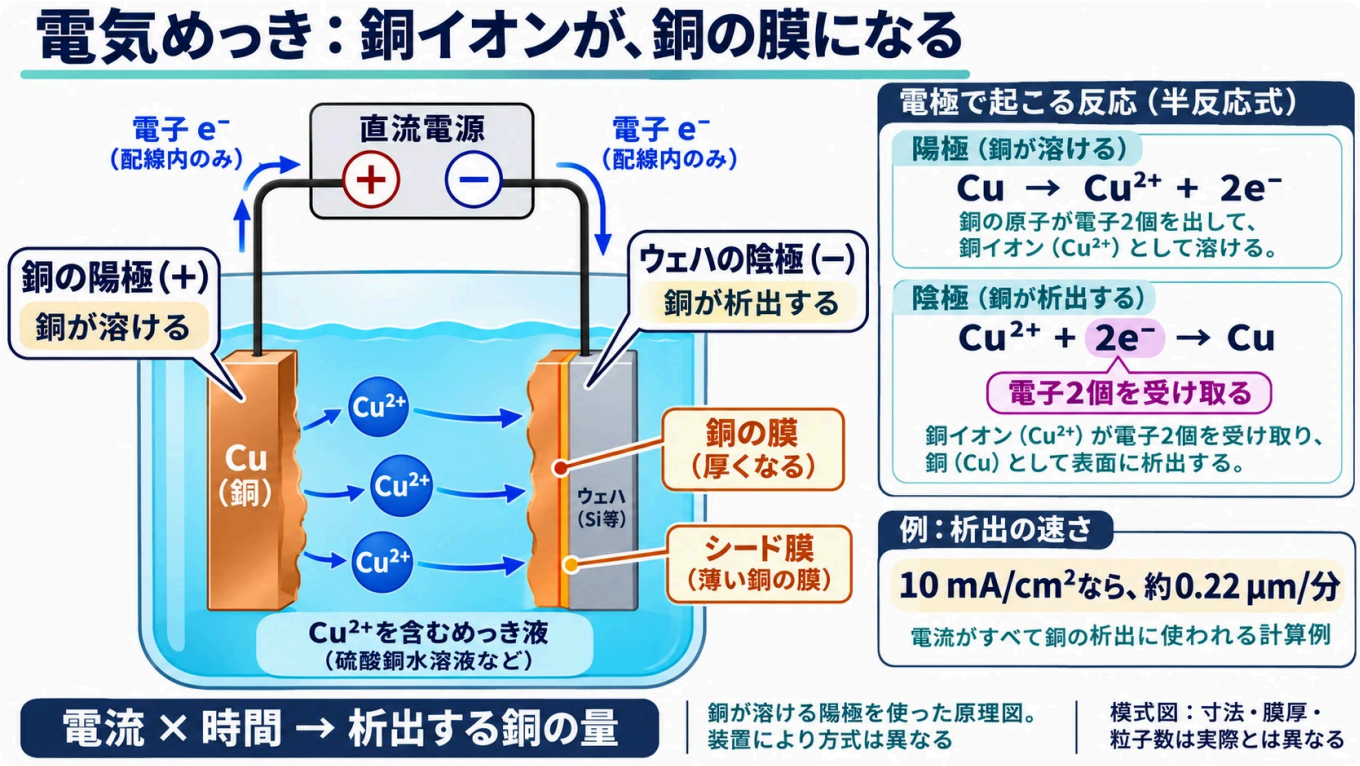
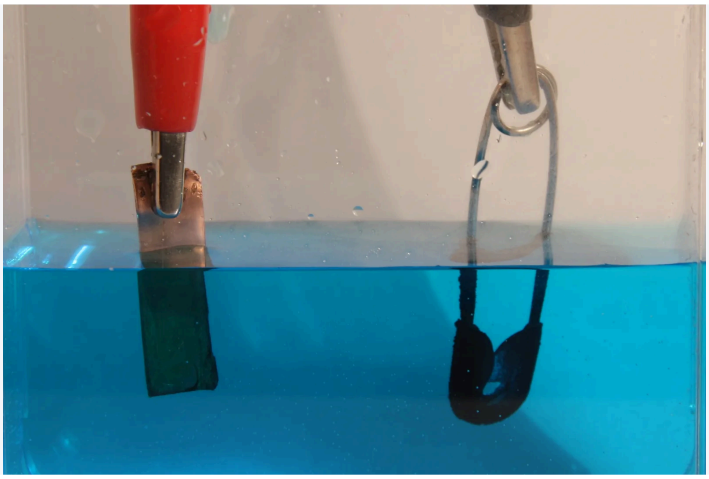


図5　電気めっき：電子を受け取った銅イオンが、金属になる（概念図）

図の読み方

ウェハ側が陰極（–）、銅板側が陽極（＋）です。Cu²⁺は陰極で電子を2個受け取り、銅になります。液の中を電子がそのまま飛んでいる図ではありません。実際の装置では陽極の方式や液の組成が異なります。



硫酸銅の水溶液で、安全ピンに銅をめっきする実験。左が銅の陽極、右の安全ピンが陰極で、ピンの表面に銅が析出しています（Commonsの説明による）。半導体のウェハのめっきも、原理は同じです。

画像：Richard Wheeler (Zephyris) / Wikimedia Commons / CC BY-SA 3.0（5コマの時間経過の写真から最後の1コマを切り出し、縮小・WebP化）

- **シード層が、電気の通り道になる**

ウェハのめっきでは、電気をウェハの**縁**から流し込みます。IBMの1998年の論文は、シード層の役割を、**ウェハの縁の接点から、ウェハのすべての場所へ電流を届けること**だと説明しています [10] 事実 。シード層がとぎれていたり、薄すぎたりすると、そこではめっきがうまく育ちません。スパッタで、穴の奥までとぎれずに薄い膜を付けることが大切なのは、このためです 解説 。

物理のツボ③：ファラデーの法則で、めっきの速さを計算する

電極で起きる反応の量は、流した**電気の量Q**に比例します。これが**ファラデーの法則**です。ユタ大学の講義資料は、析出する金属の重さWを、次のように書いています [12] 事実 。

$$W = AQ／（nF）$$

Aは金属のモル質量（g/mol）、nは1個の原子が析出するのに必要な電子の数（銅なら2）、Fは**ファラデー定数**（約96,500 C/mol、電子1モル分の電気の量）です [12] 事実 。IBMの論文も、**銅の局所的な析出の速さは、その場所の電流密度に比例する**と書いています [10] 事実 。

計算してみる：面積1 cm^2あたり、10 mA（＝0.010 A）の電流を流すとします（スタンフォード大学の講義資料の図では、数〜20 mA/cm^2の電流密度でめっきした例が示されています [8]）。銅のモル質量を63.55 g/mol、密度を8.96 g/cm^3（どちらも一般的な物性値）とすると、1秒間に積もる厚さは

$0.010 \times 63.55 \div (2 \times 96{,}485 \times 8.96) \fallingdotseq 3.7\times10^{-7}$ cm ＝ **約3.7 nm**

です。1分間では**約0.22 μm**になります 本稿の計算 （電流がすべて銅の析出に使われると仮定した場合）。電流密度を2倍にすれば、速さも2倍になります。総析出量は**電流と時間**で見積もれます。ただし、厚さの均一性には局所的な電流密度、電流効率、イオン供給、添加剤や液の流れも影響します 解説 。

8. 技術編⑦ — 穴を「底から」埋める（スーパーフィル）

- **形に沿って積もると、真ん中に継ぎ目が残る**

めっきの銅が、穴の壁にも底にも同じ速さで積もると、どうなるでしょうか。IBMの1998年の論文は、形に沿っためっき（コンフォーマルなめっき）では、両側の壁から伸びた銅が真ん中でぶつかって、**継ぎ目（シーム）**ができ、入り口が先にふさがると**空洞（ボイド）**が残ると書いています。欠陥なく埋めるには、**穴の底のほうが、壁よりも速く積もる**ことが必要だとしています [10] 事実 。

IBMの研究者たちは、液に混ぜた**添加剤**のおかげで、穴が底から埋まっていく現象を見つけ、これを「**スーパーフィル（superfilling）**」と名づけました [10] 事実 。

添加剤の三役 — 抑える、速める、ならす

スタンフォード大学の講義資料は、銅めっきの液に入れる添加剤として、**促進剤（アクセラレーター、光沢剤）**、**抑制剤（サプレッサー）**、**平滑剤（レベラー）**、それに**塩化物イオン**を挙げています [8] 事実 。米国の国立標準技術研究所（NIST）の研究者による2023年の総説は、典型的な組み合わせを、**ハロゲン化物イオン、ポリエーテルの抑制剤、スルホン酸の末端を持つジスルフィドやチオールの促進剤、そして多くの場合、窒素を含む陽イオン性の平滑剤**だとしています [14] 事実 。

それぞれの役割は、次のとおりです。

- **抑制剤**（ポリエチレングリコールなどのポリエーテル＋塩化物イオン）：表面をおおって、めっきを遅くする。NISTの2002年の論文の実験では、分子量3,400のポリエチレングリコールと塩化ナトリウムが使われています [13] 事実 。
- **促進剤**（SPS、ビス（3-スルホプロピル）ジスルフィドのナトリウム塩）：抑制剤を押しのけて表面に付き、めっきを速くする [13] 事実 。
- **平滑剤**：穴が埋まった後も促進剤が働き続けると、銅が盛り上がりすぎます。平滑剤は、促進剤による過剰な成長や突出部の成長を抑え、**盛り上がりを小さくする**働きをします。平滑剤は埋め終わった瞬間だけ作動するスイッチではなく、成長中から吸着や反応に関与します [14] 事実 。

なぜ、底に促進剤が集まるのか

ここが、この回でいちばんおもしろいところです。スタンフォード大学の講義資料は、**促進剤が穴の底にたまり、弱く付いている添加剤を押しのける**と説明しています。細い穴では、銅が積もるにつれて**凹んだ成長面の面積が縮むと、表面に残る促進剤の被覆率が上がり**、底の成長が速くなります [9] 事実 。

NISTのモファットらは、これを「**曲率で促進剤のおおう割合が高まる（CEAC）機構**」と名づけ、2002年の論文で、膜の育つ速さは促進剤のおおう割合に比例するとして、スーパーフィルを**定量的に説明できる**と書いています [13] 事実 。2023年の総説は、**へこんだ面が前に進むと面積が小さくなり、そこに促進剤が濃縮される**ことが鍵だとしたうえで、「**見通しのきく方向にしか飛ばないPVDでは、この芸当はできない**」と書いています [14] 事実 。

たとえるなら、凹んだ成長面に、促進剤という「速く育てる札」が貼られているようなものです。成長とともに面が縮んでも札が表面に残れば、同じ数の札が狭い面に集まって密度が上がります。促進剤が重力で穴の底に沈むのではありません。これはCEACによる代表的な説明で、実際には抑制剤との競争吸着、電位、輸送なども組み合わさります 解説 。

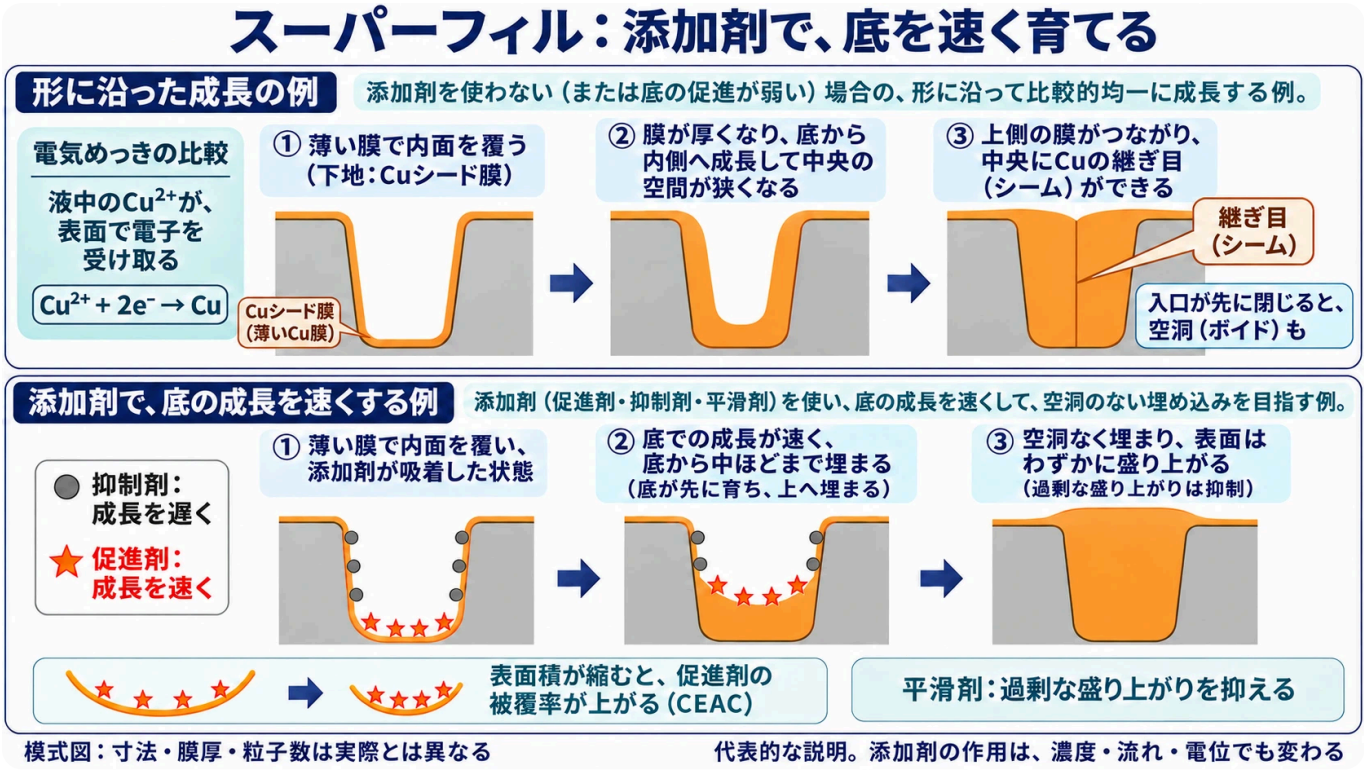


図6　穴を底から埋める — 添加剤によるスーパーフィル（概念図）

図の読み方

上段は形に沿った成長、下段は添加剤で底の成長を速くした例です。下段では、凹んだ成長面が縮むと促進剤の被覆率が高まるCEACを示しています。分子の印は働きを表すための記号で、実際の大きさや数ではありません。

- **「めっきなんて、誰も考えていなかった」**

今では当たり前の銅のめっきですが、最初からそうだったわけではありません。IBMで研究を率いたアンドリカコスは、1999年の記事で、IBMでは当初、スパッタなどのPVD、CVD、無電解めっきといった方法が銅の成膜の候補として検討され、「**電気めっきの銅は、まったく視野に入っていなかった**」と振り返っています [11] 事実 。

IBMの1998年の論文の年表によると、IBMは**1989年**にダマシンの溝への銅の電気めっきを初めて実証し、**1997年**に銅めっきを使った初めて動くマイクロプロセッサを作り、**1998年**に量産に入りました [10] 事実 。1997年の発表では、銅を使うと、アルミニウム合金の配線に比べて**抵抗が40〜45%下がる**ことを示しています [10] 事実 。量産は米国バーモント州のバーリントンの工場で始まり、IBMの発表は**1997年9月**、製品の出荷は1998年6月からでした [11] 事実 。最初の実証から量産まで、約9年かかったことになります 本稿の計算 。

9. 技術編⑧ — これからの配線と成膜

バリアが、銅の場所を奪う

配線が細くなると、困ったことが起こります。スタンフォード大学の講義資料は、バリアは銅より**ずっと電気を通しにくい**のに、**薄くするのが難しい**ので、配線が細くなるほど、断面の中でバリアが占める割合が大きくなると指摘しています。さらに、穴が深くなるほどバリアの面積も増え、特にPVDのように形に沿わない方法では、その影響が大きいとしています [8] 事実 。銅そのものも、線が細くなると、表面や結晶の境目で電子が散乱され、抵抗率が上がります [9] 事実 。

IRDSの2024年版は、配線の抵抗が「**指数関数的に増える領域に入った**」と書いています。理由は、銅のバリアが理想どおりに薄くならず銅の体積が減ることと、表面と結晶粒界での散乱が増えることです。そこで、**新しいバリア材料、ALDによるバリア、そして銅以外の金属**が必要になるとしています [15] 事実 。

これは2024年時点のロードマップ上の見通しで、各年にすべての量産品が一斉に切り替わるという意味ではありません 解説 。同じIRDSの表では、細い配線（M1・Mx）のバリアの厚さが、2024年の**1.5 nm**、2025年の1.0 nm、2027年の**0.5 nm**と薄くなり、2029年からは「**バリアなし**」という目標が示されています。2029年からは、配線の金属にも、銅のほかにルテニウム（Ru）やモリブデン（Mo）が並びます [15] 事実 。IRDSは、銅は**少なくとも2029年までは**配線の金属として好まれ続け、いちばん下の局所配線（M0）には、コバルトやルテニウムのような銅以外の金属が使われると見ています [15] 事実 。

1.5 nmのバリアは、どのくらい薄いか

1.5 nmは、原子でいえば数層ぶんの厚さです 解説 。この厚さで、穴の壁にとぎれなく、しかも銅が外へ広がらないように膜を付けなければなりません。3-3で見たALDが、バリアの作り方として期待されているのは、このためです（[15]） 事実 。

めっきは、パッケージの主役にもなった

電気めっきの出番は、チップの中の配線だけではありません。Applied Materialsは、めっき（ECD）を**先端パッケージの重要な工程**と位置づけ、2.5D・3D、ファンアウト、**ハイブリッド接合**などで、バンプ、ピラー、再配線層、**シリコン貫通電極（TSV）**、パッドを作るのに使うとしています。銅のほか、金、ニッケル、銀、スズもめっきできます [17] 事実 。Lam Researchも、めっきの装置をTSV、銅ピラー、再配線層、マイクロバンプなどの用途に向けています [20] 事実 。

AI向けの半導体では、GPUのチップとHBM（積み重ねたメモリ）を、パッケージの中で多数の細い配線でつなぎます（概論1-3で扱いました） 解説 。めっきの技術は、前工程と後工程の両方で、ますます重要になっています 解説 。

10. 産業編① — 装置で勝っているのは誰か

スパッタ装置 — Applied Materialsの「Endura」

スパッタ装置で圧倒的な存在感を持つのが、米国の**Applied Materials**です。同社は製品ページで、成膜装置「**Endura**」を「**半導体の歴史で最も成功した配線用の成膜装置**」と呼び、**この20年に作られたマイクロチップの大多数は、Enduraを使って作られた**と書いています [16] 事実 。Enduraは、コバルトやタングステン、アルミニウムと銅の配線、パッケージの下地金属などを積み、自然にできた酸化膜を取り除く前処理の部屋2つを含めて、**最大9つの処理室**を1台につなげられます [16] 事実 。

スパッタの装置の市場の大きさや、会社ごとのシェアを示す最近の一次資料は、今回は見つけられませんでした。そのため、ここでは各社の説明を紹介するにとどめます 解説 。

3-3で見たLam Researchは、自社の成膜のページで、めっき（ECD）・CVD・ALDなどの方式を挙げていますが、スパッタ型のPVDの製品は載せていません [18] 事実 。東京エレクトロンの統合報告書2026も、成膜の説明に酸化・CVD・ALDを挙げていて、全92ページの中に「PVD」「スパッタ」「めっき」の語はありません [32] 事実 。ただし、これは報告書の書き方を見ただけで、両社がこの分野の装置をまったく扱っていないという意味ではありません 推測 。成膜の装置でも、方式によって強い会社が違うのです 解説 。

日本では、**アルバック**が、半導体の製造装置で「**金属膜の工程で培った豊富な実績と高い量産対応力**」を強みに挙げています [24] 事実 。中国の**北方華創（NAURA）**は、PVDの装置が、ロジック・メモリ・先端パッケージなどの主な製造の場面をすべてカバーし、**1,000台目を納入した**としています [23] 事実 。同社は、12インチ用のPVDの用途として、銅配線、アルミニウムのパッド、金属のハードマスク、メタルゲート、シリサイドなどを挙げています [23] 事実 。



米国コーネル大学のナノスケール科学技術施設（CNF）にある、AJA International社製のスパッタ装置（Commonsの説明による）。研究や試作に使う装置で、量産の工場の装置とは大きさも形も違います。
画像：a13ean / Wikimedia Commons / CC BY-SA 3.0（掲載用に縮小・WebP化）

めっき装置 — Lam Researchと、中国から伸びるACM Research

めっき装置では、**Lam Research**が、自社のめっき装置「**SABRE**」を、「**銅配線への移行を先導した**」製品だと紹介しています [19] 事実 。Applied Materialsもめっきの装置を持ち、**20 nmより細く、深さが幅の5倍を超える**溝や穴を、底から埋めつつ壁での成長を抑えて、欠陥なく埋められるとしています [17] 事実 。

注目したいのが、**ACM Research**です。同社は、本社を米国カリフォルニア州のフレモントに置き、**製品の開発と製造の大部分を中国で行っています** [21] 事実 。中国の子会社の**盛美上海**は、2025年の年次報告で、調査会社**Gartnerの2025年のデータ**として、同社のめっき装置の**世界シェアは8.2%で、世界3位**だとしています [22] 事実 。同じ報告では、中国国内の12インチの銅配線のめっき装置の市場で「**トップの地位**」を築いたと書いています（同社の主張） [22] 事実 。

ACM Researchは、2025年のめっき装置の市場を、**約15億ドル**と見積もっています（第三者の調査や顧客の情報に基づく同社の推定） [21] 事実 。3-3で見たPECVDの装置（同社推定で約53億ドル）より、ずっと小さな市場です [21] 事実 。

盛美上海は、業界の見取り図として、**Applied Materialsが熱処理・成膜・イオン注入などで世界をリードし、Lam Researchがエッチング・洗浄・めっきの装置で強い競争力を持つ**と書いています [22] 事実 。NAURAも、12インチのめっき装置を新しく投入しました [23] 事実 。日本の**上村工業**は、2026年3月期に「付加価値の高い**半導体ウェハー用めっき装置**」の販売で、装置の事業の利益が前の年を上回ったとしています [29] 事実 。

地域で見ると

スパッタやめっきの分野に限った国・地域別のシェアを、公的機関がまとめた数字は見つかりませんでした。そこで、各社が示す数字や説明を並べると、次のようになります。

分野	会社（国）	数字・説明	誰の数字か
スパッタ装置	Applied Materials（米国）	この20年のチップの大多数がEnduraで作られた	同社の製品ページ [16]
スパッタ装置	NAURA（中国）	PVDの1,000台目を納入	同社の年次報告 [23]
めっき装置	Lam Research（米国）	銅配線への移行を先導	同社の製品ページ [19]
めっき装置	ACM Research／盛美上海（米国本社・中国で開発製造）	世界シェア8.2%・3位	Gartnerのデータ（同社の引用） [22]
ターゲット	JX金属（日本）	半導体用で約65%	同社推定 [25]
ターゲット	Solstice Advanced Materials（米国）	半導体用で世界最大の製造者	同社の製品ページ [26]
ターゲット	江豊電子（中国）	売上28.5億元、世界の先頭集団	同社の年次報告 [27]
めっき薬品	上村工業（日本）	ウェハー・パッケージ関連の薬品で444.9億円	同社の決算資料 [29]

事実

装置全体で見ると、経済産業省の2025年の資料では、日本に本社がある会社が、半導体製造装置の世界市場の**約28%**を占めています（2023年）[31] 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。台湾が315億ドル、韓国が258億ドル、日本が95億ドルと続きます[30] 事実 。

スパッタやめっきの装置は米国の会社が強く、ターゲットの材料では日本の会社が大きなシェアを持ち、中国では装置もターゲットも自国の会社が急成長している — という構図です 解説 。

11. 産業編② — ターゲットとめっき液 — 材料の会社の戦い

ターゲット — 「純度」と「結晶」を作り込む

スパッタの**ターゲット**は、ただの金属の板ではありません。中国のターゲットの会社、江豊電子の2025年の年次報告は、半導体の製造で求められる純度を、次のように書いています[27] 事実 。

ターゲット	求められる純度（江豊電子の年次報告）
アルミニウム	99.9995%（5N5）以上
銅	99.9999%（6N）以上
タングステン	99.999%（5N）以上。ナトリウム・カリウムなどの特定の有害な不純物は1,000万分の1以下

事実

同じ報告は、ターゲットの核になる技術として、**結晶粒と結晶の向きの制御、接合、精密加工、検査、洗浄・包装**を挙げています。銅とマンガンの合金のターゲットは作るのが難しく、**同社と大手の多国籍企業しか核心の技術を持っていない**としています[27] 事実 。タンタルは、90〜3 nmの先端の工程で欠かせないバリア膜の材料だとしています[27] 事実 。

純度だけでなく、**金属の中の結晶の大きさや向き**をそろえることが、膜の均一さを左右します。材料の技術者にとって、腕の見せどころです 解説 。

「9N」の銅 — 9が9つ並ぶ純度

JX金属は、統合報告書2026で、**純度99.9999999%（9N）**という世界最高レベルの高純度の銅を持つとしています[25] 事実 。不純物の割合は10億分の1という尺度です。ただし純度の定義や測定対象によるため、これをそのまま「原子10億個に1個」と読み替えることはできません 本稿の計算 。

JX金属 — 半導体用ターゲットで約65%

日本の**JX金属**は、統合報告書2026の「主要な高シェア商品」の中で、**半導体用スパッタリングターゲットの世界シェアを約65%**（同社推定）としています。同じ表には、**高純度タンタル粉の約50%**（同社推定、ターゲット向けを含む）も載っています[25] 事実 。

同社は、強みとして、**高純度化、組成・組織の制御、表面処理、分析評価**の技術力と、**装置メーカーとの関係を通じて、装置の標準材料に指定されている**ことを挙げています [25] 事実 。半導体用ターゲットの生産能力は、茨城県ひたちなか市の新工場を中心に、**2025年度比で約1.3倍**に増やす計画で、仕上げの工程の現地の加工能力も、台湾で1.4倍、韓国で2倍にするとしています（2027年度から順次） [25] 事実 。

「世界最大」が2社ある？

米国の**Solstice Advanced Materials**（2025年にHoneywellの先端材料事業が分かれてできた会社）は、自社のページで、「**半導体用のスパッタリングターゲットで世界最大の製造者**」だとしています。6N（99.9999%）の銅のターゲットや、特許の加工技術で作る非常に細かい結晶粒を特徴に挙げています [26] 事実 。

JX金属の「約65%」も、Solsticeの「世界最大」も、**どちらも各社自身の主張**です。数える範囲や方法が違う可能性があります 推測 。どちらが正しいかを、この回では判断しません。数字は、**誰が、どの範囲を数えたのか**を確かめて読むことが大切です 解説 。

米国のMaterionは、2024年の年次報告で、ターゲットなどの分野の競争相手として、**Honeywell、Praxair、Solar Applied Materials Technology、Grikin、田中ホールディングス**などを挙げています [28] 事実 。日本のアルバックも、**粉末冶金**の技術を使ったターゲットの受注が好調だとしています [24] 事実 。

中国の**江豊電子**は、2025年に超高純度の金属ターゲットの売上が**28.5億元（前年比22%増）**となり、世界のウェハ製造用ターゲットの分野で、技術とシェアの両面で**世界の先頭集団に入った**としています（シェアの数字は示していません） [27] 事実 。原材料の調達も国内に移し、**供給網の国産化**を進めたとしています [27] 事実 。

めっきの薬品 — 上村工業

めっきの液と添加剤を作るのも、化学の会社の仕事です。日本の**上村工業**は、2026年3月期の薬品の売上（社内の売上を含む）が558億円で、そのうち**ウェハー・パッケージ関連が444.9億円**でした [29] 事実 。全体の約8割にあたります 本稿の計算 。地域別のウェハー・パッケージ関連の売上は、**日本135億円、台湾132億円、中国124億円**、韓国28.3億円、北米15.9億円、ASEAN 8.7億円です [29] 事実 。

同社は、**生成AI用のサーバー向け**を中心に、半導体パッケージ基板向けのめっき薬品の需要が好調だったとしています [29] 事実 。ウェハー向けに、ホルマリンを使わない無電解の銅めっき液の開発も進めています [29] 事実 。ウェハーの配線用の電気めっきの添加剤の会社については、今回、シェアを示す一次資料を確認できませんでした 解説 。

12. これから求められること

- **もっと薄いバリア、そしてバリアなしへ**：IRDSは、細い配線のバリアを2027年に0.5 nm、2029年からは「バリアなし」を目標とする道筋を示しています [15] 事実 。スパッタだけでなく、ALDとの組み合わせや、新しい材料が必要になります（[15]） 事実 。
- **銅の次の金属**：いちばん下の配線にはコバルト・タングステン・ルテニウム、その上の配線にも2029年からルテニウムやモリブデンが候補に挙がっています [15] 事実 。新しい金属のターゲットや、新しい原料が求められます 推測 。
- **より細い穴を、欠陥なく埋める**：Applied Materialsは、20 nmより細く深さが幅の5倍を超える構造の埋め込みを掲げています [17] 事実 。ACM Researchも、**極めて薄いシード層**でも埋め込みがよくなるめっきの技術を、28 nm、14 nm以降の先端の工程向けに開発したとしています [21] 事実 。
- **パッケージでの銅**：AI向けのチップを支えるTSV、ピラー、ハイブリッド接合などで、めっきの需要が広がっています（[17][20][29]） 事実 。

素材の技術者の出番

スパッタとめっきは、**金属材料と電気化学の技術者の活躍の場**です 解説 。

- **ターゲット**：9Nのような超高純度の精製、結晶粒と結晶の向きの制御、合金の組成の設計、裏板との接合（江豊電子・JX金属が挙げる技術 [25][27]）
- **めっきの添加剤**：促進剤・抑制剤・平滑剤の分子の設計と、液の中での濃度の管理。NISTの総説は、平滑剤として窒素を含む陽イオン性の界面活性剤などを挙げています [14]
- **バリアの新材料**：薄くても銅を閉じ込め、電気をよく通す材料
- **パッケージ向けの金属**：銅、スズ、銀、ニッケルなどのめっきと、その信頼性

ターゲットのJX金属・アルバック、めっき薬品の上村工業のように、日本の材料の会社は、この分野で世界の最先端のチップを支えています。金属の精錬や粉末冶金、電気化学の経験は、そのまま半導体の最前線につながります。

13. まとめと次回予告

視点	ポイント
なぜスパッタか	金属の膜をガスの原料なしで積める。蒸着より合金・化合物が得意
スパッタのしくみ	Ar^+がターゲットの原子をはじき出す（スパッタ率0.1〜3）。重さが近いほどエネルギーが伝わる
マグネトロン	磁石で電子を閉じ込め、プラズマを濃くする。レーストラックが削れる
深い穴	代表的なモデルでは付着係数ほぼ1。入り口にたまりやすい。コリメーター・ロングスロー・イオン化PVDで向きをそろえる
用途	バリア（TaN、TiNなど）とシード（銅）。反応性スパッタでTiN
めっき	$Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$。積める量は電気の量で決まる（10 mA/cm^{2}で約0.22 μm/分）
スーパーフィル	抑制剤・促進剤・平滑剤。凹んだ成長面で促進剤の被覆率が上がり、底から埋まる（CEAC機構）
産業	スパッタはApplied Materials、めっきはLam・Applied・ACM（世界3位、Gartner）。ターゲットはJX金属約65%（同社推定）
これから	バリアの薄膜化とバリアなし、Ru・Mo・Co、パッケージでのめっき

次回は**3-5「フォトリソグラフィ（基礎）」**です。ここまでで、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」技術です。光で、髪の毛の数千分の1の細さの線を描くしくみを見ていきます。

14. 確認クイズ

1. 講義資料が、集積回路の配線成膜で蒸着よりスパッタを重視するのはなぜですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 合金や化合物を蒸発させにくく（成分ごとに蒸発のしやすさが違う）、原子がまっすぐ飛んで当たったところに付くので、段差の被覆が悪いからです。スパッタは、合金や化合物を積むのが得意です。

2. アルゴンのイオンは、銅とタンタルのどちらに、より多くのエネルギーを渡せますか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 銅です。正面衝突で渡せるエネルギーの割合は$4M_1M_2/(M_1+M_2)^2$で、アルゴン（40）と銅（63.5）では約0.95、タンタル（181）では約0.59です。質量が近いほど、エネルギーはよく伝わります。

3. 絶縁体のターゲットをスパッタするとき、直流ではなく高周波（RF）を使うのはなぜですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 直流だと、当たったイオンのプラスの電気がターゲットの表面にたまり、ごく短い時間でプラズマが消えてしまうからです。高周波で電圧のプラスとマイナスを入れ替えると、たまった電気が打ち消されます。

4. マグネトロンで、成膜が速くなるのはなぜですか。また、ターゲットにはどんな跡が残りますか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 磁石の力で電子をターゲットの近く（旋回半径1 mm未満の計算例）に閉じ込め、アルゴンにぶつかる回数を増やして、プラズマを濃くするからです。電離とイオンの照射が集中するところが速く削られるので、輪の形の溝（レーストラック）が残ります。

5. ふつうのスパッタで、深い穴に空洞ができやすいのはなぜですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 原子が広い角度から飛んできて、代表的な条件では届いた場所に取り込まれやすいからです。そのため穴の入り口の角に膜がたまって張り出し（オーバーハング）、入り口がふさがると中に空洞が残ります。穴の壁が影になって、底の角には膜が薄くしか付きません。

6. コリメーターを使うと、何がよくなり、何が悪くなりますか。

▼ 答えを見る

斜めに飛ぶ原子を板でこし取り、真下に飛ぶ原子を増やすので、穴の底に付く膜が厚くなります（特許の例では約4%から11〜17%）。その代わりに、原子の多くが板に付いてしまい、成膜の速さが落ちます。

7. 銅のめっきの前に、スパッタでシード層を付けるのはなぜですか。

▼ 答えを見る

電気めっきは、絶縁膜の表面では起きず、従来のバリア上への直接めっきが難しいからです。シード層は、ウェハの縁の接点から、ウェハ全体に電流を届ける通り道になります。

8. 面積1 cm²あたり20 mAの電流で銅をめっきすると、1分間に約何μm積もりますか（電流はすべて析出に使われるとします）。

▼ 答えを見る

10 mA/cm²で約0.22 μm/分なので、その2倍の約0.44 μm/分です。ファラデーの法則により、析出する量は流した電気の量に比例します。

9. 添加剤を入れためっきで、穴が底から埋まるのはなぜですか。

▼ 答えを見る

促進剤が抑制剤を押しのけて表面に付き、銅が積もって穴の凹んだ成長面の面積が縮むと促進剤の被覆率が高まって、底の成長がますます速くなるからです（CEAC機構）。平滑剤は過剰な成長や突出部での成長を抑え、盛り上がりを小さくします。成長中から働くため、埋め終わってからだけ作動するわけではありません。

0. 配線が細くなると、バリアが問題になるのはなぜですか。

▼ 答えを見る

バリアは銅よりずっと電気を通しにくいのに、薄くするのが難しいので、細い配線ほど断面の中でバリアの占める割合が大きくなり、配線の抵抗が上がるからです。IRDSの2024年版は、バリアを0.5 nmまで薄くし、さらにバリアなしへ進む目標を示しています。量産の一斉切り替えを意味するものではありません。

15. 用語集

物理気相成長（PVD）
材料を物理的に原子にばらして飛ばし、ウェハに積む方法。蒸着やスパッタ。

蒸着
材料を真空の中で熱して蒸発させ、ウェハに付ける方法。

スパッタ
プラズマの中のイオンをターゲットにぶつけ、はじき出した原子をウェハに積む方法。

ターゲット
スパッタで、積みたい材料でできた板。イオンにたたかれて原子を出す。

スパッタ率
イオン1個が当たったときに、ターゲットから飛び出す原子の数。

DCスパッタ
ターゲットに直流の電圧をかけるスパッタ。電気を通すターゲットに使う。

RFスパッタ
高周波の電圧を使うスパッタ。絶縁体のターゲットに使う。

マグネトロン
ターゲットの裏に磁石を置き、電子を閉じ込めてプラズマを濃くするスパッタの方式。

レーストラック（エロージョン）
マグネトロンで、プラズマが濃い場所だけが速く削れてできる、ターゲットの輪の形の溝。

ローレンツ力
磁場の中を動く電荷が受ける力。電子は、この力で円を描くように回る。

反応性スパッタ
窒素や酸素などを混ぜてスパッタし、窒化物や酸化物の膜を作る方法。

付着係数
届いた原子や分子が、表面にくっつく確率。講義では代表的なPVDをほぼ1とモデル化するが、材料・表面状態・温度で変わる。

オーバーハング
穴の入り口の角に、膜が張り出すように厚く付いたもの。

ボイド
穴を埋めた膜の中に残ってしまう空洞。

コリメーター
ターゲットとウェハの間に置く、穴の開いた板。斜めに飛ぶ原子をこし取る。

ロングスロー
ターゲットとウェハの距離を長くして、まっすぐ飛ぶ原子の割合を増やす方法。

イオン化PVD
飛んでいる金属の原子をイオンにし、ウェハにかけた電圧で真下へ引き込むPVD。

自己イオン化プラズマ（SIP）
ターゲットから出た金属自身のイオンで放電を続ける、低い圧力のスパッタ。

バリア層
銅が周りの絶縁膜へ広がるのを防ぐ膜。TaN、TiNなど。

シード層
電気めっきの前に付ける、銅の薄い膜。めっきの電流の通り道になる。

ダマシン
絶縁膜に溝を掘り、金属で埋めてから、余分を研磨で削る配線の作り方。

電気めっき（ECD）
液の中で電流を流し、陰極に金属を析出させる方法。

ファラデーの法則
電極で析出する物質の量は、流した電気の量に比例するという法則。

ファラデー定数
電子1モル分の電気の量。約96,500 C/mol。

エレクトロマイグレーション
大きな電流によって、配線の金属の原子が少しずつ移動し、配線が切れたりする現象。

スーパーフィル
添加剤の働きで、穴や溝が底から速く埋まっていくめっき。

抑制剤（サプレッサー）
表面をおおって、めっきを遅くする添加剤。ポリエチレングリコールなど。

促進剤（アクセラレーター）
抑制剤を押しのけて、めっきを速くする添加剤。SPSなど。

平滑剤（レベラー）
過剰な成長を抑え、表面の盛り上がりを小さくする添加剤。

CEAC機構
凹んだ成長面が縮むと促進剤の被覆率が高まることにより、スーパーフィルを説明する考え方。

16. 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 9: Thin Film Deposition（p.14〜21、p.23〜24、p.34）」 — 資料を開く
2. **MIT OpenCourseWare 6.152J（2005年）**「PVD: Sputter Deposition（講義資料、p.2、p.10〜11、p.14、p.20〜21、p.24〜25）」 — 資料を開く
3. **K. Saraswat（スタンフォード大学 EE311）**「Deposition & Planarization（講義ノート、p.6、p.17〜18）」 — 資料を開く
4. **T. Deppisch ほか**「米国特許 US7531071「Magnet arrangement for a planar magnetron」（2009年登録、p.7）」 — 資料を開く
5. **Applied Materials**「欧州特許出願 EP1091016A2「Self ionized plasma for sputtering copper」（2001年、p.1、p.4〜5）」 — 資料を開く
6. **Lee ほか**「米国特許 US5401675「Method of depositing conductors in high aspect ratio apertures using a collimator」（1995年登録、p.6、p.8）」 — 資料を開く
7. **S. M. C. A. Nichols, S. M. Rossnagel, S. Hamaguchi（IBM）**「Ionized physical vapor deposition of Cu for high aspect ratio damascene trench fill applications, J. Vac. Sci. Technol. B 14, 3270（1996年、大阪大学リポジトリ掲載、p.2〜3）」 — 資料を開く
8. **K. Saraswat（スタンフォード大学 EE311）**「Copper Interconnect（講義ノート、p.6、p.10、p.13、p.17〜18）」 — 資料を開く
9. **K. Saraswat（スタンフォード大学 EE311）**「Cu Interconnect（講義スライド、PDF p.2〜3、p.10〜11、p.16）」 — 資料を開く
10. **P. C. Andricacos ほか（IBM）**「Damascene copper electroplating for chip interconnections, IBM J. Res. Dev. 42(5), 567（1998年、p.567〜570）」 — 資料を開く
11. **P. C. Andricacos（IBM）**「Copper On-Chip Interconnections, The Electrochemical Society Interface（1999年春号、p.32〜37）」 — 資料を開く
12. **B. K. Gale（ユタ大学）**「Electro Chemical Deposition（MEMS講義12、p.3）」 — 資料を開く
13. **T. P. Moffat, D. Wheeler, C. Witt, D. Josell（NIST）**「Superconformal Electrodeposition Using Derivitized Substrates, Electrochem. Solid-State Lett. 5(12), C110（2002年）」 — 資料を開く
14. **T. P. Moffat, T. M. Braun, D. Raciti, D. Josell（NIST）**「Superconformal Film Growth: From Smoothing Surfaces to Interconnect Technology, Acc. Chem. Res.（2023年、著者原稿）」 — 資料を開く
15. **IRDS**「2024 Edition, More Moore（p.8、p.20〜21、Table MM-13）」 — 資料を開く
16. **Applied Materials**「Endura PVD（製品ページ、2026年11月7日閲覧）」 — 資料を開く
17. **Applied Materials**「Plating（製品ページ、2026年11月7日閲覧）」 — 資料を開く
18. **Lam Research**「Deposition」 — 資料を開く
19. **Lam Research**「SABRE Product Family」 — 資料を開く
20. **Lam Research**「SABRE 3D Product Family」 — 資料を開く
21. **ACM Research（米国SEC提出 Form 10-K、2025年度）**「Item 1 Business、Item 2 Properties」 — 資料を開く
22. **盛美半導体設備（上海）**「2025年年度報告（p.20、p.26、p.46）」 — 資料を開く
23. **北方華創（NAURA）**「2025年年度報告（p.17〜18、p.21〜22）」 — 資料を開く
24. **アルバック**「ULVAC 統合報告書2025（p.4、p.28、p.34）」 — 資料を開く
25. **JX金属**「統合報告書2026（PDF p.8、p.35〜36）」 — 資料を開く
26. **Solstice Advanced Materials**「Sputtering Targets and Coil Sets（製品ページ）」 — 資料を開く
27. **寧波江豊電子材料（Konfoong）**「2025年年度報告（p.11〜13、p.15）」 — 資料を開く
28. **Materion**「2024 Annual Report（Form 10-Kを含む、PDF p.13）」 — 資料を開く
29. **上村工業**「2026年3月期 決算説明資料（2026年5月15日、p.2、p.13、p.21）」 — 資料を開く
30. **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
31. **経済産業省**「半導体・デジタル産業戦略の今後の方向性（Executive Summary、2025年12月23日）p.3」 — 資料を開く
32. **東京エレクトロン**「統合報告書2026（p.11、全文検索）」 — 資料を開く

17. 主張と出典の対応表（監査）

本文の主張	根拠	区分
材料ごとの作り方（Al・Ti/Ti-W・TiN・Cu）、蒸着は10^{-5} Torr未満・合金が苦手・段差被覆が悪く今はめったに使われない、スパッタは1〜100 mTorr・合金や化合物が得意、Ar^{+}がターゲットをたたく、スパッタ率の定義と依存性、DCとRFの使い分け、バイアススパッタ、付着係数と$\cos^{n}\theta$の表	Stanford EE212 ch9 [1]	事実
10〜100 mTorr・約1 kV・16 eV、スパッタ率0.1〜3、原子のビリヤードとエネルギー移送の式、電子は軽い、絶縁体では1〜10 μsでプラズマが消える、13.56 MHz、r＝mv/qBと1 mm未満、磁場で電子の滞在時間が延びる、反応性スパッタでTiN	MIT OCW pvd_1 [2]	事実
講義での半導体用PVDの主流はマグネトロン、電流密度10〜100と1 mA/cm^2、距離5〜10 cm・2〜10 mTorr・数百V、レーストラック、壁の影で底の角が薄い、平均自由行程1/(260P) cm	Saraswat EE311 [3]	事実
平面マグネトロンの利用率40%以下・回転円筒90%以上（大面積コーティングの文脈）	US7531071 [4]	事実
磁石を回す、ふつうのPVDのイオン密度10^{9} cm^{-3}未満・cos分布、オーバーハングとボイド・めっきが不可能に、ロングスローの距離と欠点、高密度プラズマ10^{11} cm^{-3}以上・30 mTorr以上・銅が50〜75 ℃でもバリア上でぬれなくなる、SIP・自己スパッタの収率が1超・5 mTorr未満	AMAT EP1091016A2 [5]	事実
反応性スパッタのTiNバリア、TiN 135 nmに対し底40 nm、厚さ1 cmのハチの巣状の板、底の被覆約4%→11%・17%、成膜速度が4分の1	US5401675 [6]	事実
銅の約85%がイオン化、静電的にそろえられる、ふつうのスパッタではピンチオフで空洞	Rossnagel ほか [7]	事実
バリア材料TiN・TaNなど、バリア・シードは主にPVD、めっきの反応式、バリアに直接めっきは不可、添加剤の種類、電流密度の図、バリアが断面を奪う	Saraswat Cu notes [8]	事実
抵抗率の表、2番目に電気を通す、融点、EM寿命110倍超、促進剤が底に集まる、シードはPVDが好まれる、サイズ効果	Saraswat Cu slides [9]	事実
シードはウェハの縁から電流を届ける、コンフォーマルではシーム・ボイド、底を速く、スーパーフィルの命名、析出速度は電流密度に比例、1989年・1997年・1998年の年表、抵抗40〜45%減	IBM J. Res. Dev. [10]	事実
電気めっきは視野になかった、1997年9月の発表、1998年6月の出荷、バーリントン	ECS Interface [11]	事実
ファラデーの法則 W＝AQ/nF、96,487 C	ユタ大学 [12]	事実
CEACで定量的に説明、促進剤SPSが抑制種を押しのける、PEG 3,400とNaCl	Moffat 2002 [13]	事実

本文の主張	根拠	区分
典型的な添加剤の組み合わせ、凹面の面積減少で促進剤が濃縮、PVDではできない、平滑剤が過剰な成長を抑える	Moffat 2023 [14]	事実
配線抵抗が指数関数的増加の領域、新バリア・ALDバリア・銅以外、バリア1.5→1.0→0.5 nm→バリアなし、Ru・Mo・Co、銅は少なくとも2029年まで	IRDS 2024 [15]	事実
Enduraは最も成功した配線用成膜装置・この20年の大多数のチップ・最大9室	AMAT Endura [16]	事実
ECDは先端パッケージの重要工程、ハイブリッド接合・TSVなど、金・ニッケル・銀・スズ、20 nm未満・5：1超の埋め込み	AMAT Plating [17]	事実
Lamの成膜ページはECD・CVD・ALDなどでスパッタ型PVDの製品なし	Lam [18]	事実
SABREは銅配線への移行を先導	Lam SABRE [19]	事実
SABRE 3DはTSV・銅ピラー・RDL・マイクロバンプなど	Lam SABRE 3D [20]	事実
本社フレモント・開発製造の大部分が中国、ECP市場約15億ドル・PECVD約53億ドル（同社推定）、極薄シード向けのめっき技術	ACM Research 10-K [21]（SEC原文で確認）	事実
めっき装置の世界シェア8.2%・3位（Gartner）、中国の12インチ銅配線めっきでトップの地位、AMATとLamの得意分野	盛美上海 [22]	事実
PVDの1,000台目、PVDの用途、12インチめっき装置	NAURA [23]	事実
金属膜工程の実績と量産対応力、粉末冶金のターゲット	アルバック [24]	事実
半導体用ターゲット約65%・高純度タンタル粉約50%（同社推定）、9Nの銅、強み、生産能力1.3倍・台湾1.4倍・韓国2倍	JX金属 [25]	事実
世界最大のターゲット製造者、6N銅、2025年にHoneywellから分社	Solstice [26]	事実
純度の要求（5N5・6N・5N）、核心技術、CuMn合金、タンタル、売上28.5億元・22%増、世界の先頭集団、国産化	江豊電子 [27]	事実
ターゲット分野の競争相手の一覧	Materion [28]	事実
ウェハー用めっき装置、薬品558億円・ウェハー・パッケージ関連444.9億円・地域別、生成AIサーバー向け、ホルマリンフリー無電解銅	上村工業 [29]	事実
2025年の装置販売額1,351億ドル、中国493億・台湾315億・韓国258億・日本95億ドル	SEAJ [30]	事実
半導体製造装置で日本企業約28%（2023年）	経済産業省 [31]	事実
成膜の説明は酸化・CVD・ALD、PVD・スパッタ・めっきの語なし	東京エレクトロン [32]	事実

本文の主張	根拠	区分
エネルギー移送0.95・0.96・0.59、電子の質量はアルゴンの約7万分の1、電子の旋回半径約0.34 mm（表面からの距離とは別）、気体の平均自由行程約0.8 cm・3.8 cm、めっき速度約3.7 nm/s・0.22 μm/分・0.44 μm/分、9Nの不純物割合は10億分の1（原子比への直接換算ではない）、IBMの実証から量産まで約9年、上村工業の約8割	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
TELの報告書にスパッタ・めっきの語がないことの読み方、JX金属とSolsticeの数え方の違い、新しい金属のターゲット・原料の需要	本稿の推測	推測
図による粒子・電極・成膜工程の説明、磁場と電場の区別、旋回半径と距離の区別、電流効率・局所電流密度、CEACの読み方、純度の読み方	本文中で区別した一般原理の説明。図は定量シミュレーションではない	解説

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（国際デバイス・システム・ロードマップ）、企業の情報は各社の統合報告書・年次報告書・決算資料・製品ページ・米国SEC提出書類、地域別の数字はSEAJ・経済産業省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で作成した模式図です。粒子の大きさや膜厚は、理解しやすいように強調しています。

© 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。