SEMICONDUCTOR FRONT-END · PART 3-10

イオン注入とアニール 原子を加速して打ち込み、熱で目覚めさせる

シリコンがトランジスタとして働くのは、ホウ素やリンといった「不純物」を、決まった場所に、決まった量だけ入れるからです。その主役が**イオン注入**です。原子をイオンにして電圧で加速し、ウェハに打ち込みます。量はビーム電荷の測定で管理し、平均の深さはイオンの種類とエネルギーなどで調整できます。その代わり、打ち込まれた結晶は傷だらけになるので、熱をかける**アニール**で傷を治し、不純物を働かせます。この回では、イオンが止まるまでの物理、装置のしくみ、熱で治すときの落とし穴、そして米国2社と日本勢の勢力図を見ていきます。

半導体前工程シリーズ 第3部 3-10／難易度 ★★★
事前学習：3-2／最終更新：2026年11月8日

この記事の構成

1. この回を3行でつかむ
2. 技術編① — 不純物を「打ち込む」
3. 技術編② — 装置のしくみ：加速し、選び、数える
4. 技術編③ — イオンはどこで止まるか
5. 技術編④ — 傷を治し、目覚めさせる：アニール
6. 技術編⑤ — SiCでは「熱しながら」打ち込む
7. 産業編① — 装置：米国2社が8割
8. 産業編② — 素材と部品：素材の技術者の出番
9. これから求められること
10. まとめと次回予告
11. 確認クイズ
12. 用語集
13. 参考資料（一次情報）
14. 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

- 熱拡散と比べたイオン注入の利点と欠点を説明できる
- 加速したイオンを磁場で選び分け、電流を数えて量を決めるしくみを、高校の物理（qV、ローレンツ力、電流×時間）で説明できる
- 打ち込まれたイオンの深さの分布（射程とばらつき）と、チャネリングを説明できる
- 注入で傷ついた結晶をアニールで治すとき、何が起き、なぜ不純物が余計に広がることがあるのかを説明できる
- イオン注入装置で、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

- **イオン注入**は、ホウ素・リン・ヒ素などの原子をイオンにして加速し、シリコンに打ち込む方法です。量は**ビーム電流の時間積分**で、深さの分布は**イオン種・加速エネルギー・材料・結晶方位**などで決まり、レジストを型紙にして必要な場所だけに入れられます。日本半導体歴史館は、1980年代前半に、熱で拡散させる方法からイオン注入への移行が進んだと説明しています。
- 打ち込まれたイオンは、原子核との衝突や電子との相互作用でエネルギーを失って止まり、深さの分布は**ガウス形で近似できる場合**があります。そのとき結晶は大きく傷つくので、**アニール**（熱処理）で結晶を治し、不純物を働かせます。ただし傷から出てきた余分な原子が、不純物の拡散を一時的に大きく速めます（**TED**）。
- イオン注入装置の世界市場は約3,000億円で、米国の**Axcelis**が51%、**Applied Materials**が28%です（経済産業省の資料）。日本には、住友重機械イオンテクノロジーと日新イオン機器があります。

2. 技術編① — 不純物を「打ち込む」

なぜ不純物を入れるのか

純粋なシリコンは、電気をあまり通しません。そこにリンやヒ素（5族）を入れると電子が、ホウ素（3族）を入れると正孔が増え、電気を運ぶ役者が生まれます（概論1-1）。トランジスタは、こうした**n型とp型の領域**を、決まった場所に、決まった濃さで作り分けて成り立っています 解説 。

Axcelisは年次報告書で、典型的な製造工程では**約20回**のイオン注入が必要で、最先端の工程ではそれよりかなり多いとしています。1回ごとに、**不純物の種類・量（線量）・エネルギー・ウェハの傾き**の4つを決めます [7] 事実 。

熱拡散からイオン注入へ

以前は、不純物を含む気体の中でウェハを高温に熱し、表面から**拡散**させて入れていました。日本半導体歴史館は、この熱拡散では表面の濃度・深さ・濃度の分布を**別々に制御するのが難しく**、微細化で浅い接合が必要になるにつれて限界に来ていたと説明しています [2] 事実 。

イオン注入の利点として、歴史館は次の4つを挙げています [2] 事実 。

- **低い温度**で処理できる
- 注入した量を**モニターできる**
- フォトレジストを**マスク**にして、選んだ場所だけに入れられる
- シリコンの中の**装置・材料の範囲内で、深さと量を調整しやすい**

Stanford大学の講義資料は、線量（1 cm²あたりに入れる原子の数）を**10^{11}〜10^{16}個**という広い範囲で、きわめて正確に制御できることを挙げ、MOSトランジスタのしきい値電圧の調整には欠かせないとしています。一方で欠点として、**結晶の損傷**、その損傷を熱で治すときの**異常な拡散（TED）**、絶縁膜の**帯電**を挙げています [1] 事実 。

ショックレーの特許から、1970年代の実用化へ

イオンを打ち込んで半導体の性質を変えるアイデアは、トランジスタの発明者の一人、**ウィリアム・ショックレー**の特許にあります。ベル研究所の特許「イオンの衝撃による半導体素子の形成」は1954年10月に出願され、1957年4月に登録されました。請求項は、反対の導電型になる不純物のイオンビームで半導体を照射して内部にその型の領域を作り、**照射で生じた損傷を修復するためにアニールする**というものです [6] 事実 。打ち込みと熱処理をセットで考える発想は、最初の特許にすでに書かれていました 解説 。



左からジョン・バーディーン、ウィリアム・ショックレー、ウォルター・ブラッテン。トランジスタの発明の公表（1948年6月30日）のころにベル研究所が作った広報写真の一枚です（Commonsの説明による）。ショックレーは、その6年後にイオン注入の特許を出願しました [6]。
画像：AT&T / Wikimedia Commons / Public domain（掲載用に縮小・WebP化）

日本半導体歴史館によると、イオン注入は1950年代から研究され、1960年代後半に本格的な装置が開発されて、1970年代前半に実用化されました [3] 事実 。日本では、1968年に当時の新技術開発事業団が大型の開発課題に取り上げ、理化学研究所の難波進と日立、早稲田大学の伊藤糾次と東芝の2つのグループが実用化の研究を進めました。難波によると、当初は「大きなイオンが結晶の中に深く入るはずがない」「入っても結晶を壊して実用にならない」という反対意見が続出したといいます [5] 事実 。

量産では、1972年ごろに**中程度の線量**の注入が、1977年ごろに**高い線量**の注入が実用化され、1990年代には**高いエネルギー**の注入で深い領域（ウェル）を作るようになりました [4] 事実 。

3. 技術編② — 装置のしくみ：加速し、選び、数える

イオン源から、ウェハまで

Stanford大学の講義資料の装置図は、次の順に並んでいます [1] 事実 。

1. **イオン源**：ガスなどを放電させて、不純物の原子をイオンにする
2. **分析マグネット**：磁場でイオンの軌道を曲げ、欲しいイオンだけを選ぶ
3. **加速器**：電圧で、狙ったエネルギーまで加速する
4. **走査**：ビームを振り、ウェハ全面に均一に当てる
5. **ファラデーカップ**：ビームの電流を測る

Axcelisは、イオン注入装置が作るビームのエネルギーは**数百eVから800万eV（8 MeV）**、ビームの電流は**マイクロアンペアからミリアンペア**の範囲だと説明しています [7] 事実 。

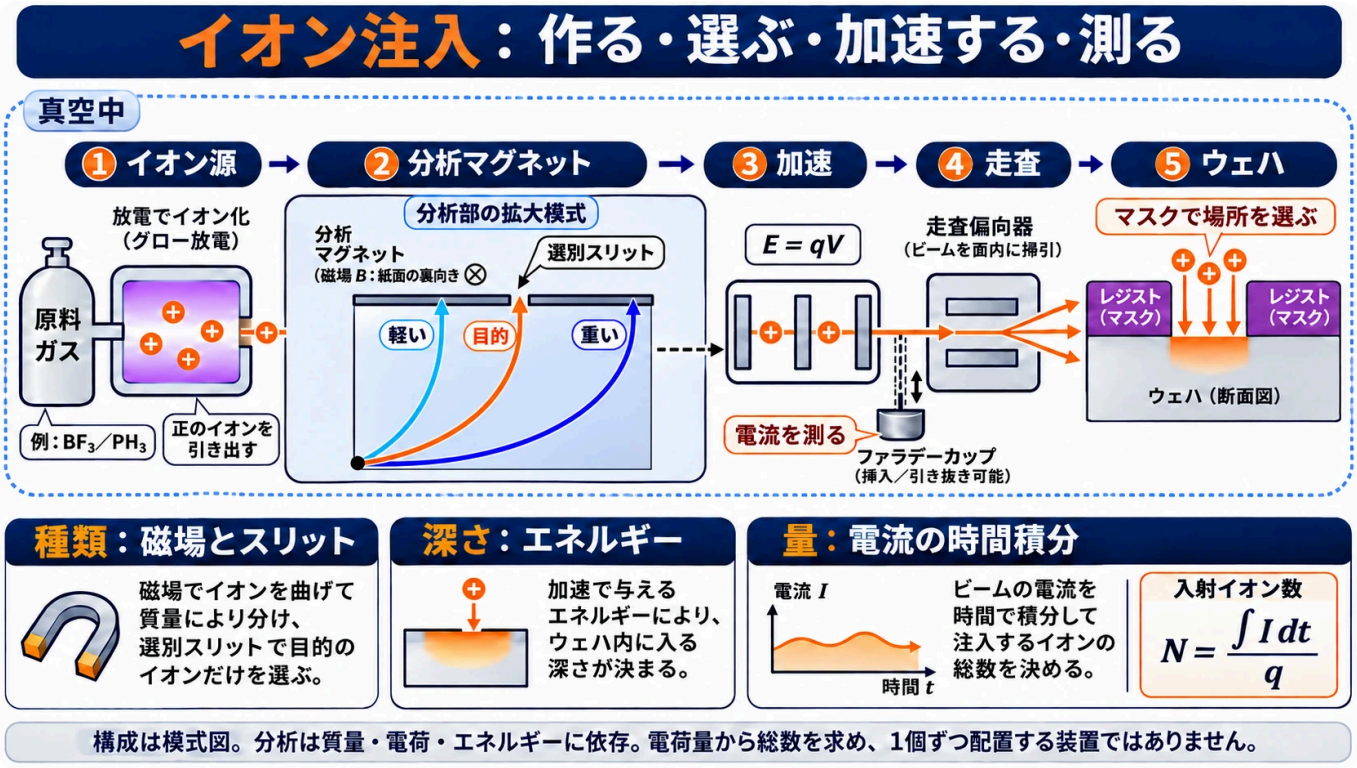


図1　イオン注入装置：作る・選ぶ・加速する・数える（概念図）

図の読み方

イオン源で作り、分析マグネットとスリットで選び、加速と走査でウェハへ届けます。ファラデーカップは電荷を測る部品で、実機では測定位置や走査・ウェハ搬送の方法が異なります。磁場の曲がり方は質量だけでなく電荷とエネルギーにも依存し、分析部の拡大枠は曲がり方の違いを誇張した概念図で、装置全体の実際の配管配置や軌道半径を示しません。同じ電荷・エネルギーのイオンを比べています [1]。



材料に荷電粒子を打ち込むイオン注入装置（ドイツ博物館の展示。Commonsの説明による）。左右に長く伸びる管が、イオンが通る真空の通り道です 解説 。

画像：Edelmauswaldgeist / Wikimedia Commons / CC0（掲載用に縮小・WebP化）

物理のツボ①：電圧で加速し、磁場で選ぶ

加速：電荷qのイオンが電圧Vで加速されると、運動エネルギー E = qV を得ます 解説 。1価のイオンを10 kVで加速すれば10 keVです。2価のイオンなら同じ電圧で2倍、3価なら3倍のエネルギーになります。日新イオン機器のSiC向け装置は、加速電圧320 kVで、3価のイオンを使うと最大**960 keV**に達するとしています [11] 事実 （320 × 3 = 960 本稿の計算 ）。

10 keVのイオンの速さを、E = ½mv² から求めると次のとおりです（原子量はPubChemの値 [13]） 本稿の計算 。

イオン	原子量	10 keVでの速さ
ホウ素 B^+	10.81	約42万 m/s
リン P^+	30.97	約25万 m/s
ヒ素 As^+	74.92	約16万 m/s

本稿の計算

選ぶ：磁場Bの中を速さvで動くイオンは、ローレンツ力 qvB を受けて円を描きます。qvB = mv²／r から、半径は r = mv／（qB）=√（2mE）／（qB）です 解説 。同じエネルギー・同じ電荷なら、**重いイオンほど曲がりにくい**（rが大きい）ので、スリットの位置で目的のイオンだけを通せます。

たとえば40 keVの1価のイオンを0.5 Tの磁場で曲げると、半径はホウ素で約0.19 m、リンで約0.32 m、ヒ素で約0.50 mです 本稿の計算 。質量数10と11のホウ素（同位体）でも、半径は約5%違います（√（11／10）≒1.05） 本稿の計算 。磁場とスリットは、電荷とエネルギーの条件をそろえたうえで、狙ったイオン種を選ぶ役目をしています 解説 。

- **電流を数えれば、量がわかる**

イオン1個が運ぶ電荷はq＝zeです（1価なら e ＝ 約1.6 × 10^{-19} C）。ウェハに流れ込んだ電流を時間で積分すれば、打ち込んだイオンの数が分かります。歴史館も、注入される量は「イオンビーム電流の時間積分で与えられる」と説明しています [2] 事実 。

物理のツボ②：線量と時間を計算してみる

線量 Q（個/cm²）、ウェハの面積 A、ビーム電流 I、時間 t、電気素量 e のあいだには、Q ＝ I t ／（e A）という関係があります（1価、電流一定、全ビームが対象面積へ均一に入射する理想化） 解説 。

直径300 mmのウェハ（面積 約707 cm²）に、線量10^{15}個/cm²を入れるとします。必要なイオンは約7.1 × 10^{17}個、電荷にして約0.11 Cです。ビーム電流が1 mAなら約110秒、10 mAなら約11秒かかります 本稿の計算 。一方、線量10^{12}個/cm²なら、10 μAでも約11秒です 本稿の計算 。

歴史館によると、1970年代にしきい値の調整などに使われた**中電流**の装置はマイクロアンペア級、1980年代前半にソース・ドレインの高濃度の層を作るために登場した**高電流**の装置はミリアンペア級です [2] 事実 。高い線量を短い時間で入れるには、大きな電流が必要だからです。実機では走査の利用効率や二次電子などの影響を補正して線量を管理します。分子イオンでは、イオンの個数とドーパント原子数の対応にも注意が必要です。

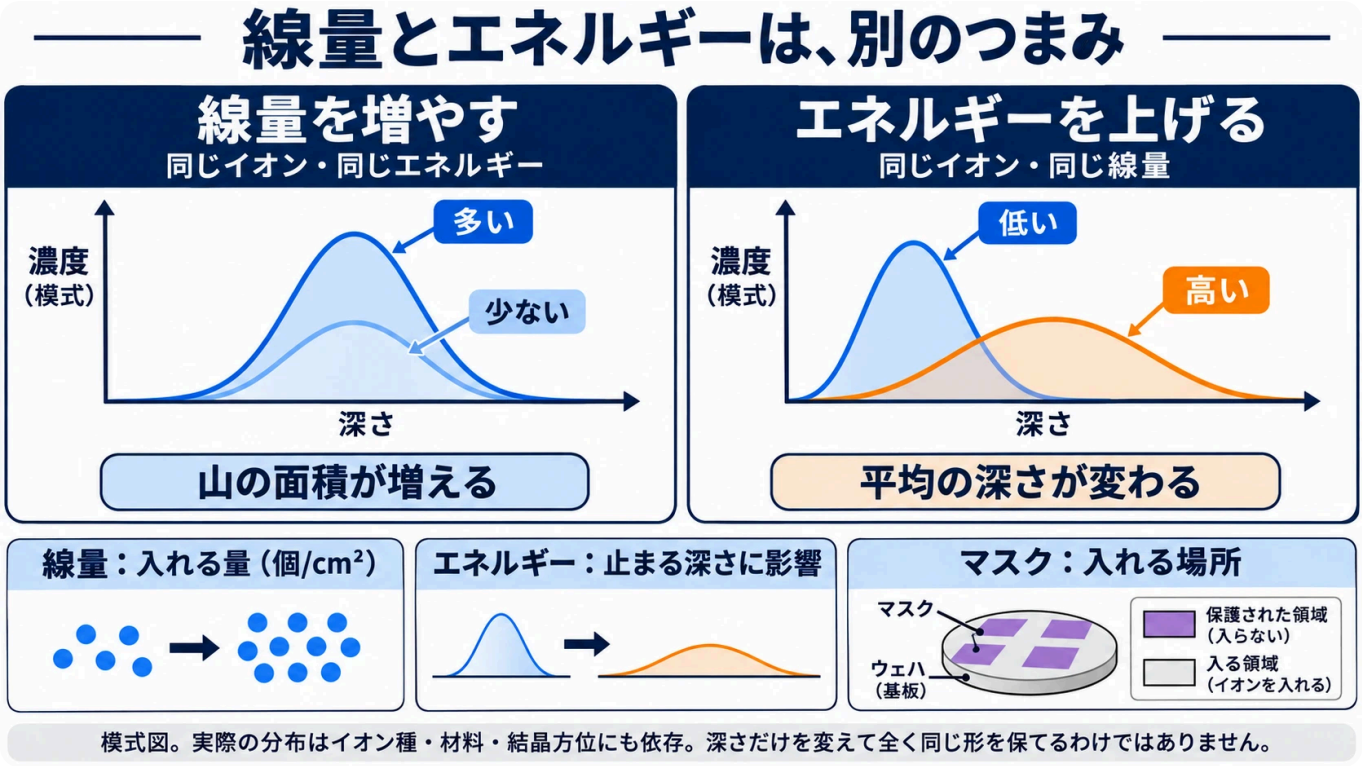


図2　線量とエネルギー：入れる量と深さを分けて考える（概念図）

図の読み方

左は同じイオン・エネルギーで線量を増やす考え方で、濃度分布の面積が増えます。右は同じイオン・線量でエネルギーを変える例で、平均深さだけでなく広がりも変わりえます。山の高さは線量そのものではなく、深さ方向の積分が線量です。実測データではありません [1]。

3種類の装置

Axcelisは、装置を線量とエネルギーで3つに分けています [7] 事実 。

種類	特徴（Axcelisの説明）
中電流	最初に生まれた種類。エネルギーも線量も中〜低い範囲
高電流	2番目に生まれた種類。エネルギーは低く、線量は高い
高エネルギー	深い注入のために生まれた種類。エネルギーは高く、線量は低い

事実



フランス・トゥールーズのLAAS-CNRS技術施設にあるイオン注入装置の前面（Commonsの説明による）。量産工場の装置はもっと大きく、ウェハを自動で出し入れします 解説 。

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

4. 技術編③ — イオンはどこで止まるか

ぶつかりながら止まる

1〜1000 keVのイオンは、シリコンの中で**原子核との衝突**と、**電子による抵抗**（ブレーキのような力）でエネルギーを失い、止まります。個々の軌跡にはばらつきがあります [1] 事実 。

- **原子核との衝突**：イオンがシリコンの原子核にぶつかって向きを変え、相手の原子をはじき飛ばす。遅いイオンや重いイオンで効く
- **電子による抵抗**：電子の「海」の中を進むことで受けるブレーキ。速いイオンで効く

講義資料は、2つの効果が等しくなるエネルギーを、ホウ素で約17 keV、リンで約150 keV、ヒ素・アンチモンで500 keV超としています [1] 事実 。この比較例では、同じエネルギーでもイオン種によって2つの寄与が変わります。どちらが支配的かはエネルギー領域に依存します 解説 。

深さの分布：射程とばらつき

止まった位置を集めると、深さの分布はしばしば**ガウス分布**で表せます。表面に垂直な方向の平均到達深さを**投影射程**（R_p、ガウス近似ではピークと一致）、広がりを**標準偏差**（ΔR_p）と呼び、線量Qとピークの濃度C_pのあいだには $Q = \sqrt{(2\pi)}\,\Delta R_p\, C_p$ の関係があります [1] 事実 。

物理のツボ③：ピークの濃さは、シリコン原子の何分の1か

仮に、線量10^{15}個/cm²を、ΔR_p = 20 nm（2×10^{-6} cm）で入れたとします。ピークの濃度は $C_p = 10^{15} \div (2.507 \times 2 \times 10^{-6}) \fallingdotseq 2 \times 10^{20}$個/cm³です 本稿の計算 。

シリコンの原子の数は、密度2.3296 g/cm³と原子量28.085（PubChem [13]）、アボガドロ定数から、約5.0×10^{22}個/cm³です 本稿の計算 。ピークでも、**シリコン原子250個に1個**ほどが不純物という計算になります。これは仮定した化学濃度の例で、全ての原子が電気的に活性な状態になるという意味ではありません 本稿の計算 。ほんのわずかな「混ぜ物」が、電気の性質を大きく変えます 解説 。

講義資料は、モンテカルロ計算で、35 keVのリンのイオン1,000個の軌跡が、ビームの方向に**細長い楕円**の形に分布する様子を示しています。高いエネルギーのイオンの多くは、小さな角度でしか曲がらないからです [1] 事実 。イオンは横にも少し広がるので、マスクの端の下にも不純物が少し入り込みます [1] 事実 。また、マスクは、打ち込んだイオンを止められる厚さが必要で、その厚さはマスクの中での射程とばらつきから計算できます [1] 事実 。

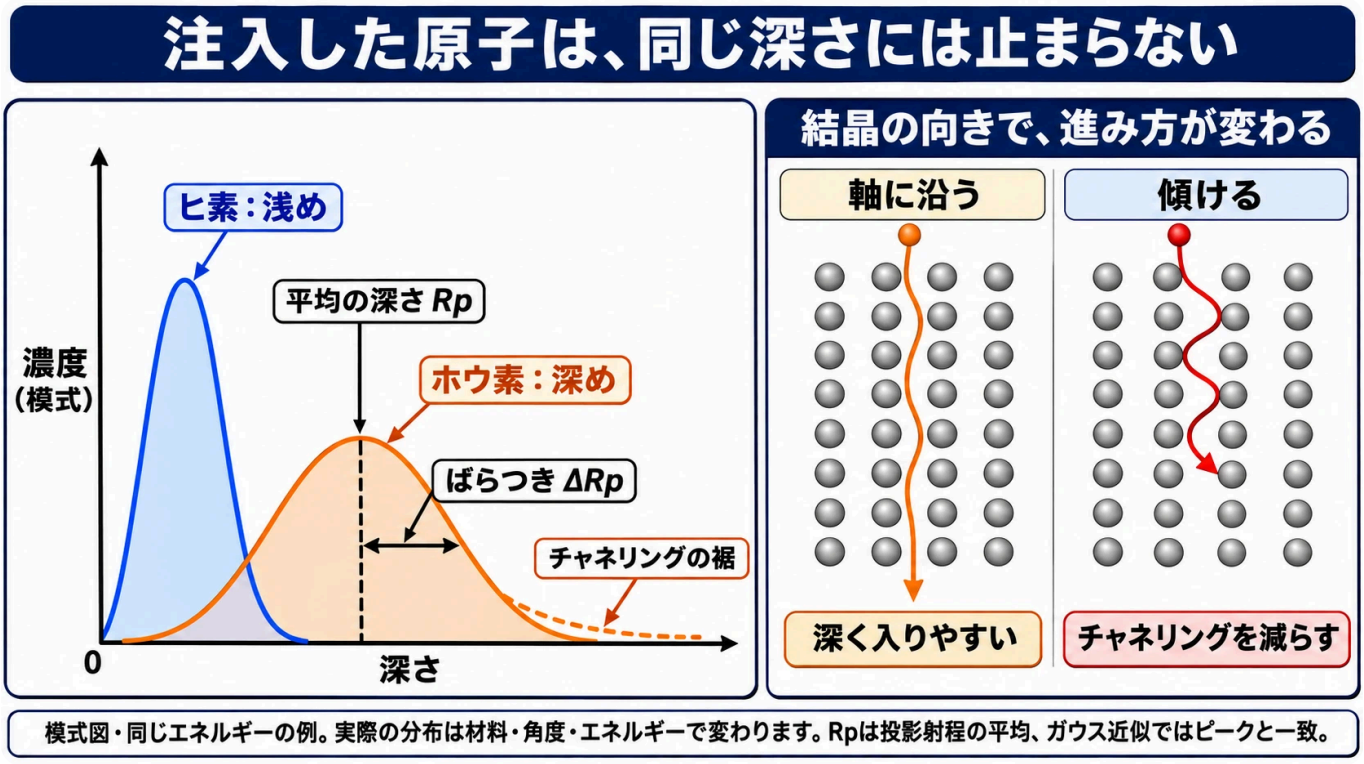


図3　深さの分布：射程、ばらつき、チャネリング（概念図）

図の読み方

左は濃度を通常の縦軸で示した模式図です。R_pは表面に垂直な方向の平均到達深さ（投影射程）で、ガウス近似ではピークと一致します。ΔR_pは標準偏差で、山の全幅ではありません。チャネリングがあると単純なガウス形より深い側に裾が伸びます。右は結晶方位の効果を示し、実際の原子配列や傾斜角を再現した図ではありません [1]。

- **結晶の「通路」：チャネリング**

シリコンは、少なくとも注入で壊されるまでは、原子が規則正しく並んだ結晶です。結晶の向きによっては、原子の列のあいだに**通路**が開いていて、そこに入ったイオンはぶつかりにくく、予想外に深くまで進みます。これを**チャネリング**と呼びます [1] 事実 。

講義資料は、薄い酸化膜（スクリーン酸化膜）を通して注入したり、ウェハを傾けたり回転させたりすると、チャネリングを減らせるが、完全には消せないとし、「**7°傾けるのが一般的**」という従来の例を挙げています。最適な傾きと回転角は、結晶面・イオン種・エネルギー・立体構造によって異なり、7°がすべての工程での固定条件ではありません [1] 事実 。Axcelisが挙げる4つの条件の1つ「傾き」は、このためにもあります [7] 解説 。

5. 技術編④ — 傷を治し、目覚めさせる：アニール

- **1個のイオンが、1,000個の原子をはじき飛ばす**

講義資料は、30 keVのヒ素のイオンが、射程約25 nm、つまり**約100枚の原子の面**を通り抜けると説明しています。はじき飛ばされる原子の数の目安は、$n = E / (2E_d) = 30{,}000\ \text{eV} \div (2 \times 15\ \text{eV}) =$ **約1,000個**です（E_dは原子を定位置から動かすのに必要なエネルギー） [1] 事実 。

イオン種・線量・注入温度などの条件によっては、結晶の規則性が失われ、**非晶質**（アモルファス）の層になります [1] 事実 。歴史館も、イオンが通った部分のシリコンの結晶は破壊されているので、熱処理で回復させる必要があると書いています [2] 事実 。

- **アニールの4つの目標**

講義資料は、注入後のアニールの目標を次の4つとしています [1] 事実 。

1. 注入で生じた損傷を取り除き、不純物を**活性化**する（結晶の正しい位置に収め、電子や正孔を出せるようにする）
2. シリコンの結晶をできるだけ回復させる（残留欠陥を管理する）
3. 電子と正孔の動きやすさ（移動度）を回復させる
4. それを、不純物をあまり動かさずに行う

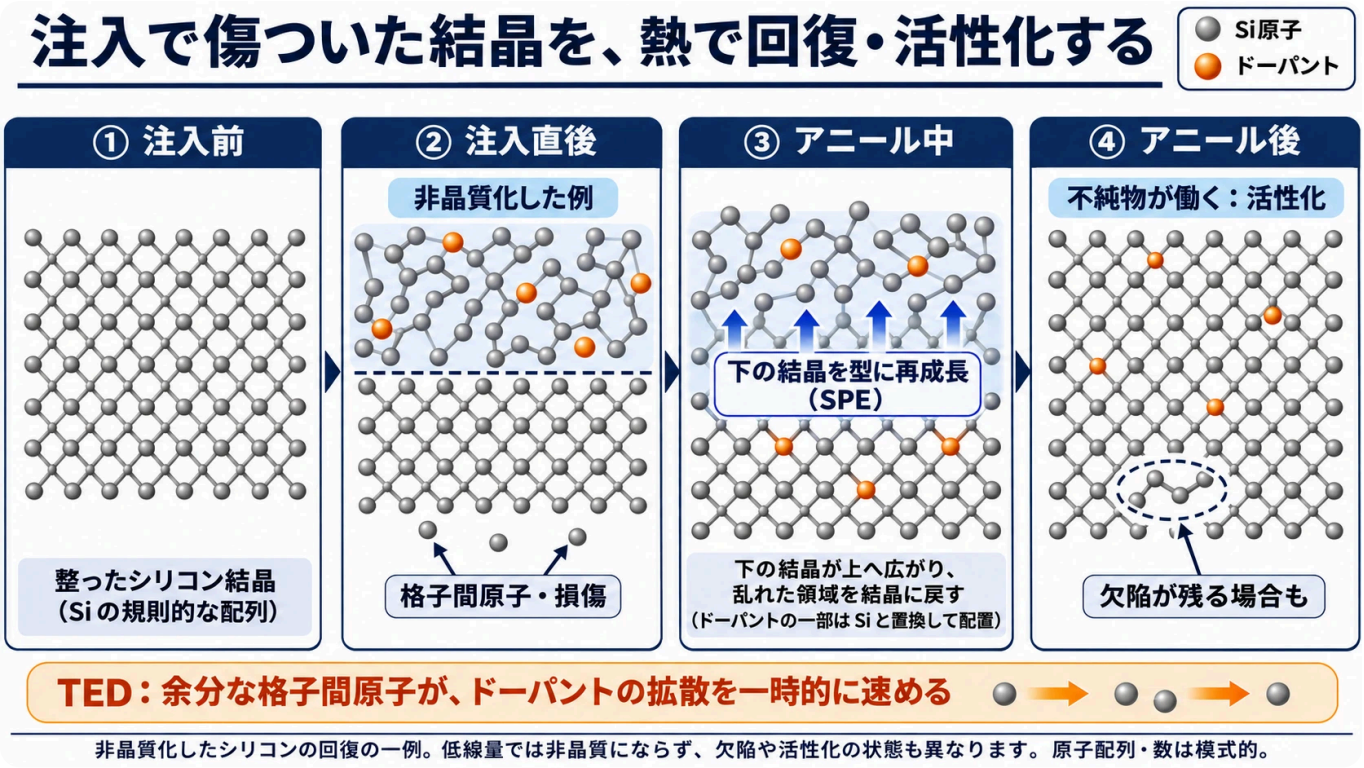


図4　注入からアニールまで：傷つき、並び直し、働き出す（概念図）

図の読み方

非晶質になったシリコン層が、下の結晶を型に再成長する例です。注入条件によっては非晶質にならず、回復の経過も異なります。オレンジはドーパントの位置を示す記号で、数や配列は模式的です。結晶が回復しても、残留欠陥や不活性なドーパントがありえます [1]。

● 下から並び直す：固相エピタキシャル成長

非晶質になった層は、下に残った結晶を「型」にして、下から上へ並び直します。これを**固相エピタキシャル成長**（SPE）と呼びます。講義資料は、525 ℃で、アンチモンを注入して非晶質になった層が、5分、10分…と時間を追って下から結晶に戻っていく電子顕微鏡写真を示しています [1] 事実 。

講義資料は、基板が非晶質になっているときは、SPEが損傷の修復と不純物の活性化の理想的な方法になるとしています。一方、線量が低くて非晶質にならないときは、安定な欠陥ができるので、活性化はずっと複雑になります。ホウ素では、ある温度の範囲で、温度を上げたのにかえって活性化の割合が下がる「逆アニール」も起こります [1] 事実 。また、非晶質の層と結晶の境目より深い所に残った損傷は、二次的な欠陥のもとになり、TEDを引き起こしえます [1] 事実 。

● 余分な格子間原子が、拡散を一時的に速める：TED

3-2で見たように、熱をかけると不純物は拡散して広がります。イオン注入の後は、さらに困ったことが起きます。注入で生じた傷の大部分はすぐに消えますが、代表的な近似の「+1モデル」では、注入イオン1個あたりおよそ1個の**余分なシリコン格子間原子**が残ると考えます [1] 事実 。

この余分な原子は集まって**{311}欠陥**と呼ばれる帯状の欠陥を作ります。{311}欠陥は800〜1,000 ℃で秒〜分のうちに消えますが、そのとき余分な原子を放出し、不純物の拡散を一時的に速めます。これが**過渡増速拡散（TED）**です [1] 事実 。講義資料の計算では、750 ℃で0.1秒後、シリコン格子間原子の濃度が熱平衡値の**10万倍を超える例**が示されています。これは格子間原子の過飽和の値であり、全てのドーパントの拡散係数が一律に10万倍になるという意味ではありません [1] 事実 。

講義資料（1999年度）は、TEDを浅い接合の深さを決める支配的な効果としています。しかも、{311}欠陥は低い温度ほど長く残るので、同じ「拡散係数×時間」でも、**低い温度のアニールのほうが、かえって不純物が動く**ことがあります [1] 事実 。

熱は短く、強く — 3-2とのつながり

「温度を下げれば広がりにくい」という直感が、イオン注入の後は通用しないことがあります。そこで、高い温度まで一気に上げて、すぐに下げる短時間の熱処理（RTP、フラッシュランプ、レーザー）が発達しました。Mattsonの技術者は、浅い接合を作るには拡散・活性化・欠陥の修復のバランスを慎重に取る必要があり、ミリ秒の加熱は短すぎて欠陥を治しきれないこともあると指摘しています [15] 事実 。SCREENのフラッシュランプアニール装置は、数ミリ秒の光で表面の温度を上げ下げし、少ない熱の予算で不純物を高く活性化できるとしています [16] 事実 。方式の比較は、3-2で詳しく扱いました 解説 。

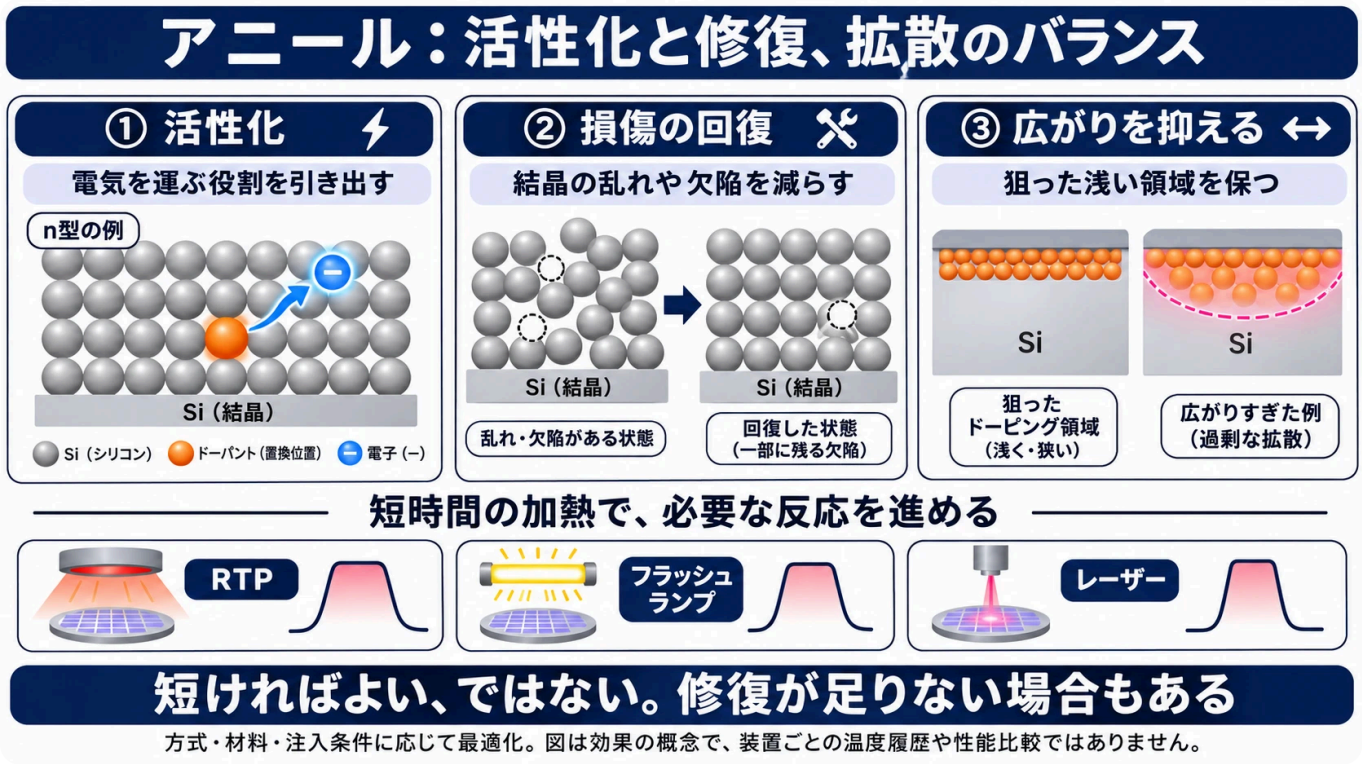


図5　アニールの設計：活性化・修復・拡散を同時に考える（概念図）

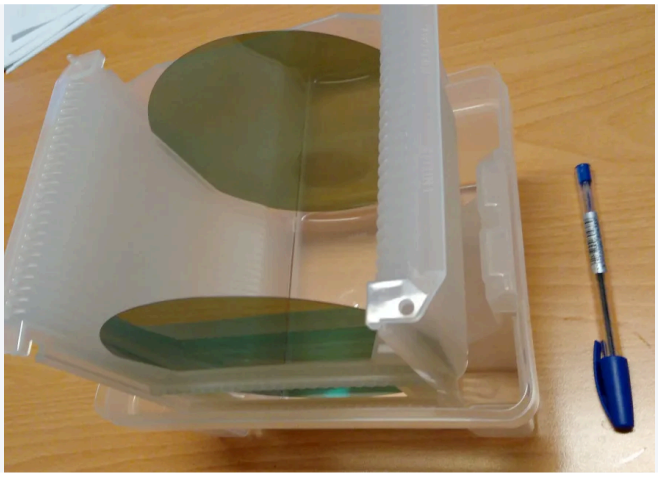
図の読み方

加熱でドーパントを働かせ、損傷を回復しながら、狙った領域を広げすぎないようにします。RTP・フラッシュランプ・レーザーの記号は方式の例で、温度履歴や性能を同じ条件で比較した図ではありません。短時間にすれば必ず最良になるわけではなく、欠陥修復が足りない場合もあります [1][15][16]。

6. 技術編⑤ — SiCでは「熱しながら」打ち込む

電気自動車などのパワー半導体に使われる**炭化ケイ素（SiC）**（2-4）では、事情が違います。日新イオン機器の技術報告は、SiCのウェハにイオン注入をすると、注入で生じた結晶の欠陥がアニールで解消されにくいという問題があり、**ウェハを高温に熱しながら注入する**ことで注入中にも一部の損傷が回復し、欠陥の蓄積を抑えられるとしています [11] 事実 。同社の装置「IMPHEAT」は、ウェハの温度を室温から**500 ℃**まで上げられ、高温に熱した台に静電気でウェハを吸着させて注入します [11] 事実 。この加熱は注入中の損傷の蓄積を抑えるためで、注入後にドーパントを活性化するアニールを省けるという意味ではありません 解説 。

SiCでp型の領域を作るには、アルミニウム（Al）がよく使われます 解説 。日新イオン機器は、SiCのパワー半導体の製造に使うAlの注入量は10^{15}個/cm²の桁だとしています [12] 事実 。同社は、固体のアルミニウムと塩素のガスを反応させる新しいイオン源で、アルミニウムのビーム電流を従来より40〜60%増やしたとしています [12] 事実 。



搬送ケースに入った6インチ（直径150 mm）の炭化ケイ素（SiC）ウェハ2枚（Commonsの説明による）。SiCは結晶の傷が治りにくいため、ウェハを数百℃に熱しながらイオンを打ち込みます [11]。
画像：FDominec / Wikimedia Commons / CC BY-SA 4.0（掲載用にWebP化）

7. 産業編① — 装置：米国2社が8割

引用資料では2社で約8割

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）は、イオン注入装置の世界市場を**2,993億円**としています。会社別では、**Axcelis Technologies（米国）が51%、Applied Materials（米国）が28%**です（図中に市場データの対象年の記載はありません。2025年は資料の公表年です） [9] 事実 。2社で79%です 本稿の計算 。残りの約2割については、図中に社名と数値の記載がありません。図の色分けでは、その多くが日系企業の色で示されています [9] 事実 。

同じ資料で、熱処理装置の市場は3,407億円、東京エレクトロンが42%、Applied Materialsが28%、NAURA（中国）が8%です [9] 事実 。

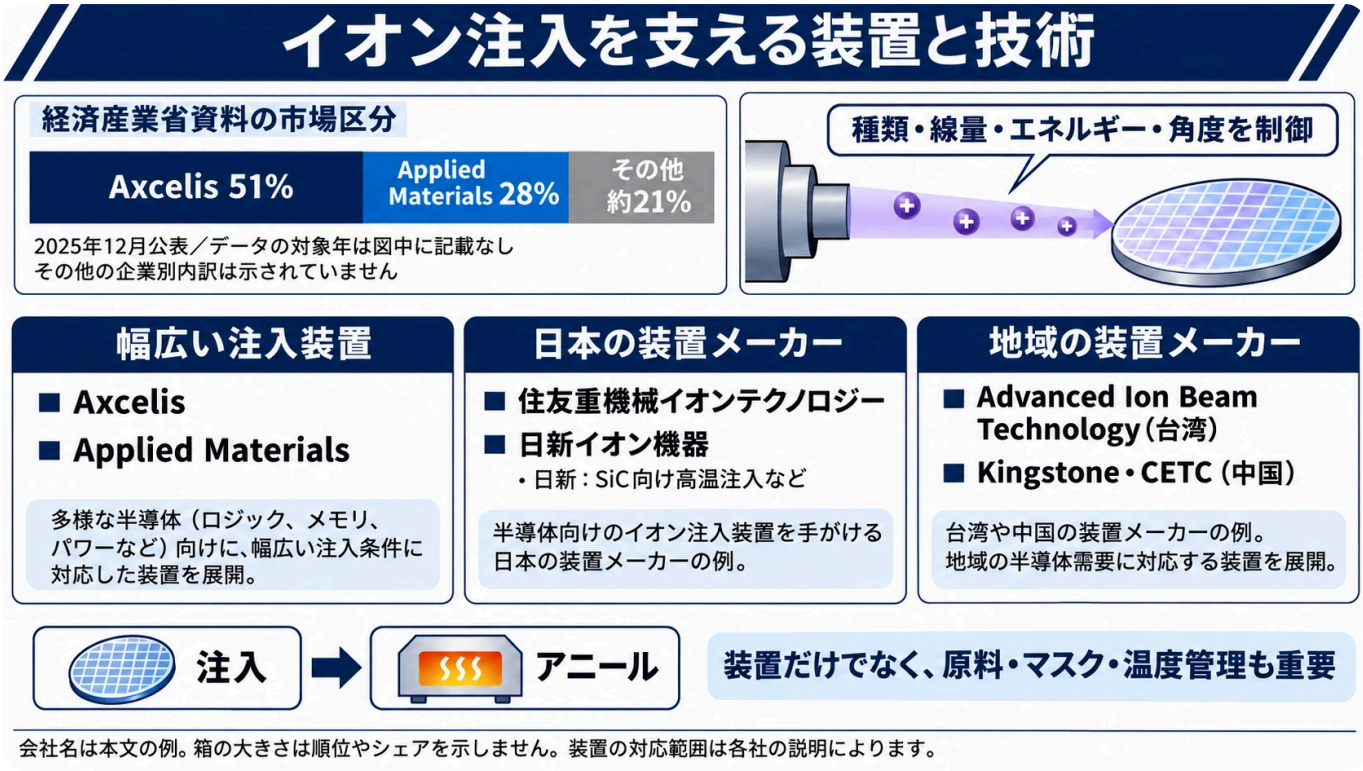


図6　イオン注入装置の勢力図：米国2社と日本・台湾・中国（概念図）

図の読み方

市場の帯は経済産業省資料の区分で、資料公表年と市場データの対象年は別です。「その他」の企業別数値は示されていません。下の会社名は本文で扱う例で、箱の大きさは順位・シェア・取引関係を表しません。注入装置市場と熱処理装置市場は別の集計です [7][9–12][14]。

Axcelis — イオン注入の専業

Axcelis（米国マサチューセッツ州）は、2025年の売上8.39億ドルのうち**98.2%がイオン注入**の事業という専業の会社です。主力の「Purion」シリーズを「市場で最も革新的なイオン注入装置」と自ら位置づけています [7] 事実 。

同社は、イオン注入装置の市場で主に競合するのはApplied Materialsで、**すべての種類の装置をそろえているのはAxcelisとApplied Materialsの2社だけ**だとしています。そのほかの競合として、日本の**住友重機械イオンテクノロジー**と**日新イオン機器**、台湾の**Advanced Ion Beam Technology**、中国の**Kingstone SemiconductorとCETC**（中国電子科技集団の装置会社）を挙げています [7] 事実 。

同社は、イオン注入を多く使う**パワー半導体**の分野で技術のリーダーだとし、パワー半導体向けが2025年の装置の出荷額の**55%**を占めたとしています。SiCのウェハ向けには「Purion Power」シリーズをそろえています [7] 事実 。

輸出規制と中国

Axcelisの年次報告書は、米国の輸出規制が中国への販売に影響していると書いています。米国商務省は2024年12月に、一部の**300 mmウェハ用のイオン注入装置**に新しい輸出管理の分類番号を設けました。同社は、その報告書の時点では中国の顧客のほぼすべてに出荷を続けられているとする一方、規制が強まると、中国の顧客が米国以外の会社（台湾のAIBT、日本の日新イオン機器・住友重機械イオンテクノロジー）に乗り換える危険があるとしています。中国のKingstoneとCETCは、国内市場向けにイオン注入装置の開発を続けているとしています [7] 事実 。

合併：イオン注入とレーザーアニール

Axcelisは2025年9月に、米国の装置会社**Veeco**との合併に合意しました。2026年11月2日の発表では、合併の完了は**2027年3月末まで**にずれ込む見込みで、中国の市場監督管理総局（SAMR）の承認を待ち、米国HSR法の手続きについても再提出を予定しているとしています。完了時期は確約ではありません [8] 事実 。Veecoは、自社の技術として**レーザーアニール**、イオンビーム、MOCVDなどを挙げています [8] 事実 。「打ち込む」会社と「熱で治す」装置を持つ会社が一つになろうとしている、と見ることもできます 推測 。

日本勢 — 加速器の技術から

日本のイオン注入装置の会社には、それぞれの成り立ちがあります。

- **住友重機械工業の系譜**：1978年、米国でPeter RoseがNOVA Associatesを設立し、1979年に10 mA以上のビーム電流を出せる本格的な量産用の高電流装置「NV-10」を完成させました。1号機は同年12月に日本の「T社」へ出荷されています。住友重機械工業は、研究用や医療用のサイクロトロン（加速器）を手がけていた技術を生かし、NOVAを傘下に収めた米国イートン社と合弁で1983年に**住友イートンノバ**を設立し、1984年に国産1号機を出荷しました [4] 事実 。同社は2006年に社名をSEN-SHI・アクセリスカンパニーに改めています [4] 事実 。Axcelisは現在、**住友重機械イオンテクノロジー**を競合の一つに挙げています [7] 事実 。
- **日新イオン機器**（京都）：日新電機が1973年に英国のHVEE社と技術提携し、1974年にイオン注入装置の生産を始めました。1999年に日新電機から製造を引き継いで設立され、2010年にパワー半導体用の高温注入装置「IMPHEAT」の納入を始めています [10] 事実 。同社は、SiCのパワー半導体向け、フラットパネルディスプレイ（FPD）向け、納入済みの装置の保守を事業の3本柱とし、第6世代のガラス基板向けのイオン注入装置では**100%のシェア**を持つとしています（同社の説明） [12] 事実 。

Applied Materialsは、1985年に全自動のイオン注入装置「PI9000」を発売しています [2] 事実 。同社の年次報告書は、半導体装置の部門にイオン注入を含めています [14] 事実 。

8. 産業編② — 素材と部品：素材の技術者の出番

- **不純物の「もと」**：イオン源には、ガスや固体から不純物の原子を供給します。日新イオン機器は、SiC向けのアルミニウムのイオンを、従来はアルミニウムを含む化合物の標的をスパッタしてPF_3のガスで助けて作っていましたが [11]、新しいイオン源では固体のアルミニウムと塩素のガスの反応で作っています [12] 事実 。
- **マスク**：フォトレジストは、不純物が必要な場所だけに入るようにする「型紙」です [7] 事実 。イオンを止められる厚さが必要です [1] 事実 。
- **高温に耐える部品**：SiCの高温注入では、熱したウェハを静電気で吸着する台が使われます。日新イオン機器は、ウェハの熱膨張による割れや、はね上がりを防ぐ工夫が必要だったとしています [11] 事実 。

素材の技術者の出番

イオン注入は、**総数と分布を精密に管理して原子を入れる技術**です。1個ずつ狙った格子位置へ置く方式ではありません 解説 。

- **イオン源の材料**：狙った原子を、狙ったイオンとして大量に取り出すためのガスや固体の材料（[11][12]）
- **マスク材料**：高いエネルギーのイオンを止め、熱にも耐える型紙（[1][7]）
- **加熱・吸着の部品**：500 ℃でもウェハを均一に保つ台（[11]）
- **結晶の回復**：SiCのように傷が治りにくい材料での、注入とアニールの組み合わせ（[11]）

9. これから求められること

- **SiCのパワー半導体**：Axcelisの装置の出荷額の半分以上がパワー半導体向けで [7]、日新イオン機器も、電気自動車メーカーからのコストの要求が厳しくなり、より高い生産性が求められているとしています [12] 事実 。
- **国と国の関係**：米国の輸出規制が強まると、中国の顧客が米国以外の会社に乗り換える可能性があり [7]、合併には中国の承認が必要です [8] 事実 。
- **注入とアニールの一体化**：浅い接合では、注入の損傷と熱処理のバランスが接合の深さを決めます [1][15] 事実 。

10. まとめと次回予告

視点	ポイント
なぜ注入か	熱拡散では濃度・深さ・分布を別々に制御しにくい。注入は低温・量をモニター・レジストでマスク・深さを調整。線量 10^{11}〜10^{16}/cm²
歴史	ショックレーの特許（1954年出願、アニールも請求）。1970年代前半に実用化。日本では1968年に国の開発課題
装置	イオン源→分析マグネット→加速→走査→ファラデーカップ。E＝qV、r=√（2mE）／（qB）。中電流・高電流・高エネルギー
線量	電流の時間積分。300 mmに10^{15}/cm²なら1 mAで約110秒
分布	原子核との衝突と電子のブレーキで止まる。ガウス分布（Rp、ΔRp）。仮定した例ではピークでシリコン原子の約250分の1。チャネリングは7°傾けて減らす
損傷	30 keVのヒ素1個で約1,000個の原子が動く。高線量で非晶質
アニール	SPE（525 ℃で下から並び直す）、活性化、逆アニール。TEDは格子間原子の過飽和で拡散を一時的に速める。低温のほうが動くことも
SiC	欠陥が治りにくいので装置例では最高500 ℃に熱しながら注入。Alの線量は10^{15}の桁
産業	市場2,993億円。Axcelis 51%・AMAT 28%。日本は住友重機械イオンテクノロジー・日新イオン機器。AxcelisとVeecoの合併は中国の承認待ち

次回は**3-11「CMP（化学機械研磨）」**です。ここまで、膜を付けて（成膜）、削って（エッチング）、打ち込んで（注入）きました。凸凹になったウェハの表面を、化学の力と機械の力で、ナノメートルの平らさに磨き上げる工程を見ていきます。

11. 確認クイズ

1. イオン注入が熱拡散に取って代わった理由を2つ挙げてください。

> **▼ 答えを見る**
>
> 低い温度で処理できること、注入した量をモニターできること、フォトレジストをマスクにして選んだ場所だけに入れられること、装置と材料の範囲内で深さと量を調整しやすいことなどです。熱拡散では、表面の濃度・深さ・分布を別々に制御するのが難しくなっていました。

2. 分析マグネットで、目的のイオンだけを選べるのはなぜですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 磁場の中のイオンは半径 $r = \sqrt{2mE} / (qB)$ の円を描くので、同じエネルギー・同じ電荷でも質量が違うと曲がり方が違います。スリットの位置を合わせれば、目的の質量のイオンだけを通せます。

3. 直径300 mmのウェハに線量10^{15}個/cm²を、ビーム電流1 mAで注入すると、約何秒かかりますか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 面積は約707 cm²なので、イオンは約7.1×10^{17}個、電荷は約0.11 Cです。1 mAなら約110秒です。

4. 投影射程（R_p）とは何ですか。注入したイオンの深さの分布は、しばしばどんな形で表されますか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 表面に垂直な方向で測った平均到達深さ（投影射程）です。ガウス近似ではピークの位置と一致します。分布はしばしばガウス分布で表され、広がりをΔR_pで表します。

5. チャネリングとは何ですか。どうやって減らしますか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 結晶の原子の列のすき間の通路にイオンが入り、ぶつかりにくくなって予想外に深く進む現象です。薄い酸化膜を通して注入したり、ウェハを傾けたり（7°が一般的）回転させたりして減らします。完全には消せません。

6. 注入後のアニールの目的を2つ挙げてください。

> **▼ 答えを見る**
>
> 注入による結晶の損傷を治すこと、不純物を結晶の正しい位置に収めて働かせる（活性化する）ことです。電子や正孔の移動度を回復させることも目的です。いずれも、不純物をあまり動かさずに行う必要があります。

7. TED（過渡増速拡散）とは何ですか。なぜ「低い温度のアニールのほうが不純物が動く」ことがあるのですか。

▼ 答えを見る

注入で生じた余分なシリコン原子が、アニール中に放出されて、不純物の拡散を一時的に大きく速める現象です。余分な原子をためた{311}欠陥は低い温度ほど長く残るので、同じ「拡散係数×時間」でも、低い温度のほうが拡散が増えることがあります。

8. SiCでは、なぜウェハを熱しながらイオンを注入するのですか。

▼ 答えを見る

SiCでは注入で生じた結晶の欠陥がアニールで解消されにくく、ウェハを高温（日新イオン機器の装置では最高500 ℃）に保ちながら注入すると欠陥の発生を抑えられるからです。

9. イオン注入装置の世界市場で、シェアの大きい2社はどこですか。

▼ 答えを見る

Axcelis Technologies（51%）とApplied Materials（28%）で、どちらも米国の会社です（経済産業省の資料。年の記載なし）。

12. 用語集

イオン注入
不純物の原子をイオンにして加速し、ウェハに打ち込む方法。

熱拡散
不純物を含む気体の中でウェハを高温に熱し、表面から不純物を拡散させて入れる方法。

不純物（ドーパント）
シリコンに入れて電気の性質を変える原子。ホウ素（p型）、リン・ヒ素（n型）など。

線量（ドーズ）
1 cm²あたりに打ち込む原子の数。

イオン源
ガスや固体から、不純物の原子をイオンにして取り出す部分。

分析マグネット
磁場でイオンの軌道を曲げ、質量の違いで目的のイオンを選ぶ電磁石。

ファラデーカップ
イオンビームの電流を測るためのカップ状の電極。

中電流・高電流・高エネルギー
イオン注入装置の3つの種類。線量とエネルギーの範囲で分ける。

射程（Rp）
表面に垂直な方向の平均到達深さ（投影射程）。ガウス近似ではピークと一致。

ΔRp
深さの分布の広がり（標準偏差）。

核阻止・電子阻止
イオンが原子核との衝突、電子の抵抗によってエネルギーを失うこと。

チャネリング
結晶の原子の列のすき間の通路にイオンが入り、予想外に深く進む現象。

スクリーン酸化膜
チャネリングを減らすため、注入の前に表面に付ける薄い酸化膜。

非晶質（アモルファス）
原子の並びに長い距離の規則性がない状態。

固相エピタキシャル成長（SPE）
非晶質の層が、下の結晶を型にして固体のまま並び直すこと。

活性化
不純物の原子が結晶の正しい位置に収まり、電子や正孔を出せる状態になること。

逆アニール
ある温度範囲で、温度を上げたのにかえって活性化の割合が下がる現象。

格子間原子
結晶の正しい位置ではなく、すき間に入り込んだ原子。

{311}欠陥
余分な格子間原子が集まってできる帯状の欠陥。消えるときに格子間原子を放出する。

過渡増速拡散（TED）
注入で生じた余分な原子が、アニール中に不純物の拡散を一時的に速める現象。

SiC（炭化ケイ素）
ケイ素と炭素の化合物の半導体。パワー半導体に使われる。

高温注入
ウェハを数百℃に熱しながら行うイオン注入。SiCで使われる。

13. 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 #14 ION IMPLANTATION - Chapter 8（p.1〜25）」 — 資料を開く
2. **日本半導体歴史館**「1980年代前半 イオン注入による拡散源形成に移行」 — 資料を開く
3. **日本半導体歴史館**「装置材料 1960年代（1960年代後半 イオン注入装置）」 — 資料を開く
4. **日本半導体歴史館（半導体シニア協会ニューズレター No.53、2007年10月）**「ことはじめ 半導体 高電流イオン注入装置「NV-10」国産化」 — 資料を開く
5. **日本半導体歴史館 志村資料室**「イオン注入装置是非論」 — 資料を開く
6. **W. Shockley（Bell Telephone Laboratories）**「米国特許 US 2,787,564 Forming semiconductive devices by ionic bombardment（1954年10月28日出願、1957年4月2日登録）」 — 資料を開く
7. **Axcelis Technologies**「Form 10-K（2025年12月期、Item 1・Item 1A）」 — 資料を開く
8. **Axcelis Technologies**「Form 8-K Exhibit 99.1 Axcelis Technologies and Veeco Instruments Provide Update on Expected Timing of Merger Closing（2026年11月2日）」 — 資料を開く
9. **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
10. **日新イオン機器**「沿革」 — 資料を開く
11. **飛川和紀ほか（日新イオン機器）**「SiCパワーデバイス用イオン注入装置IMPHEATの開発、日新電機技報 Vol.58 No.2（2013年10月）」 — 資料を開く
12. **日新イオン機器**「2023年の技術と成果（8）イオン注入装置、日新電機技報 Vol.69 No.1（2024年7月）」 — 資料を開く
13. **PubChem（米国国立衛生研究所）**「Periodic Table of Elements（原子量・密度）」 — 資料を開く
14. **Applied Materials**「Form 10-K（2025年10月期、p.80）」 — 資料を開く
15. **P. Timans ほか（Mattson Technology）**「Flat-Top Flash Annealing（AVS JTG、2012年7月18日）」 — 資料を開く
16. **SCREENセミコンダクターソリューションズ**「フラッシュランプアニール装置 LA-3100」 — 資料を開く

14. 主張と出典の対応表

本文の主張	根拠	区分
線量10^{11}〜10^{16}・正確・VT制御・低温・欠点（損傷・TED・帯電）、装置の構成、1〜1000 keV・核と電子で止まる・ガウス分布、Q=√（2π）ΔRpCp、細長い楕円・横の広がり・マスクの厚さ、チャネリング・7°、臨界エネルギー、30 keV Asで25 nm・100面・約1,000個、非晶質化、アニールの4つの目標、SPE 525 ℃、逆アニール、+1モデル・{311}・TED・10万倍超・低温のほうが動く	Stanford EE212 [1]	事実
量は電流の時間積分、深さは質量とエネルギー、中電流（μA）と高電流（mA）、熱拡散の限界と注入の4つの利点、熱処理で回復、NV-10（1979）・住友イートンノバ（1984）・AMAT PI9000（1985）	日本半導体歴史館 [2]	事実
1950年代から研究、1960年代後半に装置、1970年代前半に実用化	日本半導体歴史館 [3]	事実
1972年ごろ中ドーズ・1977年ごろ高ドーズ・1990年代に高エネルギー、Peter Rose・NOVA・NV-10・1号機は日本へ、住友重機械の加速器技術、1983年SEN設立・1984年国産1号機・2006年改称	半導体シニア協会ニューズレター [4]	事実
1968年の国の開発課題、難波・伊藤の2グループ、反対意見	志村資料室 [5]	事実
ショックレーの特許、出願・登録日、請求項（照射とアニール）	米国特許 [6]	事実
約20回の注入・4つのパラメータ、数百eV〜8 MeV・μA〜mA、3種類の装置、売上8.39億ドル・98.2%、Purion、競合、パワー55%、輸出規制・新しい分類番号・乗り換えの危険、レジストは型紙	Axcelis 10-K [7]	事実
合併完了は2027年3月末までの見込み、SAMR、Veecoのレーザーアニール	Axcelis 8-K [8]	事実
イオン注入装置2,993億円・Axcelis 51%・AMAT 28%・残りの色分け、熱処理装置3,407億円・TEL 42%・AMAT 28%・NAURA 8%	経済産業省 [9]	事実
1973年HVEE・1974年生産開始・1999年設立・2010年IMPHEAT	日新イオン機器 [10]	事実
SiCは欠陥が解消されにくく高温で注入、室温〜500 ℃、320 kV・3価で960 keV、高温の静電チャック、PF_3のアシスト	日新電機技報2013 [11]	事実
3本柱、FPD第6世代で100%（同社）、AIの線量10^{15}の桁、固体AIと塩素の新しいイオン源で40〜60%増、生産性の要求	日新電機技報2024 [12]	事実
原子量、シリコンの密度	PubChem [13]	事実
半導体装置の部門にイオン注入	AMAT 10-K [14]	事実

本文の主張	根拠	区分
拡散・活性化・修復のバランス、ミリ秒は短すぎることも	Mattson [15]	事実
数ミリ秒の光、少ない熱の予算で高い活性化	SCREEN [16]	事実
10 keVでの速さ、40 keV・0.5 Tでの半径、同位体で約5%、960＝320×3、線量と時間、シリコン原子$5.0\times10^{22}/cm^3$・ピークは約250分の1、2社で79%	本稿の計算	本稿の計算
合併の見方	本稿の推測	推測

最終更新：2026年11月8日／技術は大学の講義資料（Stanford）、特許、日本半導体歴史館、物性値はPubChem、企業の情報は各社の年次報告書・臨時報告書（米国SEC提出書類）・技術報告・沿革、会社別のシェアは経済産業省を出典としています。「世界初」「シェア100%」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。