

ドーピング：イオン注入とアニール

とても純粋なシリコンは電気をほとんど通しません。チップに必要なのは「この小さな領域は電気を通し、となりは通さない」ことなので、ほかの原子をほんの少し、正しい場所に正しい深さで入れなければなりません。

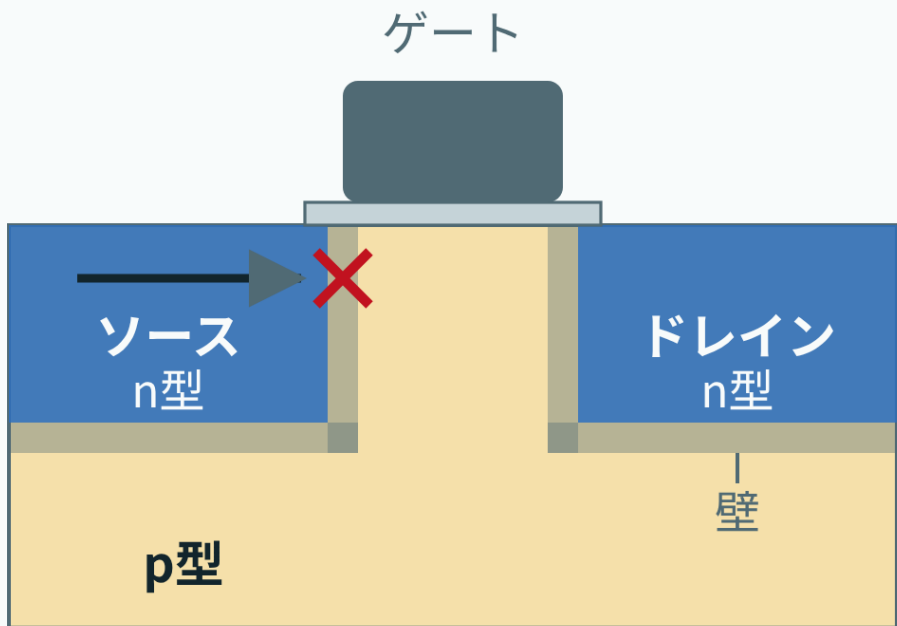
半導体入門講座：チップの一生をたどる

授業や非営利の目的なら無料で使えます。fab24hr と明記してください。販売することや、自分の作品として使うことはできません。

わかること

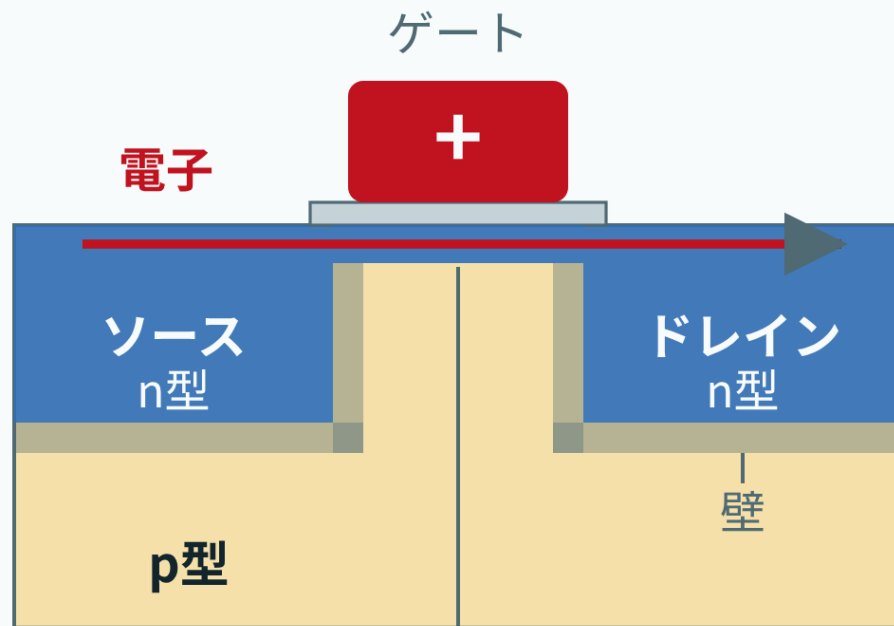
- 1 純粋なシリコンがなぜほとんど電気を通さないのか、n型とp型は何が違うのか、nとpをどう並べるとスイッチがふだんオフで、ゲートに電圧をかけたときだけオンになるのかを説明できる。
- 2 イオン注入装置がどうやって原子をシリコンに打ち込むのか、エネルギーとドーズがそれぞれ何を決めるのか、打たない場所をレジストでどう守るのかを説明できる。
- 3 打ったあとなぜアニールするのか、打ち間違いはなぜ救えないのか、なぜ打つ前に照合し、打ったあとにシート抵抗を測るのかを説明できる。

ふだん：オフ



n・p・nが背中合わせで、
どちらかの壁がせき止める

ゲートに電圧：オン



反転層：n型の橋
電子が表面に引き寄せられる

もう1種類はnとpを入れ替えた並び（p・n・p）で、ゲートの電圧が低いときだけオン

この橋をかけるのに必要な電圧が、しきい値電圧（ V_{th} ）です。下のp型を多くドーピングするほど、しきい値は高くなります（簡略化した断面、縮尺は正確ではありません）。

一歩ずつ

1 シリコンにリンやホウ素をほんの少し加える（ドーピング）。

なぜ：純粋なシリコンの電子はほとんどバンドギャップを越えられないので電気をほぼ通さず、リンで動ける電子が増え（n型）、ホウ素で空席ができます（p型）。

しないと：ドーピングしなければシリコンはほとんど電気を通さず、スイッチになりません。加えても $n \cdot p \cdot n$ のように逆の型を並べなければ、入口と出口がいつもつながっていて、スイッチを切れません。

2 先にレジストで打たない所を覆い、開口だけを残す。

なぜ：打つのは一部の小さな領域だけで、レジストに当たったイオンはその中で止まり、シリコンに入りません。

しないと：ビームはウェーハ全体を走査するので、覆わなければ打ってはいけない所にも入ります。

3 原子をイオンにし、電界で加速してシリコンに打ち込む（イオン注入）。

なぜ：打ち込みには高温がいらないのでレジストが耐えられ、量も深さも正確に決められます。

しないと：昔のように高温の炉で原子をしみこませる方法では、レジストがその温度に耐えられません。

一歩ずつ

4 エネルギーとドーズを決める。エネルギーは深さ、ドーズは量を決める。

なぜ：強く加速するほど深く入り、小さな面積あたりの数が多いほど、その部分は電気を通しやすくなります。

しないと：エネルギーを誤れば深さが違い、ドーズを誤れば通り方が違い、原子を誤れば n 型と p 型が逆になることもあります。

5 打ったあと一度加熱する（アニール）。

なぜ：イオン 1 個が進むあいだに千個を超えるシリコン原子をはじき出すこともあり、打った原子の多くも違う場所にはさまって、まだ電気を通しません。

しないと：足りなければ十分に通さず、長すぎると原子が横や奥へ動いて形がぼやけます。

6 装置に入れる前に、原子・エネルギー・ドーズをひとつずつ照合する。

なぜ：打ち間違えても見た目は同じで、計測や、ウェーハができあがってからの電気テスト（トランジスタが何ボルトでオンになるか、どれだけリークするか）まで気づかないことが多いからです。

しないと：入った原子は拾い出せず、たいていは止めて評価し、使えなければスクラップです。

一歩ずつ

7 定期的にモニターウェーハ（出荷せず装置の確認に使うウェーハ）を打ち、アニール後にシート抵抗を測る。

なぜ：原子は見えないので、その層の電気の通しやすさを測ります。装置自身の数え方もずれることがあります。

しないと：電流を測る部分がずれると、装置はずれた数字で止まり、ちょうど打てたと思い込みます。モニターウェーハがなければ、だれも気づきません。

何を調整し、何に気をつけるか

原子の種類

変わるもの：リン（またはヒ素）を入れると n 型、ホウ素を入れると p 型になります。

ずれると：原子を間違えると、n 型と p 型が逆になることさえあります。

エネルギー

変わるもの：どこまで深く入るかを決めます。よく使う深さは、だいたい 10 ナノメートルから 1 マイクロメートルです。

ずれると：エネルギーを間違えると、原子が違う深さで止まります。

ドーズ

変わるもの：1 平方センチあたりに入れる原子の数で、約 1000 億個から 1 京個まであり、多いほど電気を通しやすくなります。

ずれると：ドーズを間違えると電気の通り方が変わり、スイッチのしきい値やリークもずれます。

何を調整し、何に気をつけるか

アニールの温度と時間

変わるもの：乱れたシリコンを並び直させ、打ち込んだ原子を席に着かせて、電気を通すようにします。

ずれると：足りないと席に着く原子が少なく電気が通りにくく、長すぎると原子が横や奥へ動いて形がぼやけます。

純粋なシリコンはほとんど通さない、少し加えると n 型や p 型に

シリコン原子のいちばん外側の 4 つの電子は 4 本の手のように、それぞれとなりの原子とつながっていて動けません。動くには、まずバンドギャップと呼ぶ段差を飛び越えなければなりません。金属にはこの段差がなく、ガラスはとても高く、シリコンは高すぎも低すぎもせず、室温で飛び越えるのはシリコン原子数兆個に 1 個くらいです。だから純粋なシリコンはほとんど電気を通しません。ほかの原子をわざとごく少し加えることをドーピングといいます。外側の電子が 5 つのリンを加えると、ゆるくしかつかまっていない電子が 1 つ余って動きやすく、n 型になります。3 つしかないホウ素を加えると空席（正孔）ができ、となりの電子が次々に詰めると空席が動くように見え、p 型になります。

n ・ p ・ n の背中合わせ：スイッチはふだんオフ

よくある種類のトランジスタでは、ソースとドレインが n 型、真ん中の下が p 型です。n と p の境目では電流は一方向にしか通らず、逆に押すと壁のようなものにせき止められます。ソースからドレインへは背中合わせの 2 つの境目を通るので、どちら向きに押しても片方の壁にせき止められ、スイッチはふだんオフです。ゲートにプラスの電圧をかけると、絶縁膜ごしに p 型シリコンの表面へ電子が引き寄せられ、表面の薄い層が n 型のようにふるまって一時的な橋になり、電流が通ります。電圧を外すと橋は消えます。この橋をかけるのに必要な電圧がしきい値電圧で、下の p 型を多くドーピングするほど高くなります。

もう 1 種類は逆、だからウェルが 2 つ、注入は何回も

もう 1 種類のトランジスタは n と p を入れ替えた $p \cdot n \cdot p$ の並びで、ゲートの電圧が低いときだけオンになります。チップではたいてい 2 種類を組にし、片方が出力を電源に、もう片方がグラウンドにつながります。これが CMOS です。だから同じシリコンの上に、p 型と n 型の 2 種類の「土台」、ウェルが要ります。2 つのウェル、しきい値を合わせる層、2 種類それぞれのソースとドレインは、別々に打ちます。場所を変えるたびに、たいてい先にリソグラフィでレジストに新しい型紙を焼き付けます。レジストに当たったイオンはその中で止まり、開口部のものだけがシリコンに入ります。覆わなければウェーハ全体が変わってしまいます。だから 1 つのプロセスフローで、注入は 10 回ほど、あるいはそれ以上になります。

装置の中：電気を運びさせ、加速し、数えながら打つ

ホウ素やリンを含むガスを、まずイオン源で電気を運びたイオンにします。電気を運びてはじめて、電界で押せるからです。電界で加速して細いビームにし、通り道は真空にして、イオンが空気にぶつからないようにします。ビームはウェーハ全体を走査します。イオンは電気を帯びているので、飛んでくるイオンは電流です。装置はこれを測って時間を掛け、どれだけ入ったかを知り、十分になったら止めます。エネルギーは深さを決め、ドーズは小さな面積ごとに入れる原子の数で、多いほど電気を通しやすくなります。レジストでふさげるのは、イオン注入に高温がいらないからです。昔は高温の炉で原子を自然にしみこませていて、レジストは耐えられませんでした。炉のエリアを今も「拡散」と呼ぶ工場が多いのは、そのなごりです。

打ったらアニール、熱はちょうどよく

シリコンに飛びこんだイオンは1個で千個を超えるシリコン原子をはじき飛ばすこともあり、打ったあとの層はぐちゃぐちゃで、打ち込んだ原子の多くも違う場所にはさまって、まだ電気を通しません。だからアニールします。加熱するとシリコンがきれいな並びに戻り、原子がシリコン原子の席に座って、ようやく電気を通しはじめます。ただ、長く熱するほど原子は横や奥へも動いて形がぼやけ、構造が小さいほど耐えられません。そこで多くは1枚ずつ数秒だけ加熱する方法に変わり、拡散炉で1バッチまとめて焼くものも残っています。そのあとの加熱は、酸化も成膜も含めて、どれも原子を少しずつ動かします。この勘定が熱履歴（サーマルバジェット）で、最初から最後まで通して組み立てます。

打ち間違いは取り出せない：打つ前に照合、打ったあとに測定

打ち込んだ原子は取り出せません。リソグラフィなら焼き付けがずれてもはがして焼き直せますが、イオン注入にはその逃げ道がなく、打ち間違えたウェーハも見た目はまったく同じです。下のかたまりに入れすぎるとしきい値が上がってスイッチが遅くなり、少なすぎるときっちり閉じずにリークします。計測や電気テストまで気づかないことも多く、たいていは止めて評価し、使えなければスクラップです。だからいちばん大事な確認は打つ前で、原子、エネルギー、ドーズをひとつずつ照合します。打ったあとは、モニターウェーハ（出荷せず、装置の確認に使うウェーハ）を決まった間隔で打ち、アニール後にシート抵抗を測って、その層がどれだけ電気を通すかを見ます。装置自身が数える電流もずれることがあるので、両方を見ます。

よくある誤解

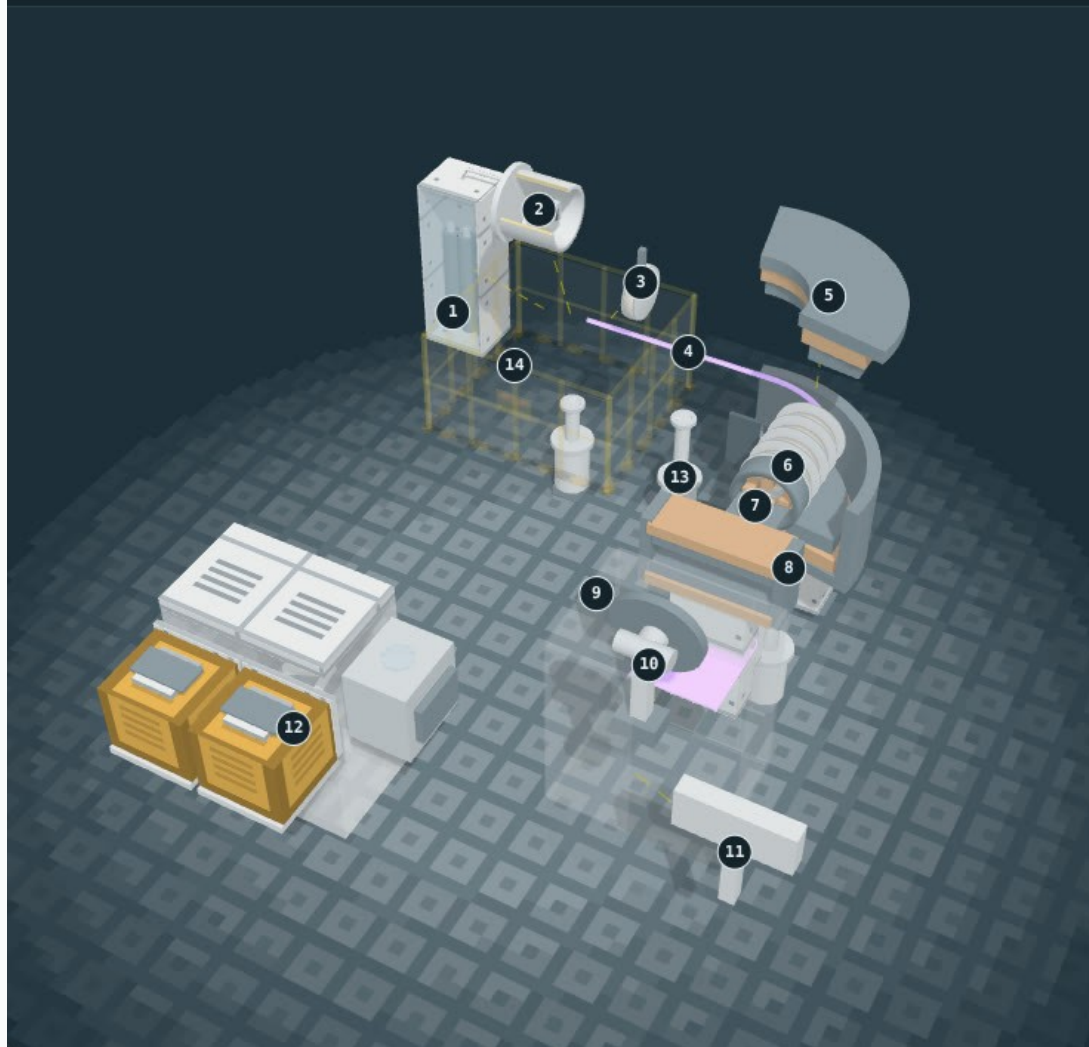
よく聞く：チップのシリコンは純粋なほどよく、ほかの原子が入ったら汚染だ。

実は：シリコンはたしかに、まずとても純粋にします。金属の不純物は10億分の1ほどまで減らします。でも純粋なシリコンはほとんど電気を通さず、スイッチになりません。だから、いらないものを取り除いたあとで、必要な原子をほんの少し、決めた場所にわざと加えます。外から来た原子であることは同じで、違いは、それが必要な種類か、どこに、どれだけ入っているかです。

よく聞く：打ったあとに測って、間違っていたら直せばいい。

実は：原子は見えないので、ふつうはシート抵抗、つまりその層がどれだけ電気を通すかを測ります。少なければ高めに、多ければ低めに但ますが、アニールで原子を働かせてからでないと正しく測れません。ずれていても原子は取り出せず、たいていは止めて使えるかを評価し、使えなければスクラップです。計測は装置が少しずつずれていくを見つけるためのもので、間違いを本当に止めるのは打つ前の照合です。

IMPLANT・イオン注入
イオン注入装置



IMPLANT・イオン注入

イオン注入装置

- | | |
|---|---|
| ① ガスキャビネット
gas cabinet | ② イオン源
ion source / arc chamber |
| ③ 引き出し電極
extraction electrodes | ④ イオンビーム
ion beam |
| ⑤ 分析マグネット
analyzer magnet / resolving slit | ⑥ 加速と集束
acceleration column / lens |
| ⑦ ビームスキャナー
beam scanner | ⑧ 平行化レンズ
parallel lens / corrector |
| ⑨ 注入室
end station / process chamber | ⑩ ウェーハ+傾斜ステー
ジ
wafer / tilting platen |
| ⑪ ファラデーカップ
Faraday cup | ⑫ ウェーハの出し入れ
load lock / robot / FOUP |
| ⑬ 真空ポンプ
vacuum pumps | ⑭ 高電圧の隔離フェンス
high-voltage enclosure |

公開資料をもとに、AIの助けを借りて作った一般的な模式図です。
比率も部品も簡略化していて、誤りがあるかもしれません。特定の
会社の装置を表すものではありません。

fab24hr.com/teach

授業・非営利なら無料で使えます。fab24hrと明記してください

遊ぶ

イオン注入のプロセスエンジニアとして1シフト遊ぶ：原子、エネルギー、ドーズはあなたの担当

スマホで読み取って、ここから遊ぶ

fab24hr.com/ja/?job=pim&utm_source=slides



考える

- 1 打ち間違えたウェーハは見た目がまったく同じで、ずっとあとまで気づかれないことがあります。ロットを入れる前に1行ずつ照合するのがあなただとしたら、見落とさないためにどんな工夫をしますか？誰にもう一度見てもらうべきでしょう？
- 2 アニールは十分に熱する必要があるけれど、長すぎてもいけません。「少し多めのほうが安心」と「やりすぎると逆に悪い」が両方成り立つとき、どこで止めるかをどう決めますか？

必読

ドーピングとは？ n 型と p 型で「ふだんはオフ」のスイッチをつくるしくみ

fab24hr.com/ja/blog/what-is-doping/

イオン注入とは？ 半導体工場はどうやって原子をシリコンに打ち込むのか

fab24hr.com/ja/blog/ion-implant/

半導体入門講座：チップの一生をたどる

<https://fab24hr.com/ja/learn/doping/>

公開されている教科書、業界の標準、大学の講義資料、論文をもとにまとめました。ゲームに出てくる会社、人物、装置の番号、数字は架空のものです。

授業や非営利の目的なら無料で使えます。fab24hrと明記してください。販売することや、自分の作品として使うことはできません。

公開資料をもとに AI の助けで作った一般的な模式図。誤りがあるかもしれません。特定の会社の装置ではありません