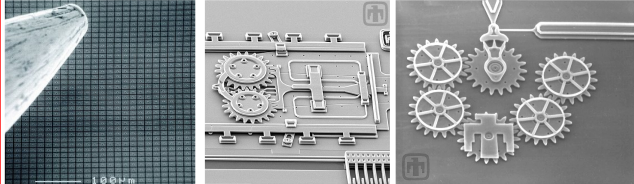


前回の復習:

マイクロエレクトロメカニカルシステム(MEMS):

集積回路製造のフォトリソグラフィとエッチング技術が高度に発達したので、機械部品(センサー、アクチュエータ、電子回路等)を一つのシリコン基板上に集積した微小機械製作(マイクロマシニング)ができるようになった。

例えば、圧力センサー、圧電抵抗加速度センサー、静電マイクロモーター、DLP(Digital Light Processing)、インクジェットヘッド等を作ることができる。



前回の復習: 不純物ドーピング:

半導体の電気的性質(n 型、 p 型)を変える場合に、半導体基板にドナー又はアクセプタの不純物ドーピングを行う。不純物ドーピングの方法には、熱拡散法とイオン注入法がある。

不純物導入の目的	不純物導入の方法	不純物導入の目的
pn接合の形成	バイポーラ LSI	アイソレーション領域 コレクタ埋込み領域 ベース領域 エミッタ領域 など
抵抗の形成	CMOS LSI	ウェル形成 ソース/ドレイン形成
不純物濃度制御	シリコン ポリシリコン	pn 接合による抵抗 不純物制御による抵抗値制御
導電性の向上	チャネルストップ (フィールドドープ)	反転層形成の防止
分離層の形成	バイポーラトランジスタの特性向上 (反転層の防止)	チャネルドープ (しきい値電圧 $-V_{th}$ 制御)
ウェル分離	ポリシリコンへの不純物導入 (ゲート、配線、キャパシタ電極)	SIMOX における酸欠の深い付込み
ゲッタリング	水素 イオンの注入によるウェルハの分離	水素 イオンの注入によるウェルハのダメージ層導入

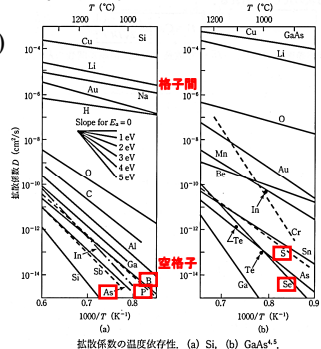
前回の復習: 熱拡散法の拡散方程式:

熱拡散法では、不純物は結晶の空格子点や格子間位置を通して結晶中を拡散する。どちらの拡散なのかはフィック(Fick)の方程式の拡散係数 D からわかる。

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2}, \quad (9.3)$$

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right), \quad (9.4)$$

活性化エネルギー E_a は、格子間拡散では隣の格子間位置に移る時の障壁の高さである(0.5~2eV)。空格子拡散では移り先のSiを押し除けて空格子を形成するのに必要なエネルギーである(3~5eV)。



前回の復習: 熱拡散法での不純物濃度分布 $C(x, t)$:

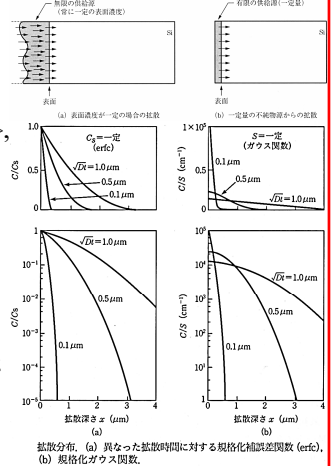
表面濃度一定の場合:

$$C(x, t) = C_s \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{2Dt}} \right) \right\}$$

総量一定の場合:

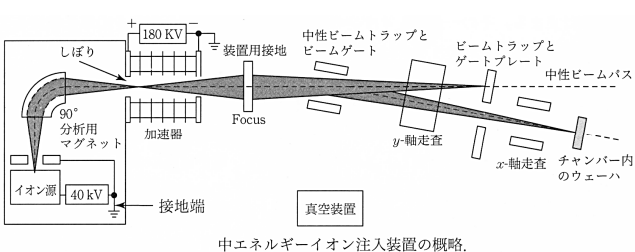
$$C(x, t) = \frac{Q_s}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$$

最初に少量だけ表面濃度一定で拡散させ(ブレデポジションという)、次に総量一定で拡散させて(押し込み、またはドライブイン)、不純物濃度分布を調整する方法を2段階拡散という。



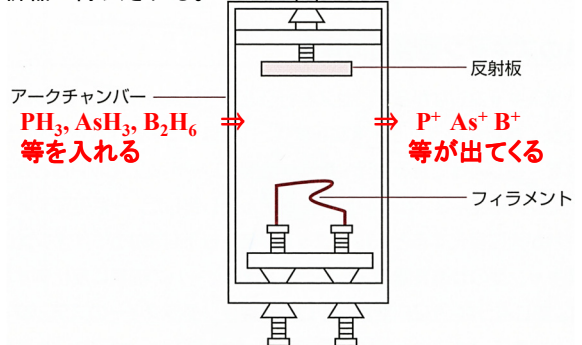
イオン注入法:

不純物をイオン化して、数~数百kVで加速して基板に打ち込み不純物ドーピングを行う。熱拡散法よりも低温で不純物拡散が出来るのでフォトリソがマスクとしてそのまま使える。また、広範囲で精度良くドーピング量を変えられ、マスク下への拡散も少ない。



中エネルギーイオン注入装置の概略。

イオン源: 加熱した螺旋フィラメントから出る熱電子と、熱電子が反射板に当たって出る2次電子で原料ガス(不純物の水素化物)をイオン化する。多価イオン等は後段の質量分析器で除去される。



質量分析器: イオンは抽出電圧 V 高電圧部

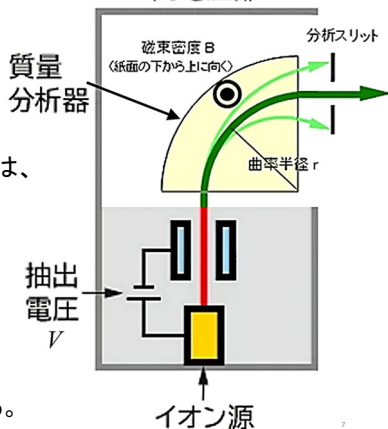
で加速された後、磁束密度 B により曲率半径 r の円弧に沿って曲げられる。イオンの質量と電荷を m, q とすると、イオンの速度 v は、

$$\frac{mv^2}{2} = qV, v = \sqrt{\frac{2qV}{m}},$$

となるので、 r は、

$$qvB = m \frac{v^2}{r}, r = \frac{mv}{qB}$$

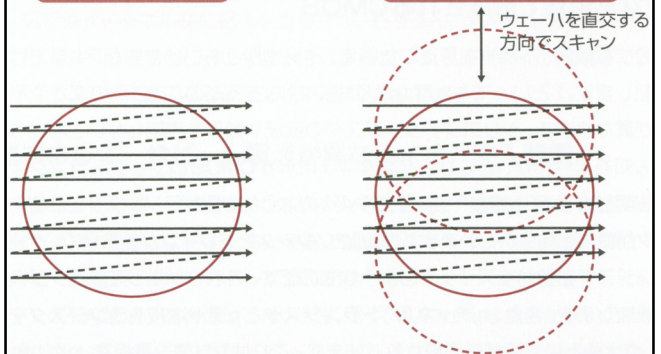
$$= \frac{1}{B} \sqrt{2mV/q}, \text{ となる。}$$



イオンビームの走査: イオンビーム径はウェハ径より小さいので、ウェハ全体を走査する。ハイブリッドスキャンの方が打ち込みムラが小さいので良く使われる。

(a) ラスタースキャン

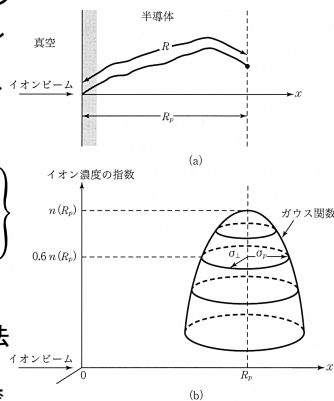
(b) ハイブリッドスキャン



イオンの分布: 不純物イオンは、原子核や電子と繰り返し衝突して深さ R_p (飛影距離)で止まる。その時のイオン分布 $n(x)$ は、

$$n(x) = \frac{Q_s}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \exp \left\{ -\frac{(x - R_p)^2}{2\sigma_p^2} \right\}$$

(10.1)となる。 Q_s は単位面積当たりのドーズ量(不純物総量)である。これは、熱拡散法の総量一定の場合と同じ形をしているが、中心が表面ではなく、基板内部($x=R_p$)にある。



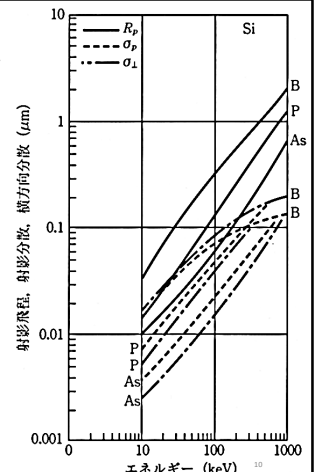
打ち込まれた不純物イオンは、横(表面平行)方向にも分散 σ_{\perp}^2 で広がるが、熱拡散法での横方向の広がりよりは小さい。

また、打ち込み深さに相当する射影飛程 R_p と分散 σ は注入イオンエネルギーに依存する(右図)。

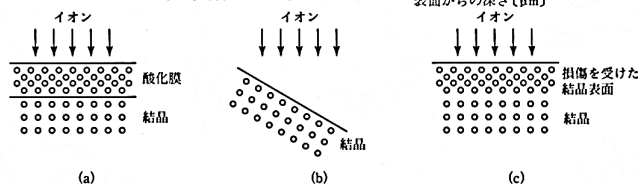
また、不純物総量 Q_s は、Siウェハに流れ込むイオンビーム電流 I_i と打ち込み時間 t に比例する。

$$Q_s = \frac{I_i t}{q}, \quad (10.2)$$

(q : イオンの電荷)



チャネリング効果: イオンが原子列の間を通り抜けて、原子核と衝突せずに深く入ることをチャネリング効果という。これを防ぐため、表面に非晶質や損傷層を付けるか、結晶を主方位から 10° 程度傾ける。



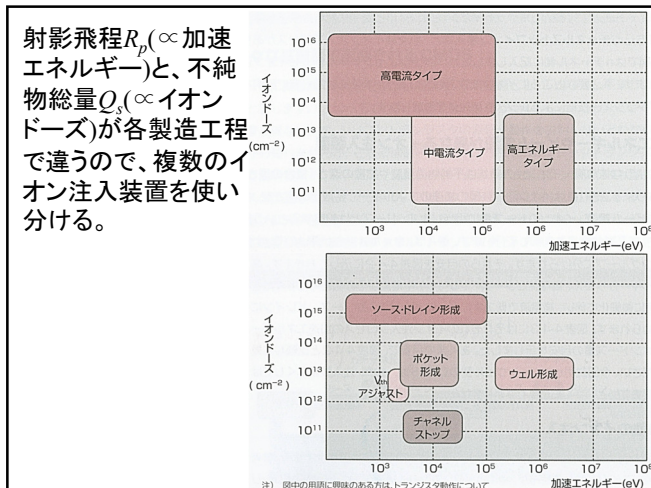
(a) アモルファス酸化膜を通しての注入, (b) ビーム角度を総ての結晶軸からずらす方法, (c) 表面に予め損傷を入れて置く方法。

プリアモルファス化(pre-amorphization):

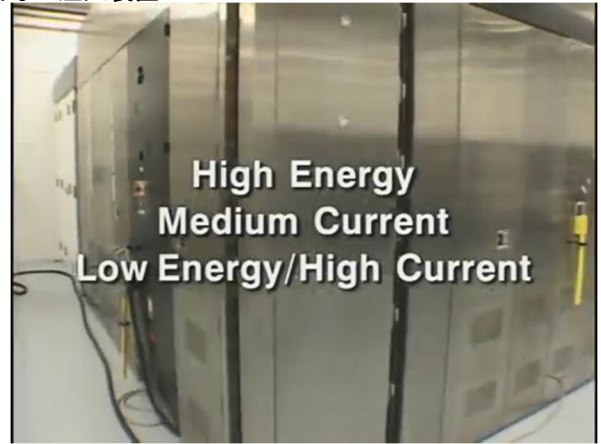
チャネリング効果を抑制するため、不純物のイオン注入前に、GeやSi原子をSiウェハ表面に注入して予め結晶構造を壊して非晶質化(アモルファス化)しておく。

Co-Implantation:

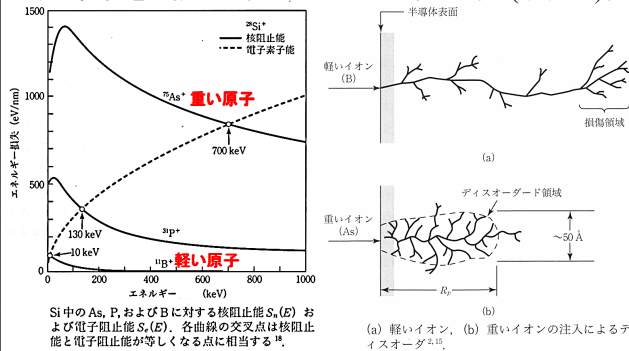
ボロンと同時に少量の窒素や炭素もイオン注入すると、過剰に導入された窒素原子と炭素原子が格子間に入り、熱処理時のボロンの熱拡散を抑制できる。またフッ素を同時にイオン注入した場合は、ボロンの熱拡散が促進される。



イオン注入装置:



イオン注入による損傷: 軽い(重い)原子は、電子(核)阻止能が大きい。イオン注入は基板に多くの損傷(格子欠陥)を残すので、アニール(熱処理)して基板の損傷を取り除きつつ、不純物をSi格子位置に入れこむ必要がある(活性化)。



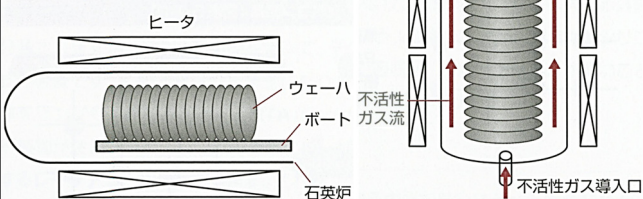
イオン注入後のアニール: パッチ式電気炉と瞬時ランプ(RTP: Rapid Thermal Processing)による方法がある。

要素	電気炉	RTP
プロセス	パッチ	1枚ウェーハ
炉	ホットウォール	コールドウォール
昇温速度	低	高
サイクル時間	高	低
温度モニター	炉	ウェーハ
熱経費	高	低
パーティクル問題	有	少
均一性と再現性	高	低
スループット	高	低

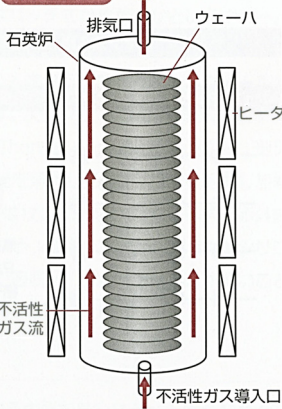
パッチ式電気炉:

不活性ガス雰囲気中にてウェーハを600~800℃で数十分間加熱する。一度に大量のウェーハを処理できるが、一回の処理に時間がかかり、その間に不純物が多少熱拡散してしまう。

(a) 横型炉

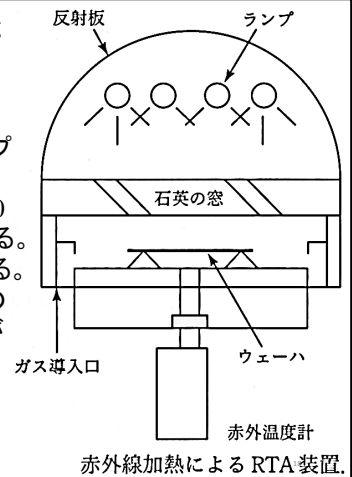


(b) 縦型炉



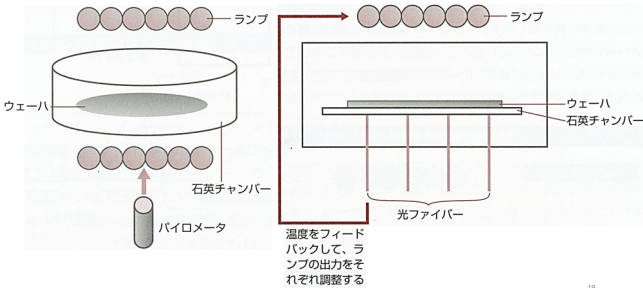
Rapid Thermal Processing (RTP):

Rapid Thermal Annealing (RTA)ともいう。不活性ガス雰囲気中で、ハロゲンランプや赤外線レーザーによってウェーハを一枚ずつ600~1000℃でナノ秒~数秒間加熱する。熱拡散を抑えることができる。しかし、急激な加熱・冷却のためウェーハ内に熱傾斜が起こり、新たな格子欠陥が導入されることもある。



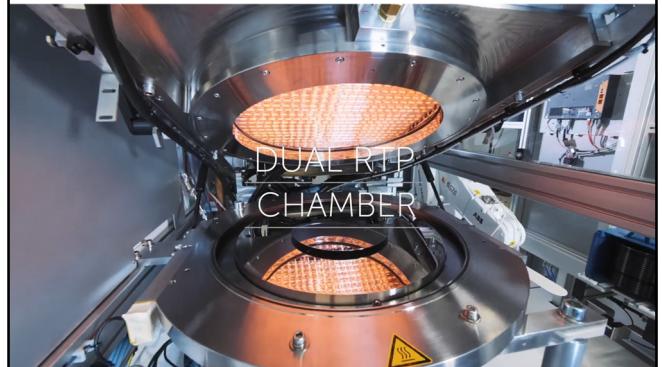
両面加熱方式と片面加熱方式:

ウェハー面内に温度のバラつきがあると新たな格子欠陥が導入されてしまうので、片面加熱で裏面から各箇所の温度を測定して加熱ランプの出力を調整する方式もある。



19

RTP装置:



20

Rapid thermal oxidation (RTO):

RTPでSiウェハーを1150°C程度に加熱しながら酸素ガスを導入すると、数~十数nmの薄い酸化膜を成膜することができる。加熱時間を短くできるので成膜中の不純物拡散を抑えられる。

In situ steam generation (ISSG):

RTP装置内を数百 [Pa]程度に減圧して、水素と酸素の混合ガスを導入すると、Siウェハー上で水素と酸素が反応して水が生成されると同時に酸化膜も成膜される。RTOよりも成膜速度が速い(ウェット酸化)。

21

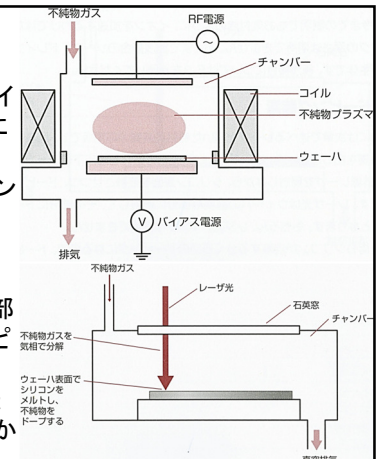
その他のドーピング装置

プラズマドーピング装置:

不純物ガスをプラズマでイオン化して、ウェハ表面に打ち込む。装置が簡便だが、表面付近へのドーピングしかできない。

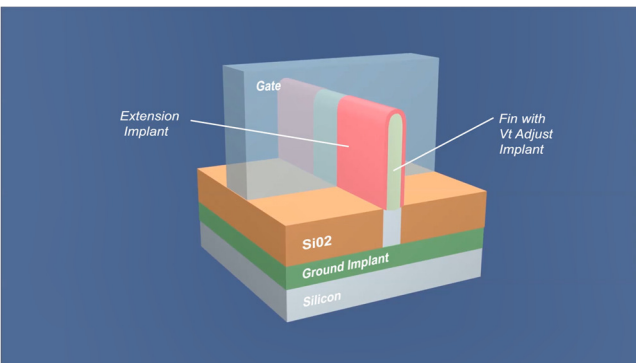
レーザードーピング装置:

紫外線レーザー光をウェハのドーピングさせたい部分に照射し加熱してドーピングする。レジストがマスクとして使用できない。表面付近へのドーピングしかできない。



22

FIN-FETのドーピング: 3次元構造の側面にドーピングするので、一カ所に対して複数回のイオン注入が必要になる。

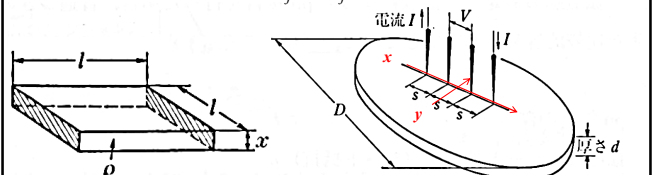


23

不純物拡散後のシート抵抗 ρ_s の評価:

4端子法を使って測定する。(補足1参照)

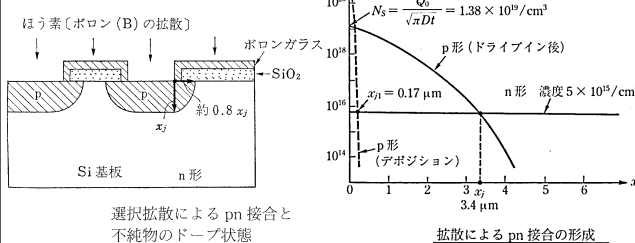
$$\rho_s = \frac{\rho l}{l x_j} = \frac{\rho}{x_j} = \frac{V \pi}{I \ln 2},$$



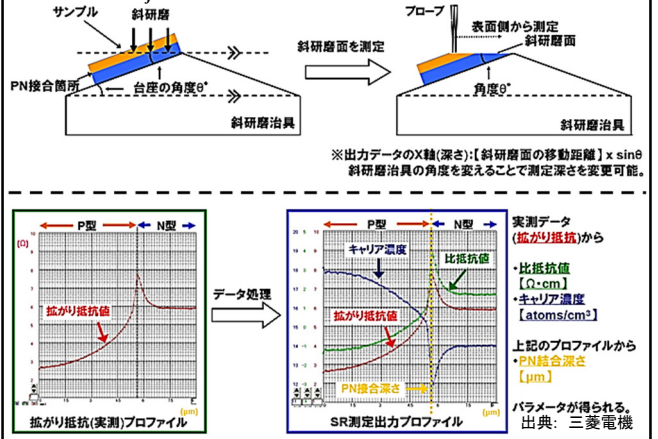
(a) シート抵抗 $\rho_s = \rho/x$ (b) 四探針法 (間隔sの4本の探針を立て、両端の針の間に電流を流し、内側の針の間の電位を測定する)

24

不純物拡散によるpn接合の形成: 集積回路内に不純物拡散でpn接合を形成する場合を考えてみる。例えばn型Si基板にp型不純物を拡散させる様な場合には、基板表面近傍はp型不純物の方が高濃度だが、基板奥の方は、n型不純物の方が高濃度となる。その場合には、n型とp型の不純物濃度が等しい点 x_j がpn接合の接合点となる。

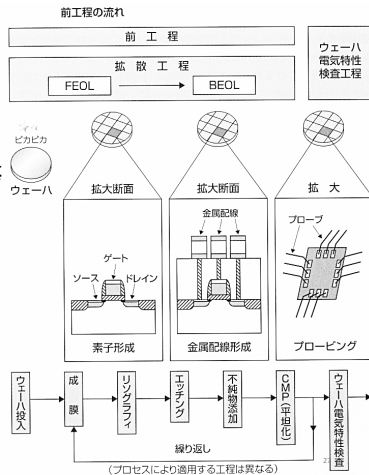


接合点深さ x_j の評価: 拡がり抵抗測定(4端子法)

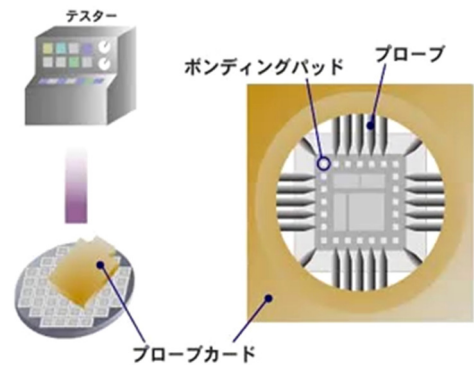


前工程: 集積回路の製造工程には、前工程と後工程がある。これまでに学習した成膜やフォトリソグラフィーやエッチングや不純物ドーピング等のSiウェハー上に電子回路を作り込むための製造工程は、すべて前工程にあたる。

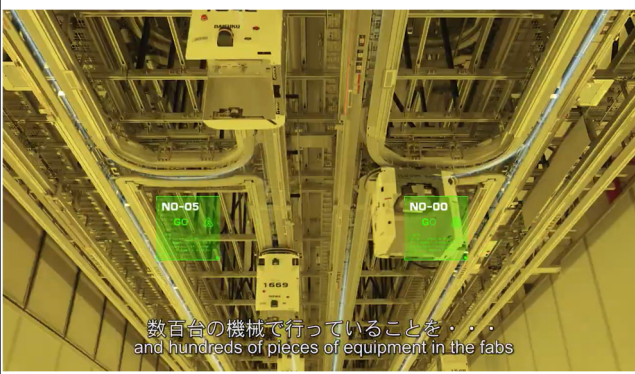
また、前工程の中でも素子形成工程をFront End Of Line、配線形成工程をBack End Of Lineという。



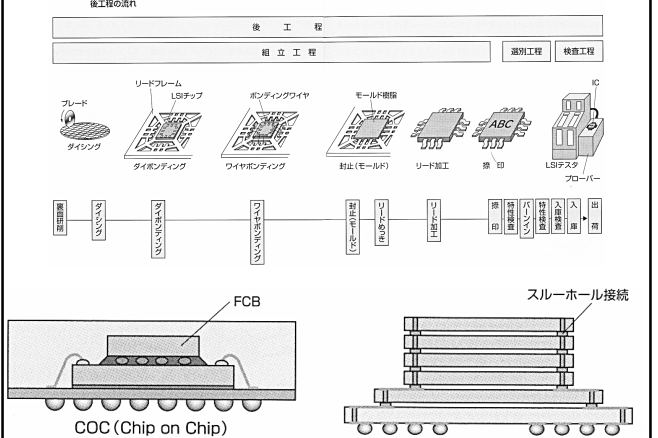
前工程後のウェハー検査:



工場内自動搬送システム AMHS (Automated Material Handling Systems): 発塵・振動・騒音を抑えるため、自動化(無人化)したリニアモーターの天井搬送システムが一般的。



次回の予告: 後工程、3次元積層チップ



(補足1) **2次元**の原点にある点電荷 q が位置 (r, θ) につくる電位 ϕ は、
$$\phi = -\frac{q \ln r}{4\pi\epsilon_0}, \quad \vec{\nabla} \phi = -\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r},$$

となる。この電位 ϕ は実際に2次元のラプラス方程式を満たしている。

$$\begin{aligned} \nabla^2 \phi &= \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \phi = \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right\} \phi \\ &= \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) \right\} \phi = \frac{-q}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r}{r} \right) \right\} = 0, \quad (r \neq 0) \end{aligned}$$

従って、4端子法の外側の2つの電流端子の接点の位置 $(\pm 3S/2, 0)$ に仮想的に電荷 $\pm q$ が貯まっているとすると、位置 (x, y) での電位 ϕ は、

$$\phi = \frac{-q}{4\pi\epsilon_0} \left(\ln \sqrt{(x-3S/2)^2 + y^2} - \ln \sqrt{(x+3S/2)^2 + y^2} \right),$$

33

となる。よって、内側の2つの電圧端子 $(\pm S/2, 0)$ の間にかかる電圧 V は、
$$V = \frac{-q}{4\pi\epsilon_0} \{ \ln S - \ln 2S - (\ln 2S - \ln S) \}$$

$$= \frac{2q}{4\pi\epsilon_0} (\ln 2S - \ln S) = \frac{q \ln 2}{2\pi\epsilon_0},$$

となる。また、内側の電圧端子に掛かっている電圧 V が上記で表される時に、外側の電流端子間に流れる電流 I は、4端子の真ん中の線 $(x=0)$ を横切る電流密度 i を y 方向に $-\infty$ から $+\infty$ まで積分すれば良い。この電流密度は、 $x=0$ の線上にある微小領域を考えると、

$$i \Delta y = \frac{\Delta V}{R} = \left(\frac{d\phi}{dx} \Delta x \right) \cdot \left(\frac{x_j \Delta y}{\rho \Delta x} \right) = \frac{\Delta y}{\rho_s} \frac{d\phi}{dx},$$



(ΔV : 微小領域での電圧降下, R : 微小領域の抵抗)
(ρ : 材料の抵抗率, ρ_s : シート抵抗 $\equiv \rho / x_j$)

34

となるので、電流 I は、
$$I = \int_{-\infty}^{\infty} i dy = \frac{1}{\rho_s} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\phi}{dx} dy,$$

となる。これに、先程の電位 ϕ を代入すると、

$$\left(\phi = \frac{-q}{4\pi\epsilon_0} \left(\ln \sqrt{(x-3S/2)^2 + y^2} - \ln \sqrt{(x+3S/2)^2 + y^2} \right) \right),$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{x=0} &= \frac{-q}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{(x-3S/2)}{(x-3S/2)^2 + y^2} - \frac{(x+3S/2)}{(x+3S/2)^2 + y^2} \right\} \Big|_{x=0} \\ &= \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{3S/2}{(3S/2)^2 + y^2} \right), \quad \left(\int_0^{\infty} \frac{a}{a^2 + y^2} dy = \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned}$$

$$I = \frac{1}{\rho_s} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\phi}{dx} dy = \frac{q}{\pi\epsilon_0 \rho_s} \int_0^{\infty} \frac{3S/2}{(3S/2)^2 + y^2} dy = \frac{q}{2\epsilon_0 \rho_s},$$

となる。

35

従って、シート抵抗は、

$$\begin{aligned} \left(I = \frac{q}{2\epsilon_0 \rho_s}, \quad V = \frac{q \ln 2}{2\pi\epsilon_0} \right) \\ \rho_s = \frac{q}{2\epsilon_0 I} = \frac{\pi V}{I \ln 2} \cong 4.53 \frac{V}{I}, \end{aligned}$$

となる。

他にも Van der Pauw 法等で求めるやり方もある。

36