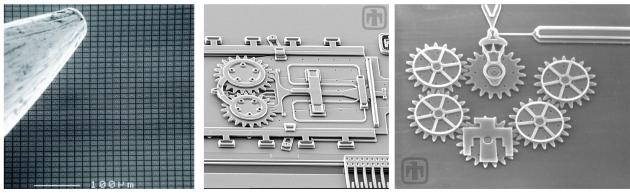


### 前回の復習:

#### マイクロエレクトロメカニカルシステム(MEMS):

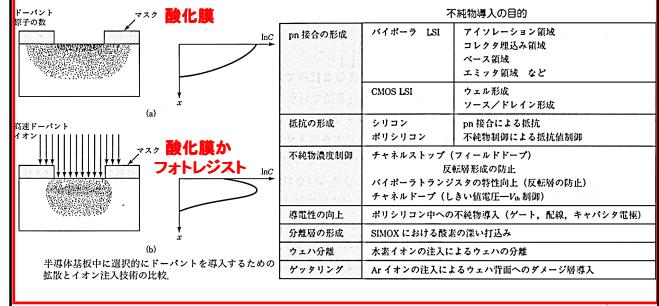
集積回路製造のフォトリソグラフィーとエッチング技術が高度に発達したので、機械部品(センサー、アクチュエータ、電子回路等)を一つのシリコン基板上に集積した微小機械製作(マイクロマシニング)ができる様になった。

例えば、圧力センサー、ピエゾ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。



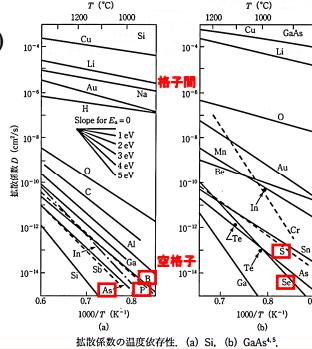
### 前回の復習: 热拡散法の拡散方程式:

热拡散法では、不純物は結晶の空格子点や格子間位置を通っ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を押しの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: 热拡散法での不純物濃度分布 $C(x,t)$ :

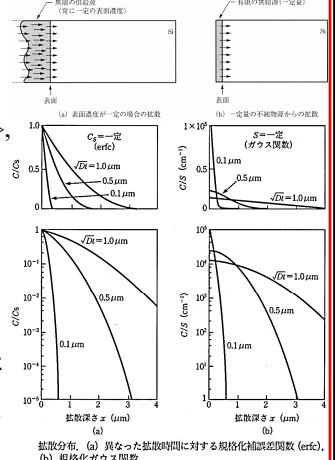
#### 表面濃度一定の場合:

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

#### 総量一定の場合:

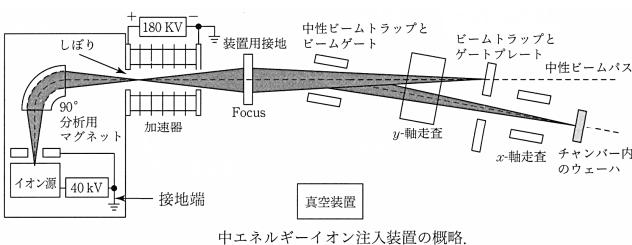
$$C(x,t) = \frac{Q_s}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}},$$

最初に少量だけ表面濃度一定で拡散させ(プ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。

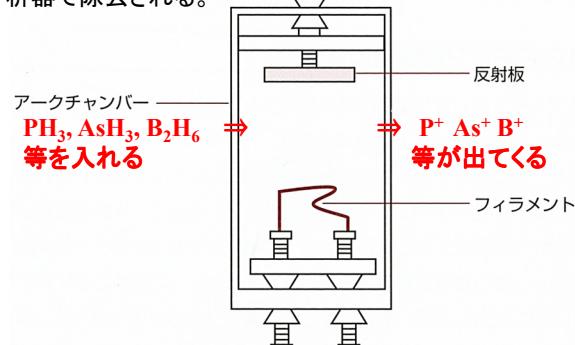


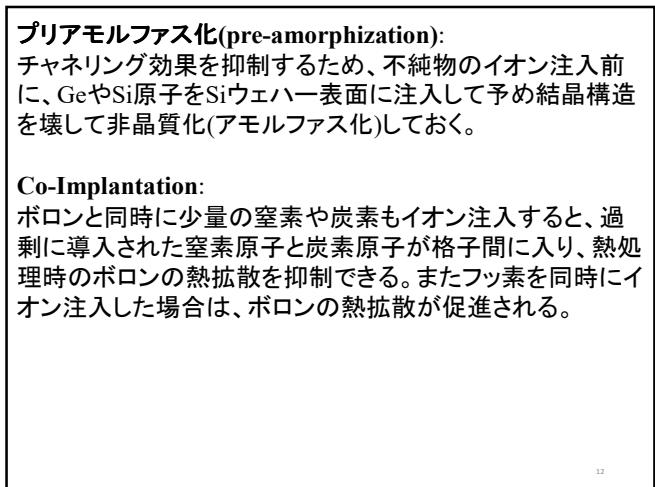
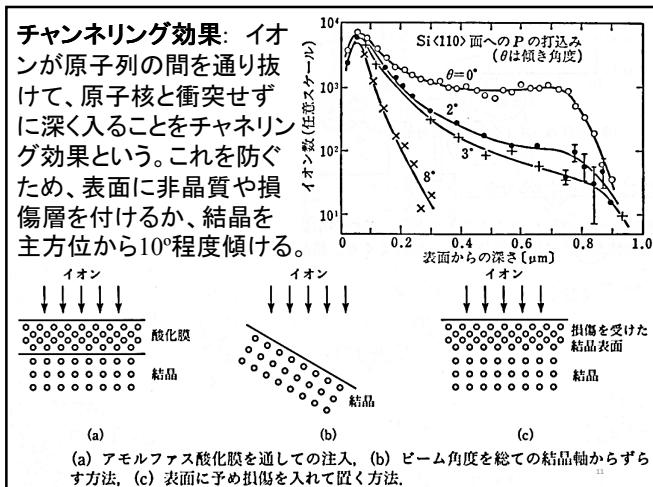
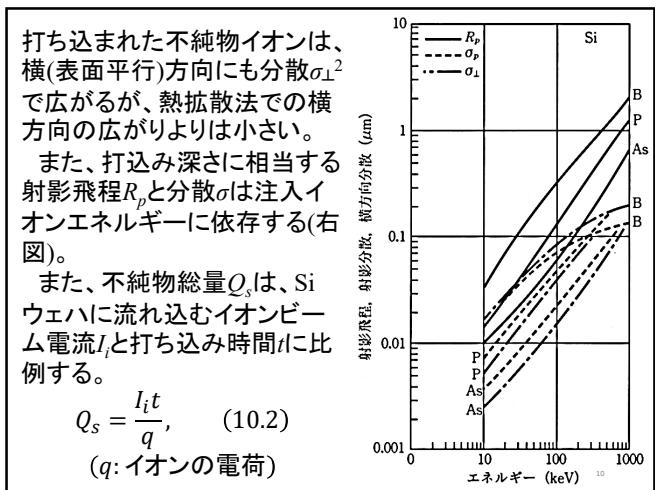
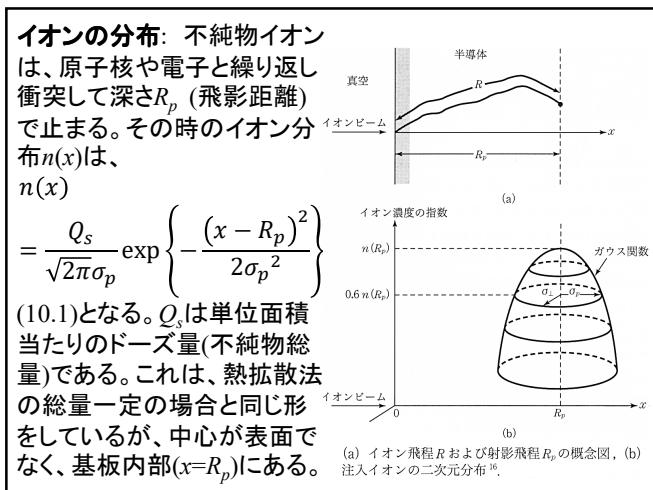
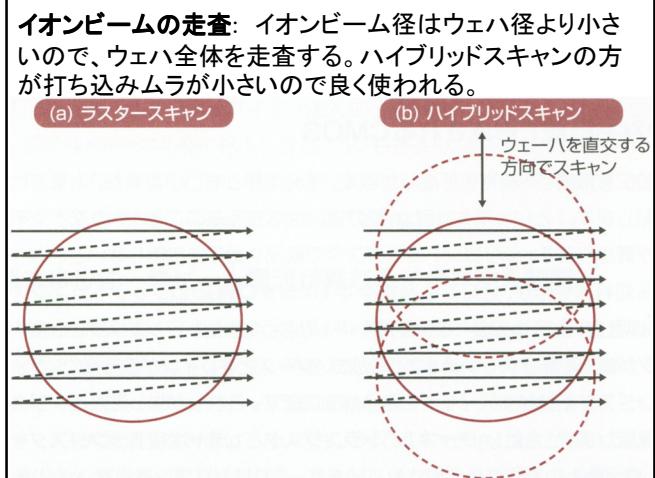
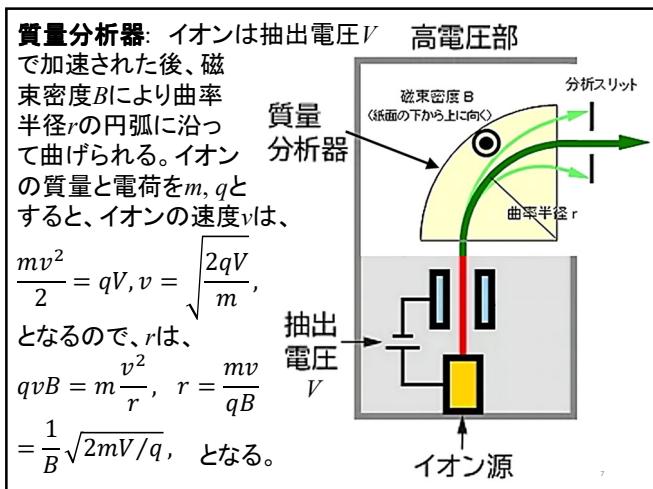
### イオン注入法:

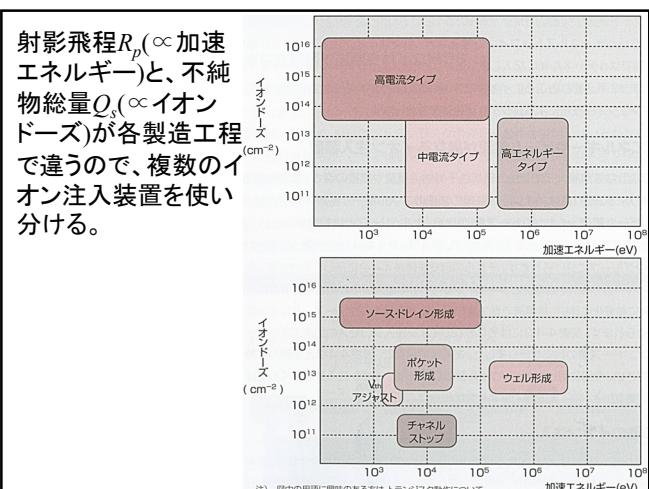
不純物をイオン化して、数~数百kVで加速して基板に打ち込み不純物ドーピングを行う。熱拡散法よりも低温で不純物拡散が出来るのでフォトレジストがマスクとしてそのまま使える。また、広範囲で精度良くドープ量を変えられ、マスク下への拡散も少ない。



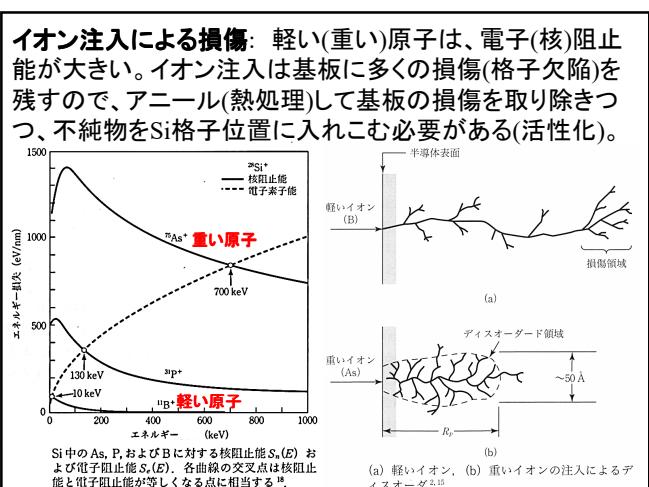
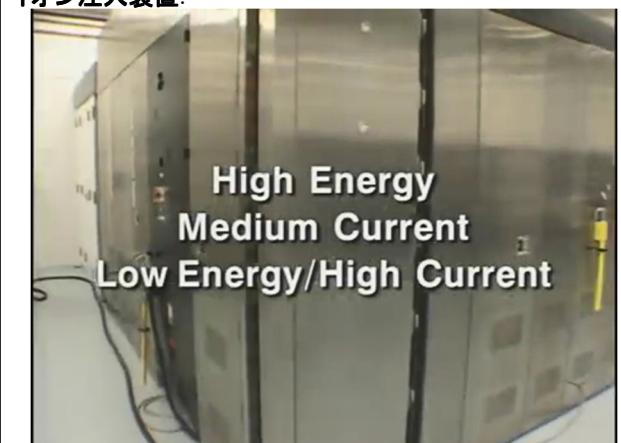
**イオン源:** 加熱した螺旋フィラメントから出る熱電子と、熱電子が反射板に当たって出る2次電子で原料ガス(不純物の水素化物)をイオン化する。多価イオン等は後段の質量分析器で除去される。





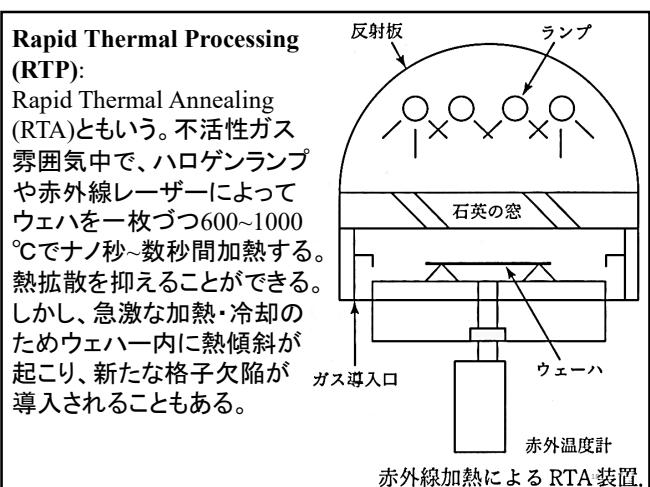
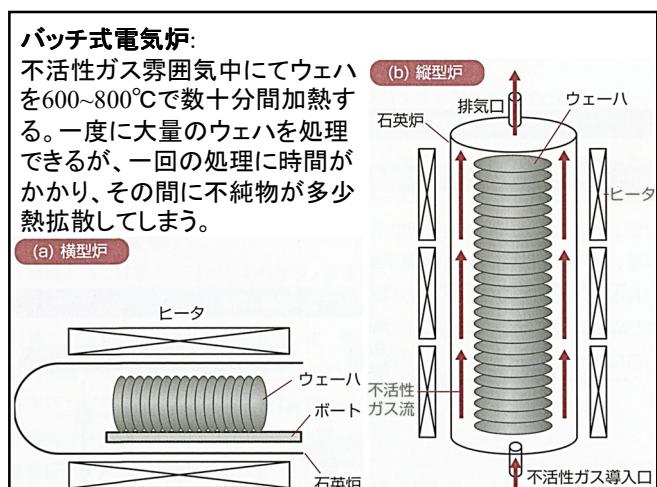


イオン注入装置:



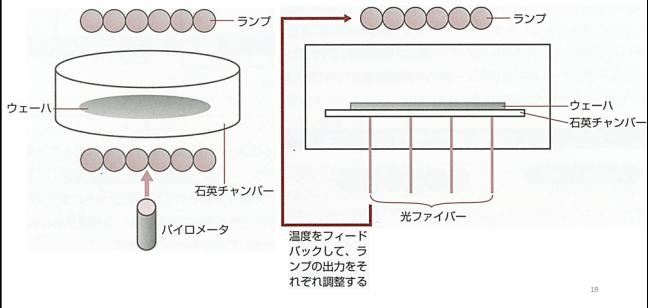
**イオン注入後のアニール:** バッチ式電気炉と瞬時ランプ (RTP: Rapid Thermal Processing)による方法がある。

要素	電気炉	RTP
プロセス	バッチ	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



### 両面加熱方式と片面加熱方式:

ウェハー一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。



### RTP装置:



### 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

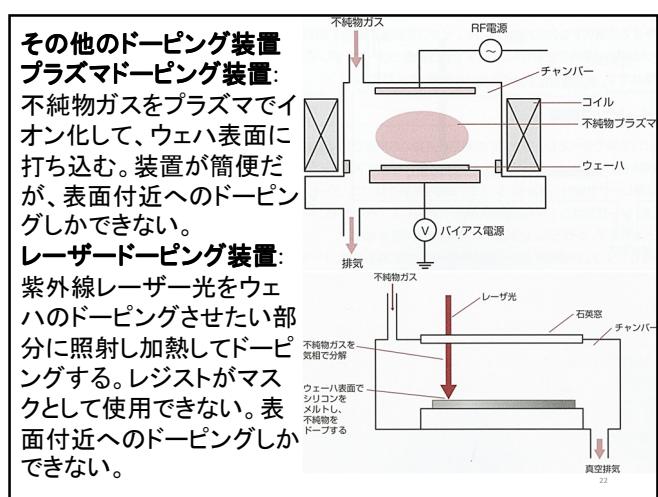
### その他のドーピング装置

#### 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。

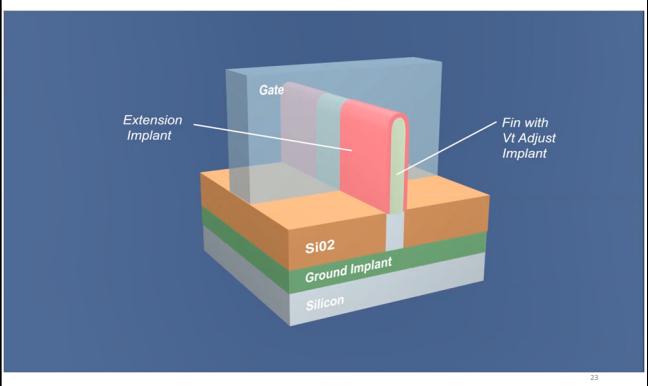
#### レーザードーピング装置:

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。



### FIN-FETのドーピング:

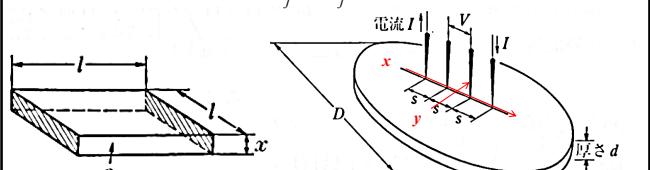
3次元構造の側面にドーピングするので、一ヵ所に対して複数回のイオン注入が必要になる。



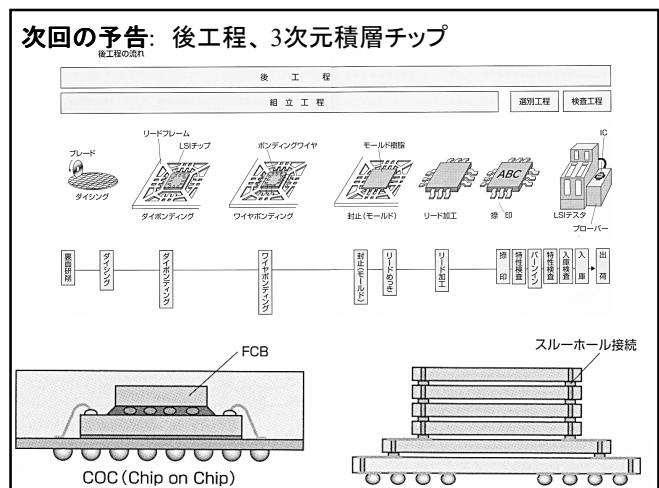
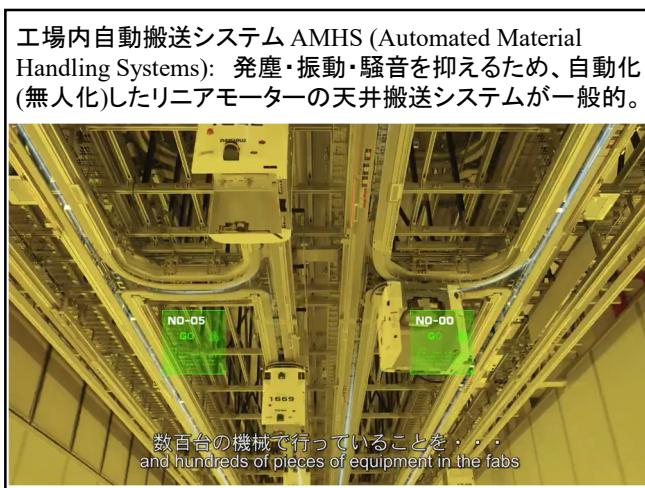
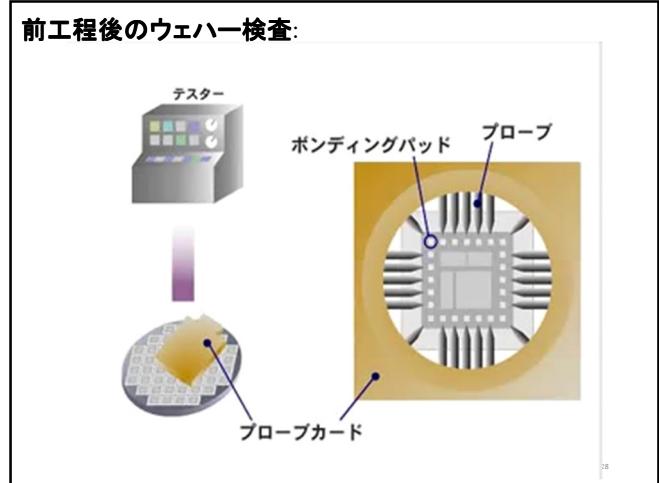
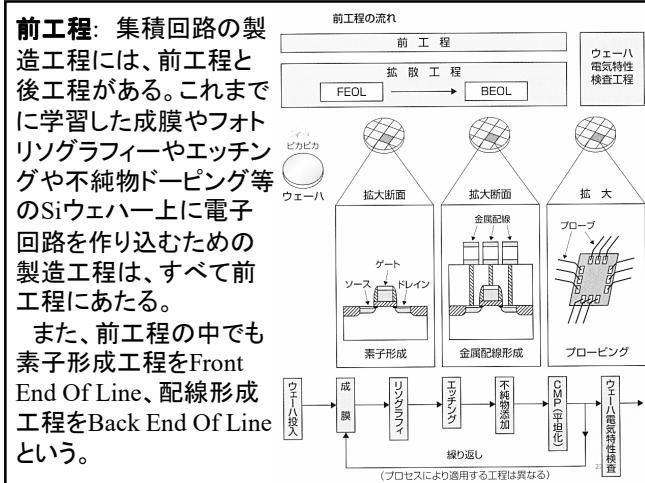
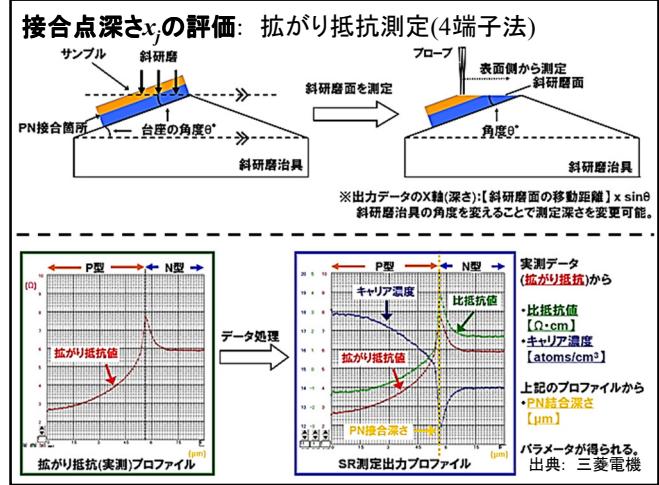
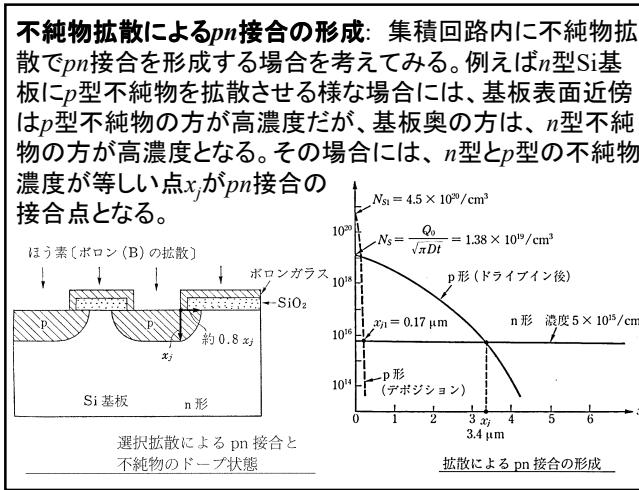
### 不純物拡散後のシート抵抗 $\rho_s$ の評価:

4端子法を使って測定する。(補足1参照)

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



24



(補足1) **2次元**の原点にある点電荷 $q$ が位置 $(r,\theta)$ につくる電位 $\varphi$ は、 $\varphi = -\frac{q \ln r}{4\pi\epsilon_0}$ ,  $\vec{\nabla} \varphi = -\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \hat{r}$ となる。この電位 $\varphi$ は実際に2次元のラプラス方程式を満たしている。  

$$\nabla^2 \varphi = \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \varphi = \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right\} \varphi = \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) \right\} \varphi = \frac{-q}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{r}{r} \right) \right\} = 0, \quad (r \neq 0)$$
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 $\varphi$ は、  

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

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、  

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

$$\begin{array}{c} \text{厚さ} x_j \\ \boxed{i} \end{array} \rightarrow \Delta y$$

$$(\Delta V: \text{微小領域での電圧降下}, R: \text{微小領域の抵抗})$$

$$(\rho: \text{材料の抵抗率}, \rho_s: \text{シート抵抗} \equiv \rho / x_j)$$

となるので、電流 $I$ は、  

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} i dy = \frac{1}{\rho_s} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\varphi}{dx} \Big|_{x=0} dy,$$
となる。これに、先程の電位 $\varphi$ を代入すると、  

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

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{-q}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{(x - 3S/2)}{(x - 3S/2)^2 + y^2} - \frac{(x + 3S/2)}{(x + 3S/2)^2 + y^2} \right\} \Big|_{x=0}$$

$$= \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left( \frac{3S/2}{(3S/2)^2 + y^2} \right), \quad \left( \int_0^{\infty} \frac{a}{a^2 + y^2} dy = \frac{\pi}{2} \right)$$

$$I = \frac{1}{\rho_s} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\varphi}{dx} \Big|_{x=0} dy = \frac{q}{\pi\epsilon_0 \rho_s} \int_0^{\infty} \frac{3S/2}{(3S/2)^2 + y^2} dy = \frac{q}{2\epsilon_0 \rho_s},$$
となる。

35

従って、シート抵抗は、

$$\begin{aligned} I &= \frac{q}{2\epsilon_0 \rho_s}, \quad V = \frac{q \ln 2}{2\pi\epsilon_0} \\ \rho_s &= \frac{q}{2\epsilon_0 I} = \frac{\pi V}{I \ln 2} \approx 4.53 \frac{V}{I}, \end{aligned}$$

となる。

他にもVan der Pauw法等で求めるやり方もある。

36