

Tema 3: Técnicas de dopado

Bibliografía diversa

Varias técnicas:

- Durante el crecimiento
- Difusión
- Implantación iónica

Estudiaremos:

- Aplicaciones
- Sistemas/métodos/tecnologías
- Teoría
- Ejemplos

Durante el crecimiento (Czochralski)

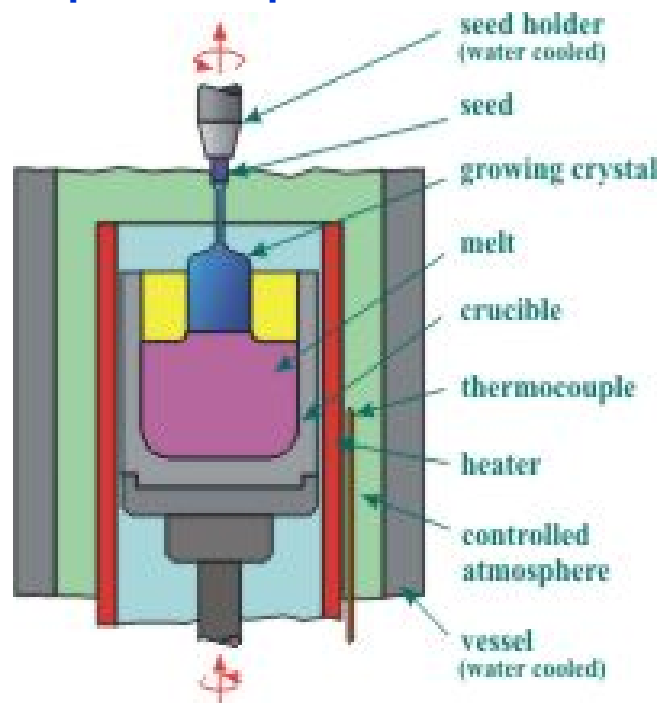
Motivación

Se utiliza para dopar regiones extensas de silicio de forma homogénea (obleas enteras)

Sistema

El sistema utilizado es el mismo que para el crecimiento de silicio intrínseco: horno Czochralski

Descripción del proceso



Se añaden pequeñas cantidades del dopante elegido a la carga fundida, que se incorporarán progresivamente al lingote durante el crecimiento.

Problema: la segregación. Los dopantes no se incorporan homogéneamente desde la fase líquida a la fase sólida.

Coeficiente de segregación

Definición

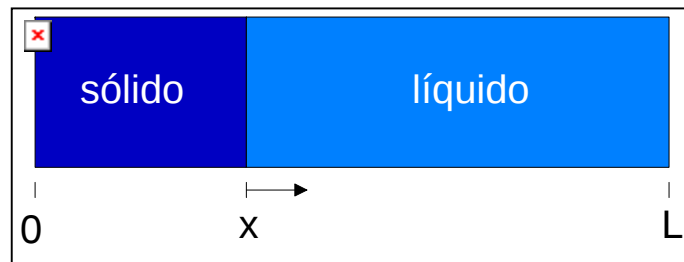
Es la relación entre la concentración de dopante de las fases líquida y sólida en la interfase de crecimiento.

$$k = \frac{C_s}{C_\ell}$$

Si $k > 1$, el lingote crecerá **más dopado** que la carga inicial

Si $k < 1$, el lingote crecerá **menos dopado** que la carga inicial

En un proceso de crecimiento a partir del fundido:

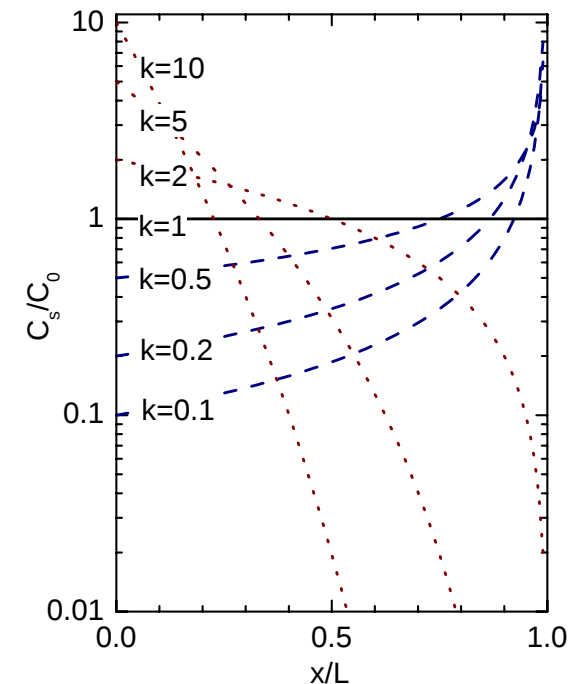


$$C_s = kC_0 \left(1 - \frac{x}{L} \right)^{k-1}$$

C_0 : concentración inicial de dopante (en la carga)

Coeficientes de segregación de dopantes habituales en Si:

	k_0	tipo
As	0.3	<i>n</i>
P	0.35	<i>n</i>
B	0.8	<i>p</i>



Ejemplo

Se crece un cristal de Si por el método Czochralski, y se desea que el lingote quede dopado con una concentración de 10^{16}cm^{-3} átomos de fósforo.

- ¿Qué concentración de átomos de fósforo debería tener el fundido para dar esta concentración al inicio del crecimiento?
- Si la carga inicial en el crisol es 5kg, ¿cuántos gramos de P habrá que añadir?
- Si el diámetro del lingote es 3in, ¿con qué concentración quedará dopada una oblea situada al 5 cm del final del lingote?

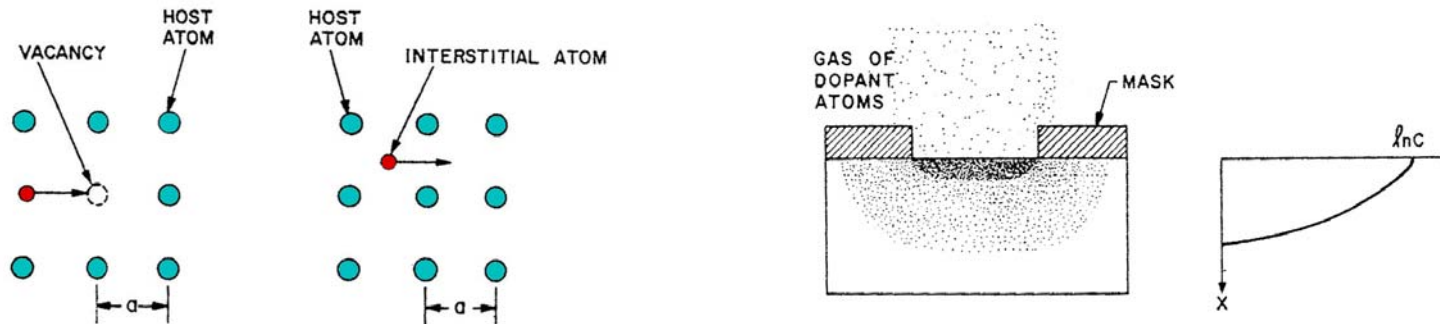
$$\text{a) Siendo } k_0(P)=0.35: k_0 = \frac{C_s}{C_\ell} \Rightarrow C_\ell = \frac{C_s}{k_0} = 2.85 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$$

$$\begin{aligned} \text{b) } m = 5\text{kg} &\Rightarrow V = m/\rho = 5000/2.33 = 2.146 \times 10^3 \text{cm}^3 \\ &\Rightarrow N(P) = (2.85 \times 10^{16})(2.146 \times 10^3) = 6.116 \times 10^{19} \text{átom.} \\ &\Rightarrow m(P) = \frac{M_r(P)}{N_A} N(P) = \frac{31}{6.023 \times 10^{23}} \cdot 6.116 \times 10^{19} = 3.148 \text{mg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{c) } V = L\pi R^2 &\Rightarrow L = V/\pi R^2 = 47.02 \text{cm} \\ C_s &= kC_0 \left(1 - \frac{x}{L}\right)^{k-1} = (0.35)(2.85 \times 10^{16}) \left(1 - \frac{47.02 - 5}{47.02}\right)^{0.35-1} = 4.281 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \end{aligned}$$

Difusión

Descripción

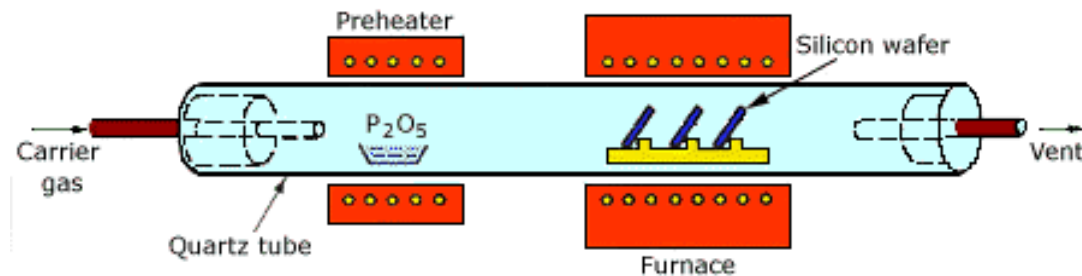


Aplicaciones

La difusión es uno de los métodos más importantes usados para formar uniones pn. Se utiliza para fabricar diodos, transistores bipolares y circuitos integrados. En combinación con la litografía, permite definir regiones de dopado muy precisas.

Sistema

El dopante puede ser: sólido/líquido/gas.



Teoría de la difusión

Ecuación de difusión de Fick

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad D: \text{coeficiente de difusión}$$

Coeficientes de difusión

Son función del dopante y de la temperatura ($[\text{cm}^2/\text{s}]$)

Longitud de difusión: $\sqrt{Dt}$ ($[\text{cm}]$)

Perfiles de difusión

Se obtienen de la ecuación de difusión

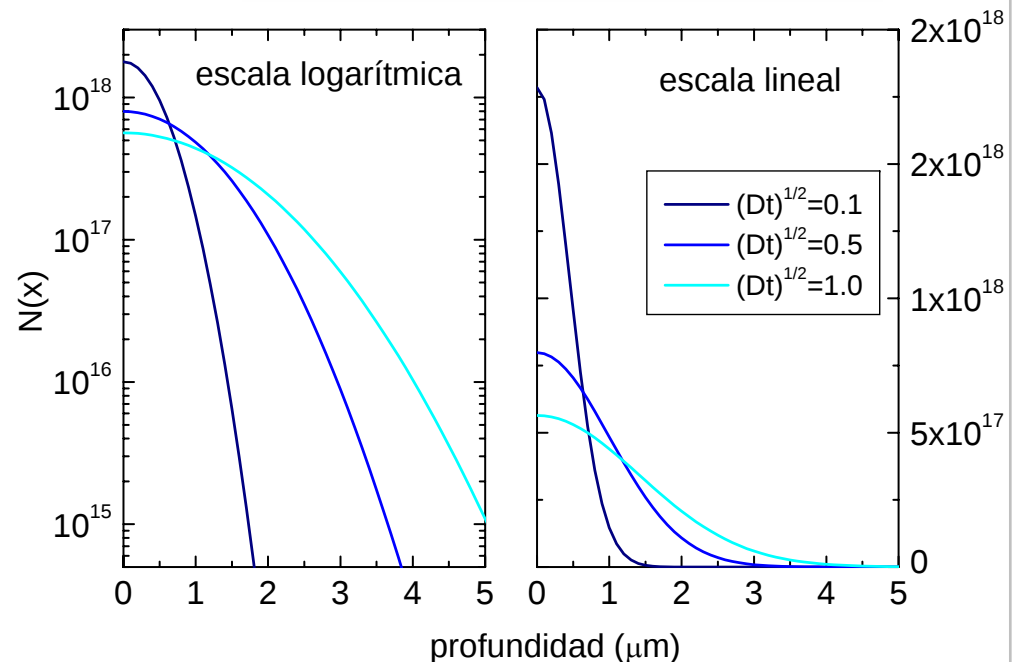
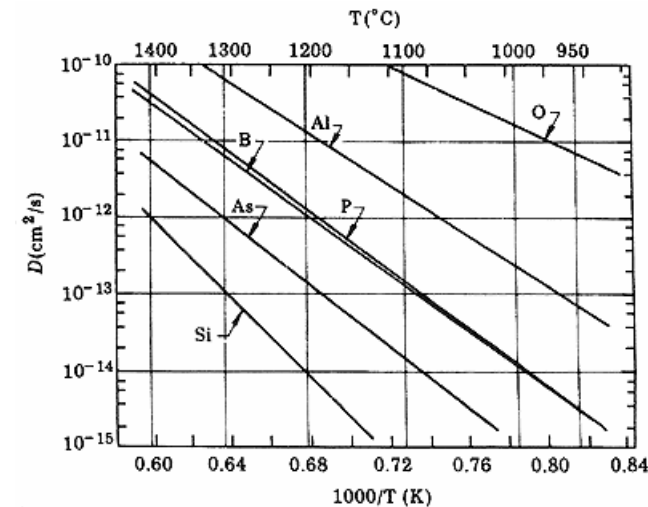
1^{er} paso: predeposición. Se obtiene la dosis

$$S(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} C_0 \sqrt{D_1 \cdot t_1} \quad [\text{cm}^{-2}]$$

2^o paso: redistribución. Se obtiene el perfil

$$N(x,t) = \frac{S}{\sqrt{\pi \cdot D_2 \cdot t_2}} e^{-\left(\frac{x}{2\sqrt{D_2 \cdot t_2}}\right)^2} \quad [\text{cm}^{-3}]$$

$$N_0 = N(0,t)$$



Ejemplo

Se predepositan $3 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ átomos de boro sobre una oblea de silicio tipo n dopada con 10^{16}cm^{-3} átomos de fósforo. Se procede a su redistribución a 1050°C . Calcule la profundidad de la región n y la pendiente en la frontera después de 1h, 2h y 5h.

Se pueden demostrar las siguientes ecuaciones:

Longitud de la **unión metalúrgica**: $x_j = 2\sqrt{D_2 t_2 \ln \frac{N_0}{N_s}}$

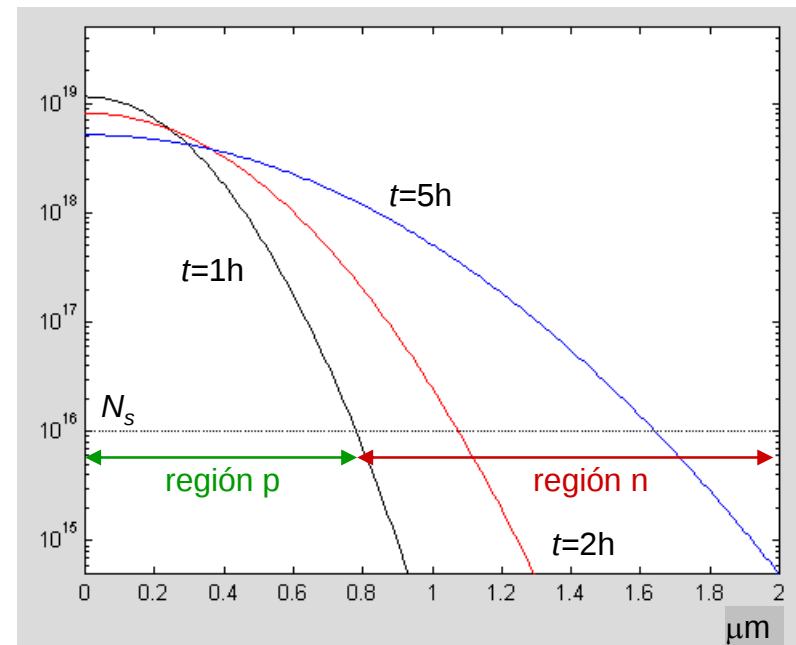
Pendiente de la difusión: $\frac{dN(x)}{dx} = -\frac{x}{2D_2 t_2} N(x)$

Y recordar que: $N_0 = \frac{S}{\sqrt{\pi D_2 t_2}}$

Para el B a 1050°C , $D = 6 \times 10^{-14} \text{cm}^2/\text{s}$

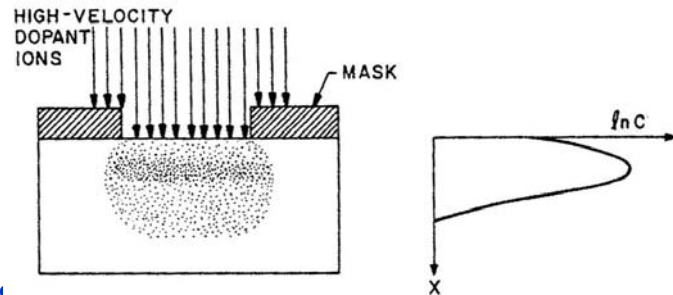
Sustituyendo:

$t=1\text{h}$:	$N_0 = 1.152 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$;	$x_j = 0.7804 \mu\text{m}$;	$dN/dx(x_j) = -5.444 \times 10^{21} \text{cm}^{-4}$
$t=2\text{h}$:	$N_0 = 8.143 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$;	$x_j = 1.076 \mu\text{m}$;	$dN/dx(x_j) = -1.245 \times 10^{21} \text{cm}^{-4}$
$t=5\text{h}$:	$N_0 = 5.150 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$;	$x_j = 1.624 \mu\text{m}$;	$dN/dx(x_j) = -7.519 \times 10^{20} \text{cm}^{-4}$

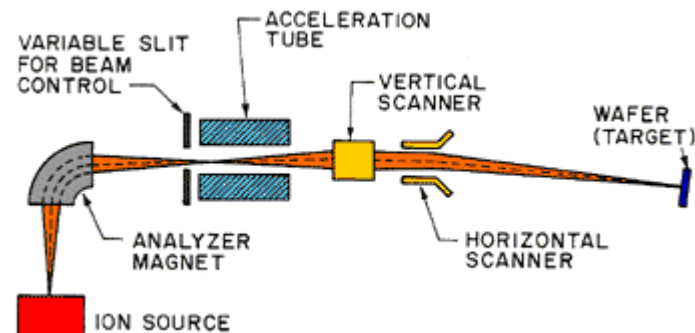


Implantación iónica

Descripción

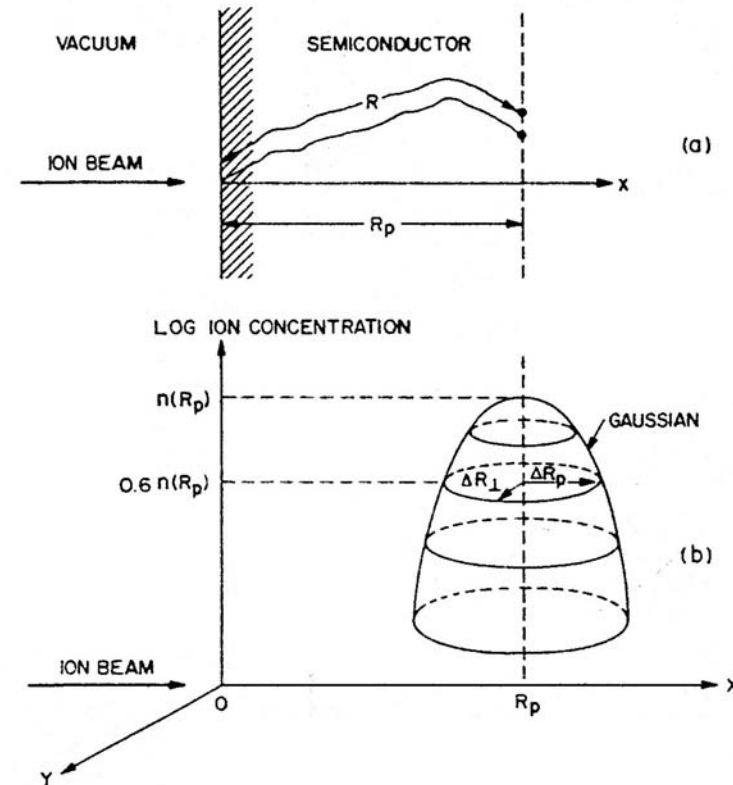


Si:



Aplicaciones

La difusión es uno de los métodos más importantes usados para formar uniones pn
 Se utiliza para fabricar diodos, transistores bipolares y circuitos integrados
 En combinación con la litografía, permite definir regiones de dopado muy precisas



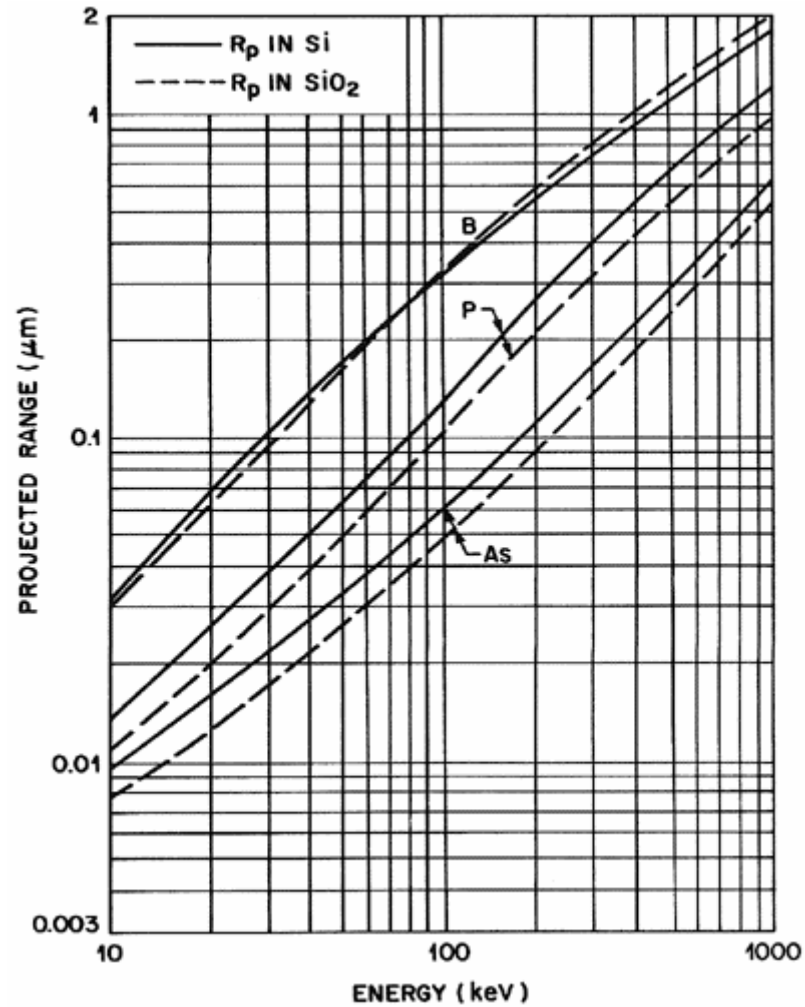
R_p : Rango proyectado

ΔR_p : Dispersión del rango proyectado

$$N(x) = \frac{S}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p} e^{-\frac{(x-R_p)^2}{2 \Delta R_p^2}}$$

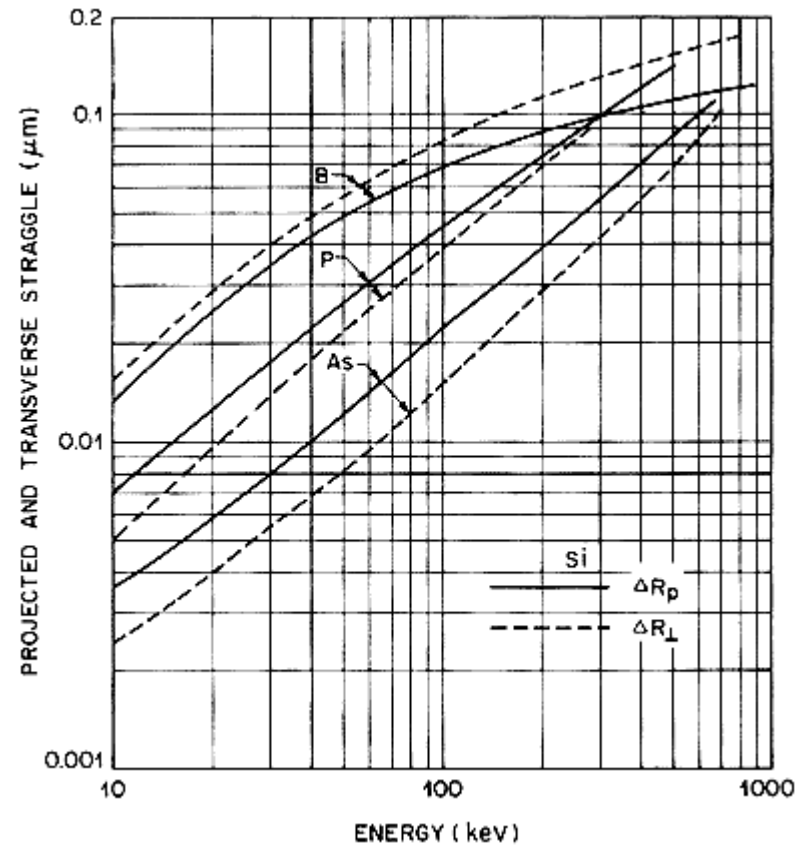
$N_0 = N(R_p)$

Implantación iónica (cont.)



R_p : Rango proyectado

Descripción (cont.)



ΔR_p : Dispersión del rango proyectado

Ejemplo

Se implanta boro en una oblea de silicio de tipo N, a una profundidad de $0.3 \mu\text{m}$. Calcule la posición de la unión si el máximo de concentración es 10^{18} cm^{-3} y el nivel de dopado de la oblea de $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

De las gráficas:

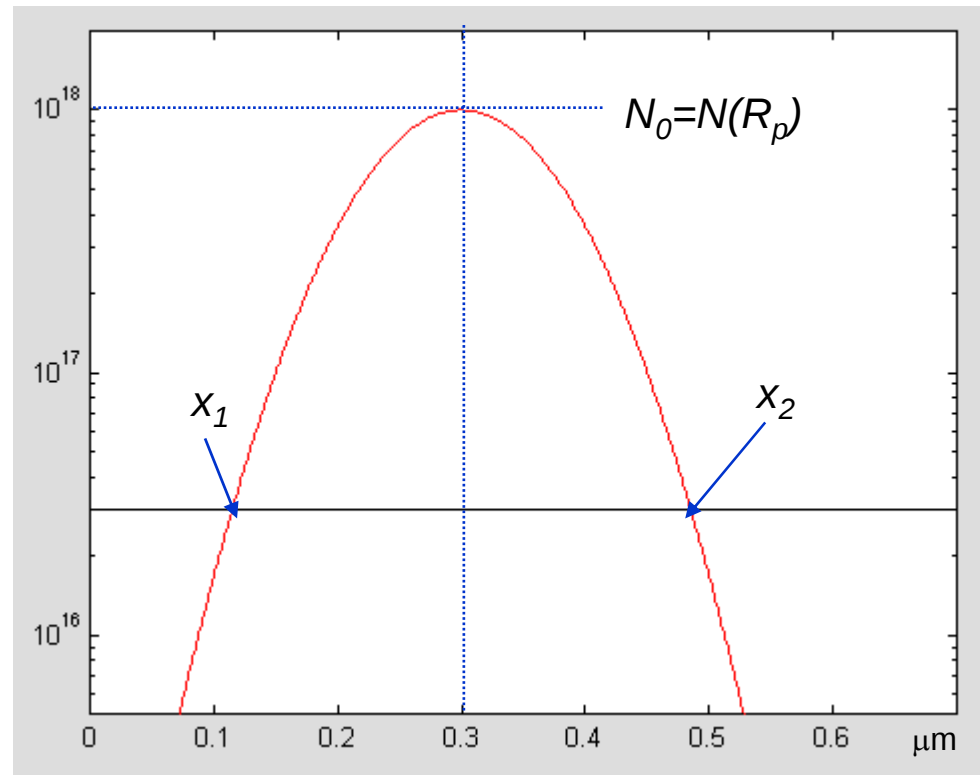
$$E = 100 \text{ keV} \quad \Delta R_p \cong 0.07 \mu\text{m}$$

Se pueden demostrar que la longitud de la **unión metalúrgica** es:

$$x_j = R_p \pm \Delta R_p \sqrt{2 \ln \frac{N_0}{N_s}}$$

En nuestro caso:

$$x_j = 0.3 \pm 0.07 \sqrt{2 \ln \frac{10^{18}}{3 \times 10^{16}}} = (0.3 \pm 0.185) \mu\text{m}$$



Hoja de datos 3.1

Coeficiente de segregación

$$k = \frac{C_s}{C_\ell} \quad C_s = kC_0 \left(1 - \frac{x}{L}\right)^{k-1}$$

Longitud de difusión $\sqrt{Dt}$

Difusión

Dosis $S(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} C_0 \sqrt{D_1 \cdot t_1}$

Perfil

$$N(x,t) = \frac{S}{\sqrt{\pi \cdot D_2 \cdot t_2}} e^{-\left(\frac{x}{2\sqrt{D_2 \cdot t_2}}\right)^2}$$

$N_0 = N(0,t)$

Longitud unión metalúrgica

$$x_j = 2\sqrt{D_2 t_2 \ln \frac{N_0}{N_s}}$$

Pendiente

$$\frac{dN(x)}{dx} = -\frac{x}{2D_2 t_2} N(x)$$

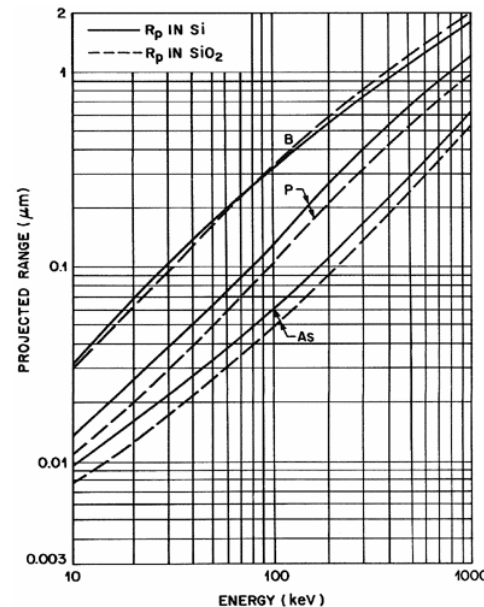
Implantación

Perfil

$$N(x) = \frac{S}{\sqrt{2\pi \Delta R_p}} e^{-\frac{(x-R_p)^2}{2\Delta R_p^2}}$$

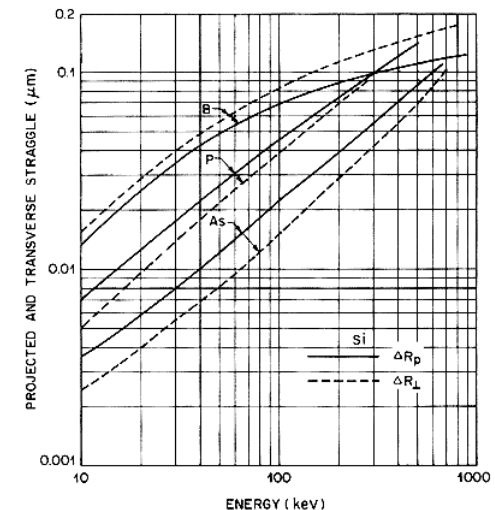
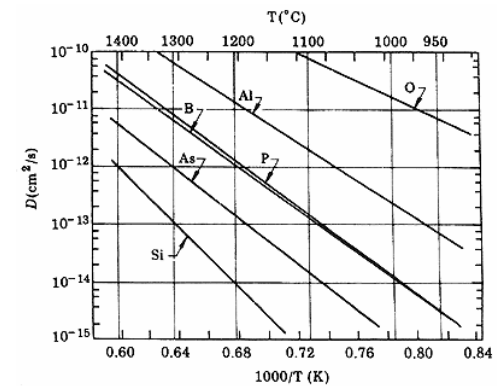
$N_0 = N(R_p)$

	k_0	tipo
As	0.3	<i>n</i>
P	0.35	<i>n</i>
B	0.8	<i>p</i>



Long. unión metalúrgica

$$x_j = R_p \pm \Delta R_p \sqrt{2 \ln \frac{N_0}{N_s}}$$



Tema 4: Fenómenos de transporte de carga

Cap. 2: Sze

+ Arrastre de portadores

- movilidad
- resistividad
- efecto Hall

+ Difusión de portadores

- Proceso de difusión
- Relación de Einstein

+ Inyección de portadores

+ Generación-recombinación de portadores

movimiento de
las cargas

densidades
de corriente

¡ desequilibrio !

estado
estacionario

= ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

= descripción global

> Aplicaciones

- Inyección lateral en estado estacionario
- Experimento de Haynes-Shockley