Problema 05_04_01

Una oblea de Si puro se dopa por difusión exponiéndola durante un tiempo determinado a una atmósfera de vapor de fósforo de manera que la concentración de éste en la superficie de la oblea es fija y conocida. Considerando ionización completa del dopante, determinar:

- el perfil de concentración del dopante en función de la profundidad una vez terminado el tratamiento
- a temperatura ambiente, la corriente de fuga que circula entre dos tramos de dos pistas paralelas de aluminio de longitud 20 μ, de profundidad 35 μ y que están separadas 20 μ sobre este sustrato de Si dopado.

Datos	temperatura:	$T = 1430 \quad \text{K}$
	concentración superficial de fósforo	$C_s = 3.1 \times 10^{20} \quad \text{átomos/cm}^3$
	duración del tratamiento:	$t = 15 \quad s$
	difusividad del P en Si a la temperatura del tratamiento:	$D = 2.0 \times 10^{-12} \quad \text{m}^2/\text{s}$
	diferencia de potencial entre pistas:	$\Delta V = 1.3 \quad \text{V}$

Problema 05_04_01

La primera parte del problema corresponde al capítulo 4 (difusión de materia). El perfil de concentración en función del tiempo y de la concentración está dado por:

$$\frac{C_s - C(z)}{C_s - C_0} = erf\left(\frac{z}{2\sqrt{Dt}}\right) \qquad \text{con} \quad C_0 = 0 \quad \text{y} \quad C_s = 3.1\times 10^{20}$$

Al cabo de los *t*=15 segundos de tratamiento, la capa límite tiene un espesor: $\delta \simeq 4\sqrt{Dt} = 2\cdot 10^{-5}\ \mathrm{m}$

Calculamos el perfil de concentración evaluando en cinco valores igualmente espaciados de la profundidad (medida desde la superficie) hasta el espesor de la capa límite (a mayores profundidades el dopaje es muy ligero y la conductividad de la oblea será aprox. la del Si intrínseco, es decir, muy baja comparada con la de las partes dopadas.

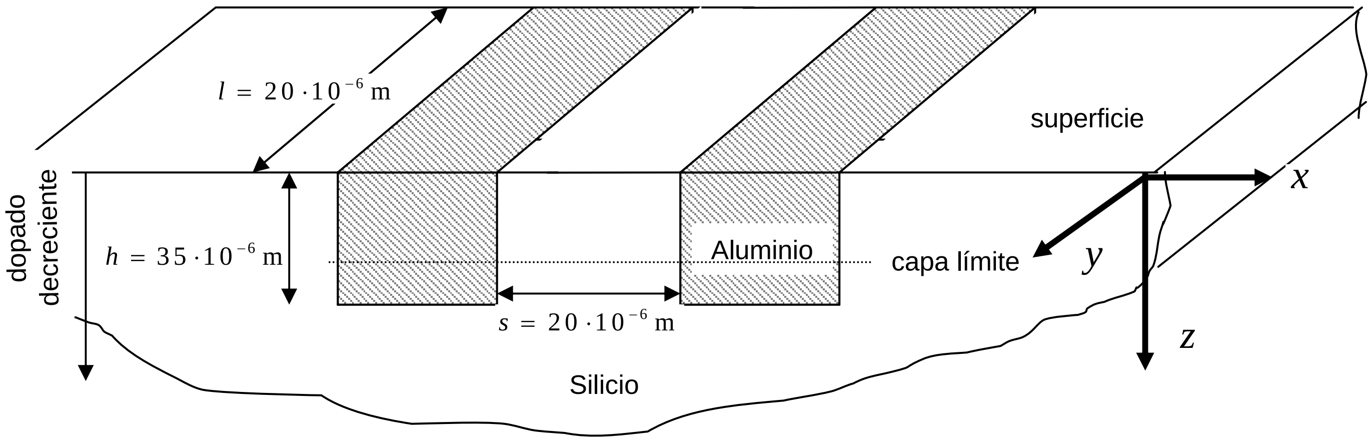
Es por tanto perfectamente aceptable tener en cuenta la contribución a la conducción sólo del espesor de Si entre la superficie y la capa límite (20 micras) y no hasta la profundidad total de las pistas (35 micras). El error que se comete es muy inferior, por ejemplo, a la incertidumbre experimental en el valor de la difusividad. El perfil de concentración es:

z (m)	$C(z)$ (átomos/cm^3)
0	$3.1\cdot 10^{20}$
$5\cdot 10^{-6}$	$1.61\cdot 10^{20}$
$10\cdot 10^{-6}$	$0.65\cdot 10^{20}$
$15\cdot 10^{-6}$	$0.16\cdot 10^{20}$
$20\cdot 10^{-6}$	$0.031\cdot 10^{20}$

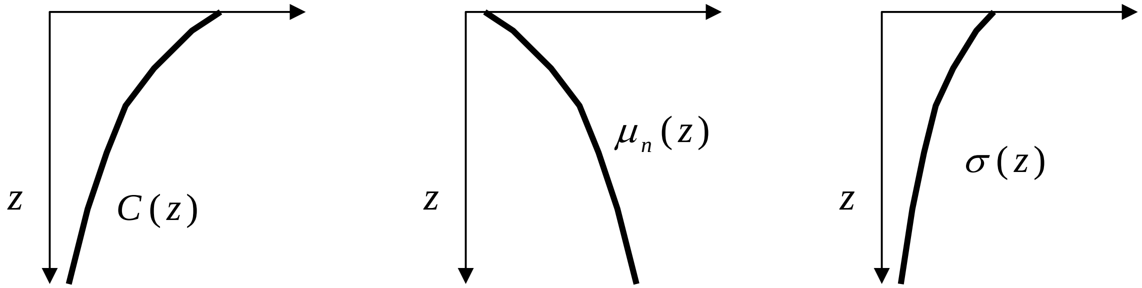
(el problema puede hacerse igualmente considerando la profundidad total de la pista, aunque de este modo se realizan cálculos innecesarios. Uno de los objetivos del problema es hacer uso del concepto de capa límite e ilustrar su utilidad para estimar el alcance de un tratamiento superficial por difusión).

Problema 05_04_01

La geometría es:

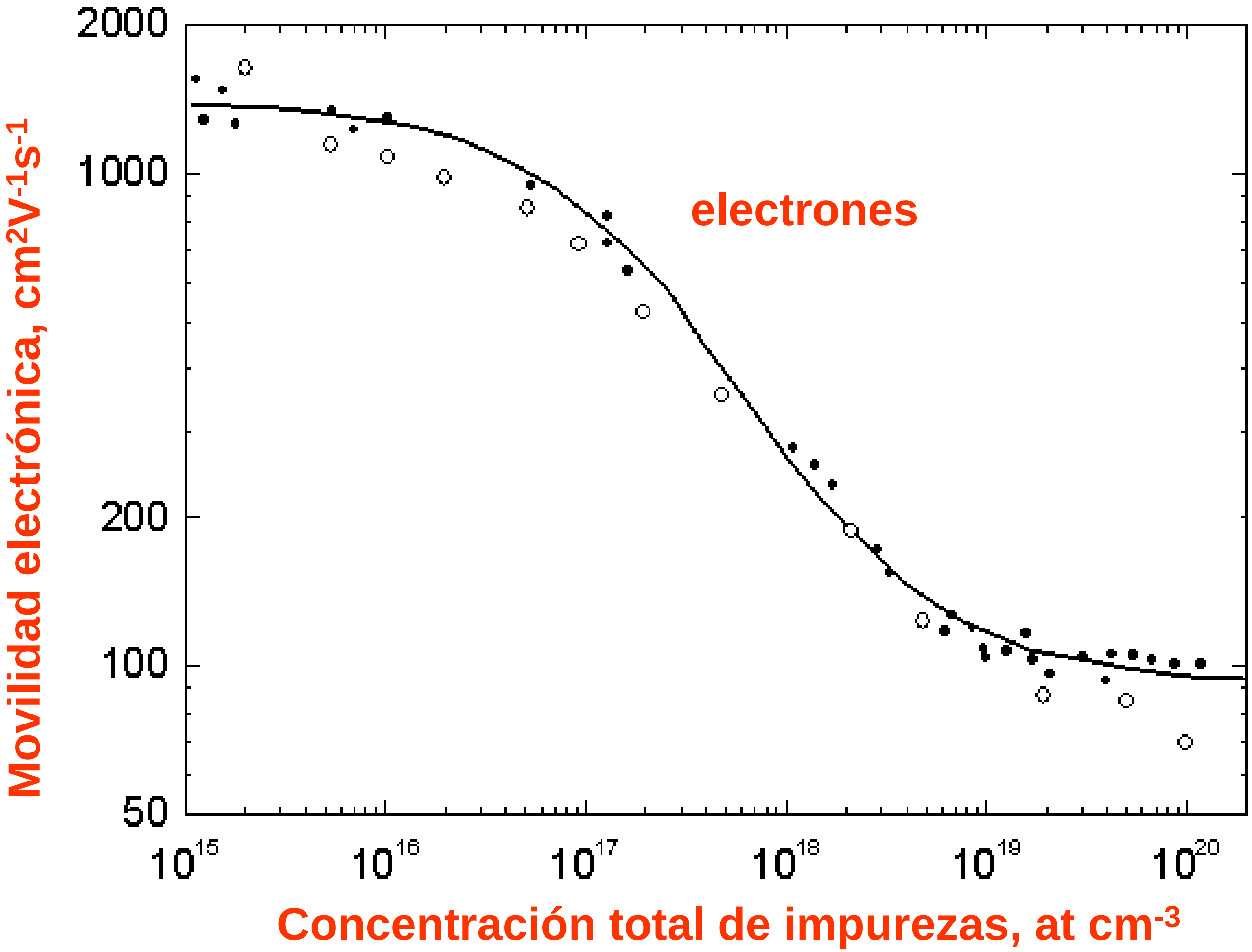


La intensidad que circula entre las dos pistas se obtiene integrando las contribuciones a la intensidad del material a cada profundidad. Puesto que el dopado varía con la profundidad, la movilidad de los portadores (electrones en este caso) también variará con la profundidad y la conductividad del material será diferente a diferentes profundidades. Cualitativamente, los perfiles de concentración de dopante (y por tanto de portadores), de movilidad electrónica y de conductividad son:



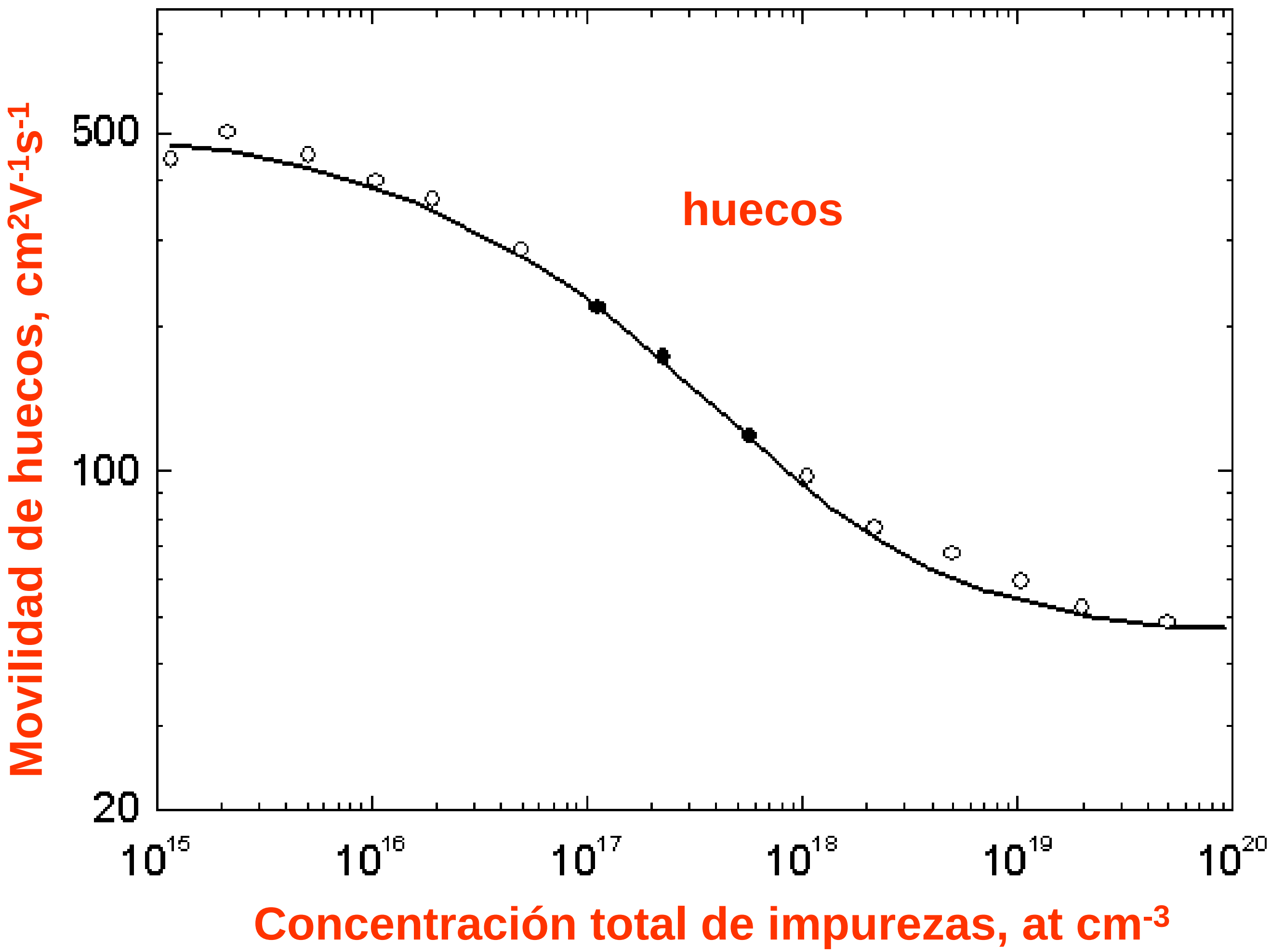
Problema 05_04_01

La variación de la movilidad elecrónica con la concentración total de dopantes para el Si se lee de la siguiente gráfica:



Problema 05_04_01

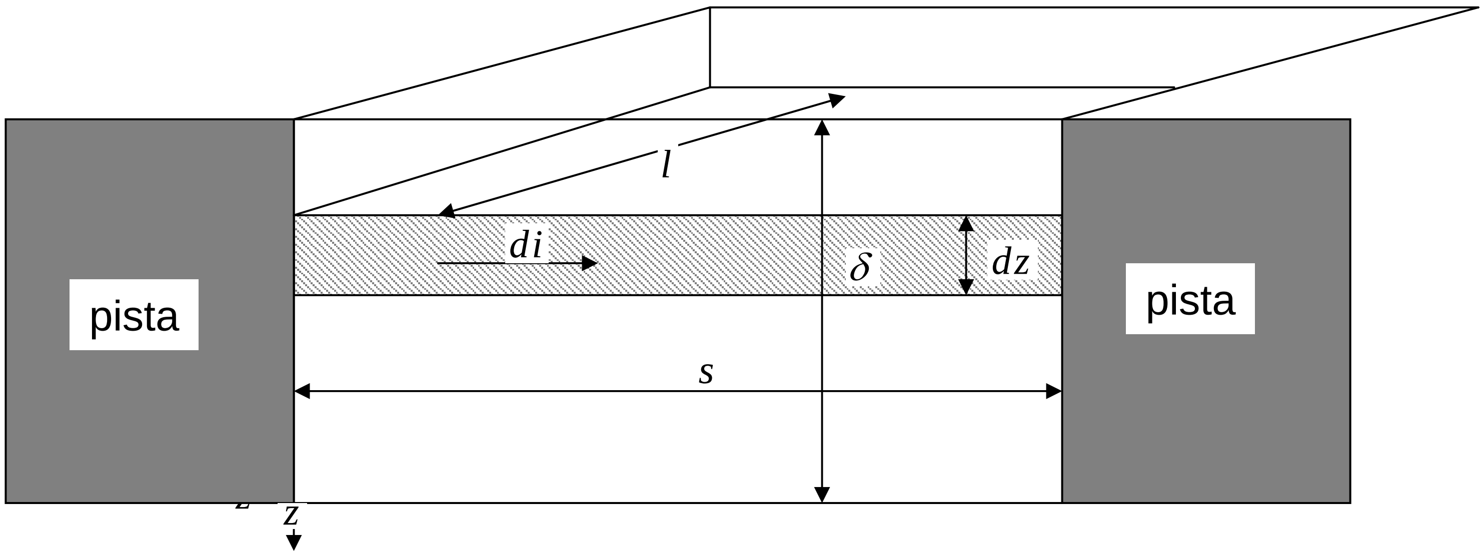
La variación de la movilidad de huecos con la concentración total de dopantes para el Si se lee en la siguiente gráfica:



Problema 05_04_01

z (m)	$\mu_n(z)$ (m^2/V·s)	$C(z)$ (átomos/m^3)	$\sigma(z)$ (S/m)
0	$90\cdot10^{-4}$	$3.1\cdot10^{26}$	$0.45\cdot10^{6}$
$5\cdot10^{-6}$	$93\cdot10^{-4}$	$1.61\cdot10^{26}$	$0.24\cdot10^{6}$
$10\cdot10^{-6}$	$95\cdot10^{-4}$	$0.65\cdot10^{26}$	$0.091\cdot10^{6}$
$15\cdot10^{-6}$	$110\cdot10^{-4}$	$0.16\cdot10^{26}$	$0.028\cdot10^{6}$
$20\cdot10^{-6}$	$166\cdot10^{-4}$	$0.031\cdot10^{26}$	$0.008\cdot10^{6}$

La corriente total que pasa de una pista a la otra se puede obtener sumando las contribuciones a cada profundidad (los elementos de espesor *dz* se comportan como resistencias en paralelo, todas sometidas a la misma diferencia de potencial y contribuyendo cada una un *di* a la corriente total):



Problema 05_04_01

z (m)	$\mu_n(z)$ (m^2/V·s)	$C(z)$ (átomos/m^3)	$\sigma(z)$ (S/m)
0	$90\cdot10^{-4}$	$3.1\cdot10^{26}$	$0.45\cdot10^{6}$
$5\cdot10^{-6}$	$93\cdot10^{-4}$	$1.61\cdot10^{26}$	$0.24\cdot10^{6}$
$10\cdot10^{-6}$	$95\cdot10^{-4}$	$0.65\cdot10^{26}$	$0.091\cdot10^{6}$
$15\cdot10^{-6}$	$110\cdot10^{-4}$	$0.16\cdot10^{26}$	$0.028\cdot10^{6}$
$20\cdot10^{-6}$	$166\cdot10^{-4}$	$0.031\cdot10^{26}$	$0.008\cdot10^{6}$

La intensidad total se obtiene sumando (integrando) las contribuciones de todas las capas. Puesto que la variación de la conductividad se conoce sólo en forma de tabla, es preciso usar una fórmula de integración numérica. Tomamos la más simple (regla trapezoidal, ver página siguiente):

$$i_{total} = \int_0^{\delta} di(z) = \int_0^{\delta} \frac{\Delta V}{\frac{1}{\sigma(z)}\frac{s}{l\,dz}} = \frac{l\Delta V}{s}\int_0^{\delta}\sigma(z)dz$$

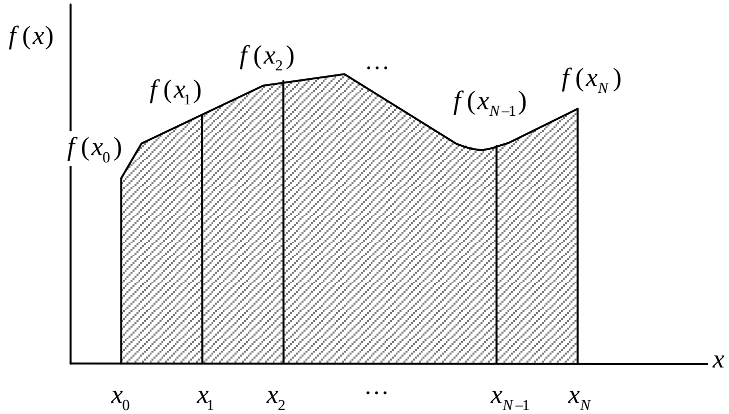
resistencia de la capa diferencial marcada en la figura de la página anterior

$$\frac{l\Delta V}{s}\int_0^{\delta}\sigma(z)dz \approx 1.3\cdot 5\cdot 10^{-6}\cdot\frac{1}{2}\cdot\left(0.45\cdot10^{6}+2\cdot0.24\cdot10^{6}+2\cdot0.091\cdot10^{6}+2\cdot0.028\cdot10^{6}+0.008\cdot10^{6}\right)=3.83\ \text{A}$$

El resultado obtenido es una corriente enorme comparada con las que circulan en un circuito microelectrónico típico. Indica que la conductividad del semiconductor dopado es apreciable y no aísla las pistas unas de otras. En la práctica es necesario casi siempre recubrir primeramente el sustrato semiconductor dopado con una capa de aislante (que puede ser el mismo óxido del semiconductor, por sus buenas cualidades como aislante y por la facilidad de fabricación in situ) y luego depositar sobre esta capa aislante las pistas metálicas conductoras.

Problema 05_04_01

Para calcular de modo aproximado la integral de una función en un intervalo finito puede usarse la siguiente fórmula (**Regla trapezoidal**):



$$\int_{x_0}^{x_N} f(x)dx \approx \frac{1}{2}h\Big(f(x_0) + 2f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_{N-1}) + f(x_N)\Big) \quad \text{donde } h \equiv x_1 - x_0 = x_2 - x_1 = \dots = x_N - x_{N-1}$$

Los subintervalos de integración no tienen por qué ser necesariamente iguales. En este caso, la regla trapezoidal es:

$$\int_{x_0}^{x_N} f(x)dx \approx \frac{1}{2}(f(x_0) + f(x_1))(x_1 - x_0) + \frac{1}{2}(f(x_1) + f(x_2))(x_2 - x_1) + \dots \frac{1}{2}(f(x_{N-1}) + f(x_N))(x_N - x_{N-1})$$