

Clase 7¹ - El diodo de juntura PN (I)

CARACTERÍSTICAS I-V

Contenido:

1. Análisis cualitativo del diodo polarizado
2. Características I-V
3. Efectos de la temperatura

Lectura recomendada:

- Müller, Kamins, “Device Electronics for Integrated Circuits”, Ch. 5, §§5.1–5.3.
- Pedro Julian, “Introducción a la Microelectronica”, Ch. 3, §§3.3.
- Howe, Sodini, “Microelectronics: An Integrated Approach”, Ch. 6, §§6.1–6.3.

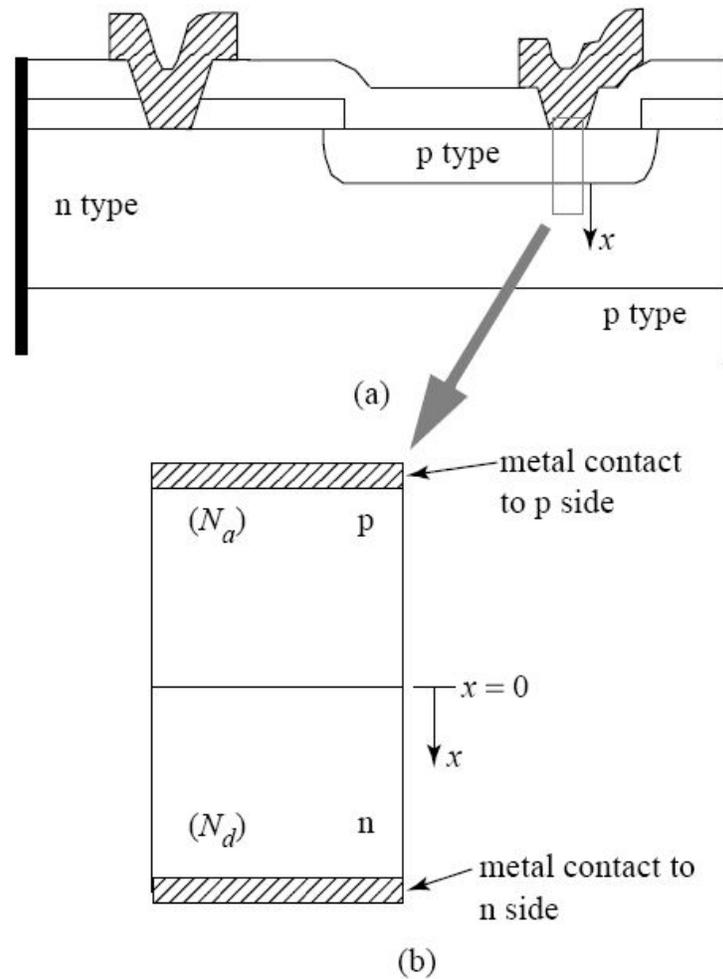
¹Esta clase es una traducción, realizada por los docentes del curso “Dispositivos Semiconductores” de la FIUBA, de la correspondiente hecha por el prof. Jesús A. de Álamo para el curso “6.012 - Microelectronic Devices and Circuits” del MIT. Cualquier error debe adjudicarse a la traducción.

Preguntas disparadoras

- ¿Por qué se considera que en un diodo la corriente puede circular en un solo sentido?
- ¿Cuál es la dependencia de la corriente del diodo con la tensión aplicada sobre sus terminales?
- ¿Cómo afecta la temperatura a los parámetros del diodo y a su comportamiento?

1. Análisis cualitativo del diodo

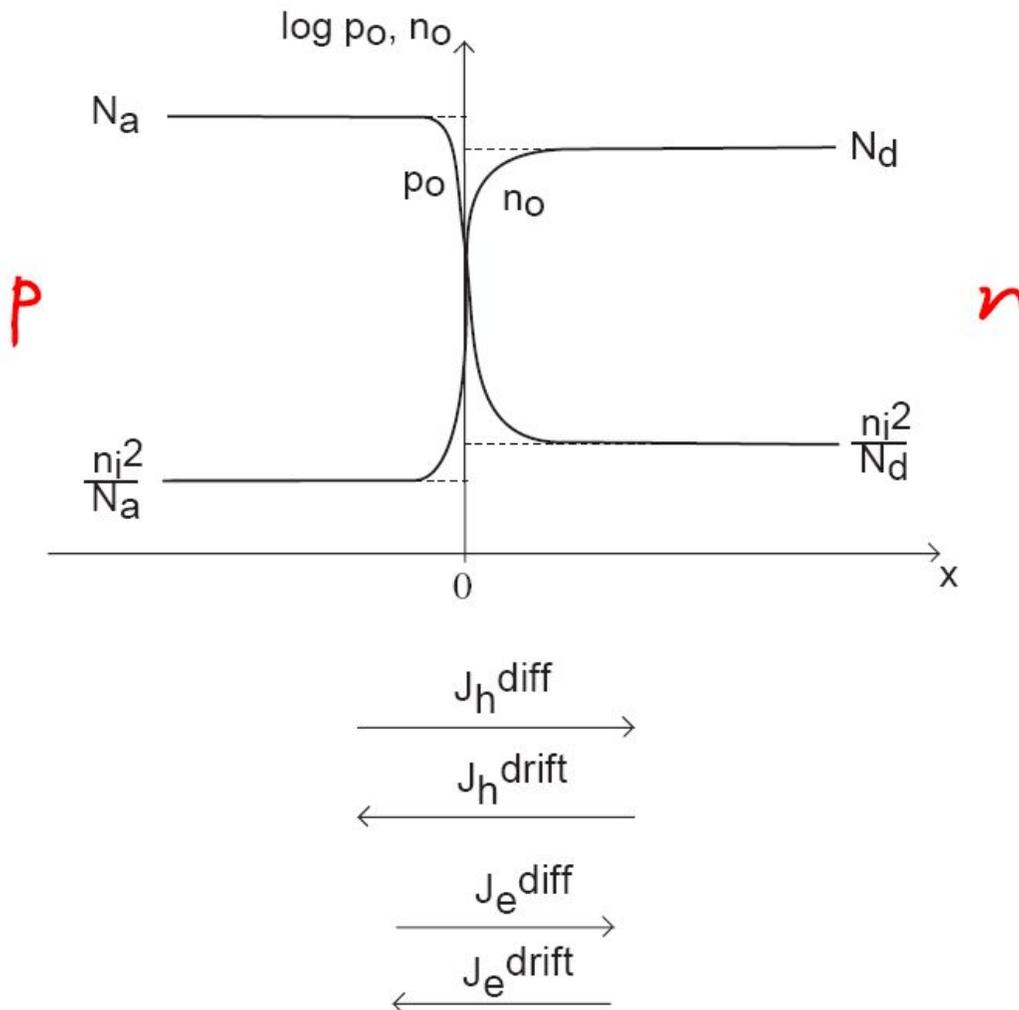
La juntura PN es un diodo. Nos concentramos en un problema unidimensional:



Al aplicar una tensión al diodo se modifica la condición de equilibrio y se observan dos consecuencias principales:

- La región de vaciamiento aumenta o se reduce
- Circula corriente

Concentración de portadores en equilibrio térmico (sin tensión aplicada):

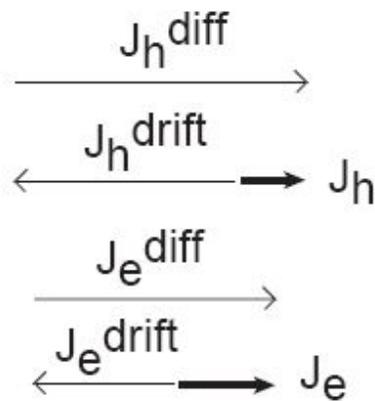
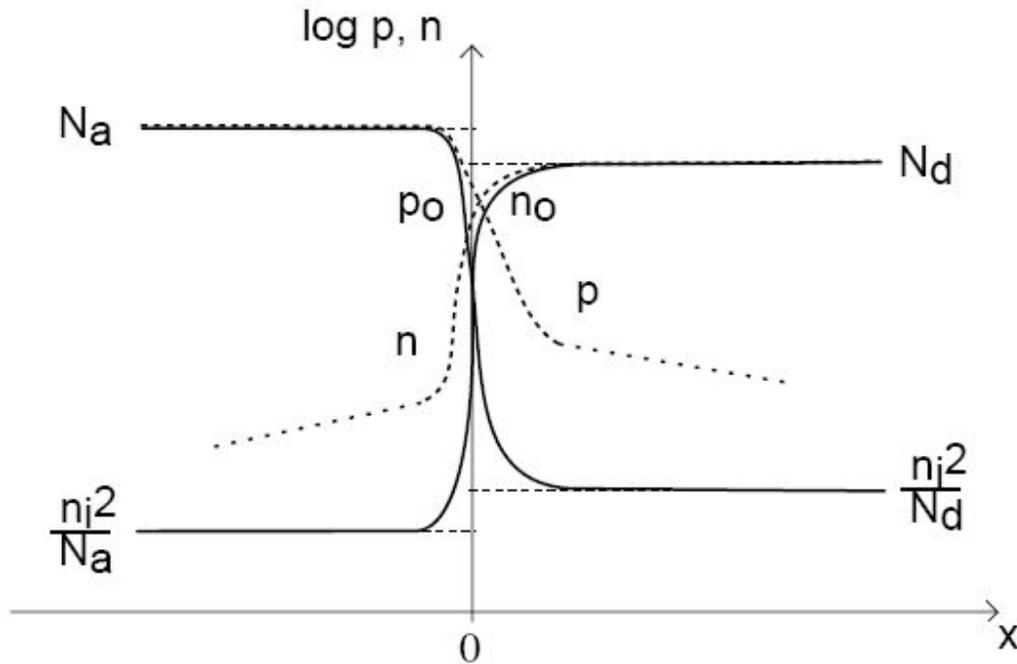


En equilibrio térmico hay un balance dinámico entre difusión y arrastre de electrones y huecos:

$$|J_{arr}| = |J_{dif}|$$

Al aplicar una tensión de polarización, la concentración de portadores se modifica:

- Para $V > 0$, $\phi_B - V \downarrow \Rightarrow |E_{SCR}| \downarrow \Rightarrow |J_{drift}| \downarrow$



Se altera el balance de corrientes: $|J_{dif}| > |J_{arr}|$

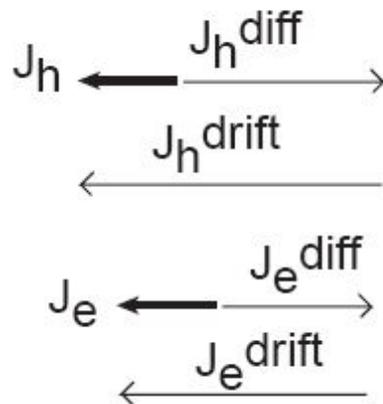
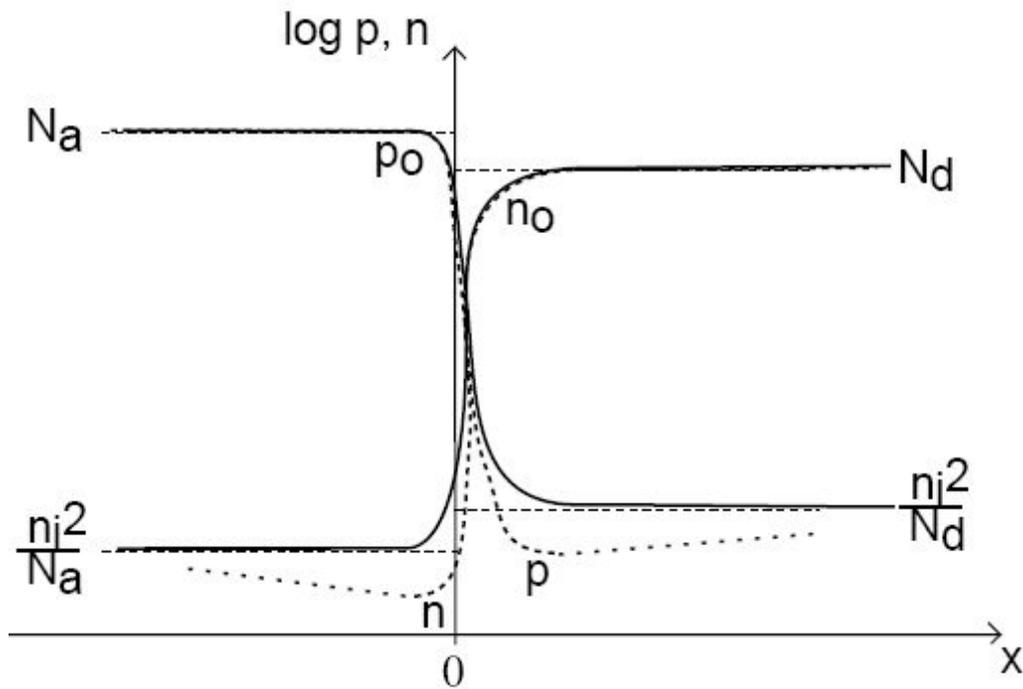
Debido a este desbalance, aparece una corriente eléctrica neta (de difusión):

\Rightarrow *inyección* de h^+ en n-QNR y de e^- en p-QNR

\Rightarrow *exceso* de minoritarios en regiones QNR

Hay una gran difusión de h^+ en n-QNR y de e^- en p-QNR \Rightarrow la corriente puede ser grande.

- Para $V < 0$, $\phi_B - V \uparrow \Rightarrow |E_{SCR}| \uparrow \Rightarrow |J_{drift}| \uparrow$



Se altera el balance de corrientes: $|J_{arr}| > |J_{dif}|$

Debido a este desbalance, aparece una corriente eléctrica neta (de arrastre):

\Rightarrow *extracción* de h^+ de n-QNR y de e^- de p-QNR

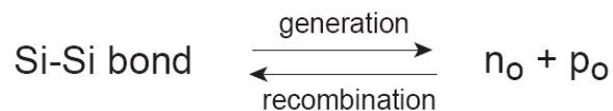
\Rightarrow *déficit* de minoritarios en regiones QNR

Hace falta compensar pocos h^+ en n-QNR y e^- en p-QNR (figura en escala log) \Rightarrow la corriente es pequeña.

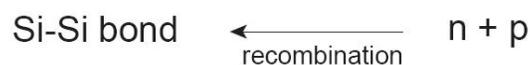
¿Qué sucede si la concentración de portadores en las regiones QNR se modifica respecto al equilibrio térmico?

⇒ Se altera el balance entre generación y recombinación de portadores

- En equilibrio térmico: la tasa de roturas de enlaces $Si - Si$ está equilibrada con la tasa de formación de enlaces $Si - Si$:



- Si hay inyección de portadores minoritarios:
 ⇒ concentración de portadores superior al equilibrio
 ⇒ prevalece la recombinación



- Si hay extracción de portadores minoritarios:
 ⇒ concentración de portadores inferior al equilibrio
 ⇒ prevalece la generación



¿Dónde ocurren la generación y la recombinación?

En los dispositivos modernos la recombinación y la generación ocurren principalmente en las *superficies*:

- En las superficies se interrumpe la estructura cristalina perfectamente periódica:
⇒ gran cantidad de enlaces rotos:
centros de generación y recombinación
- Los dispositivos modernos son muy pequeños
⇒ el efecto de superficie es muy significativo.

Elevada actividad de generación y recombinación en las superficies:

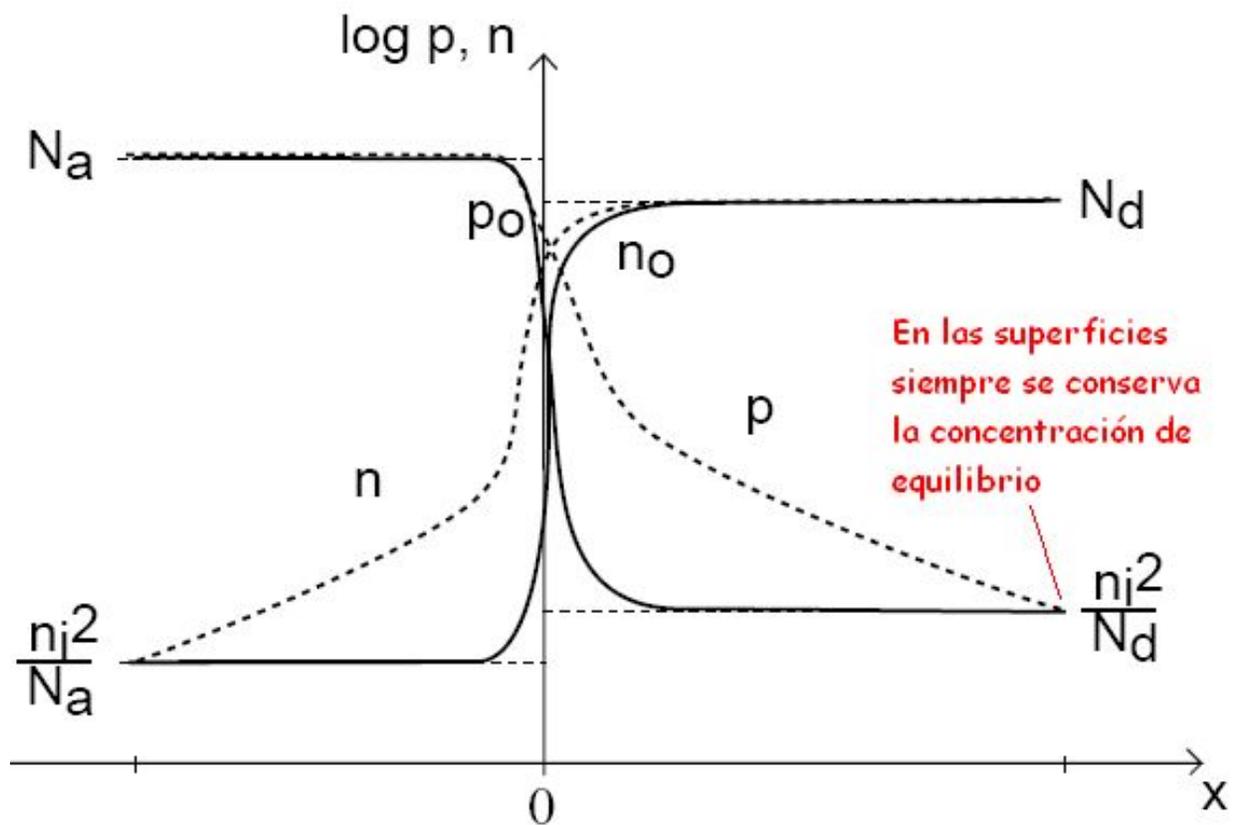
⇒ la concentración de portadores no se aparta respecto a los valores de equilibrio:

$$n(s) \simeq n_o, \quad p(s) \simeq p_o$$

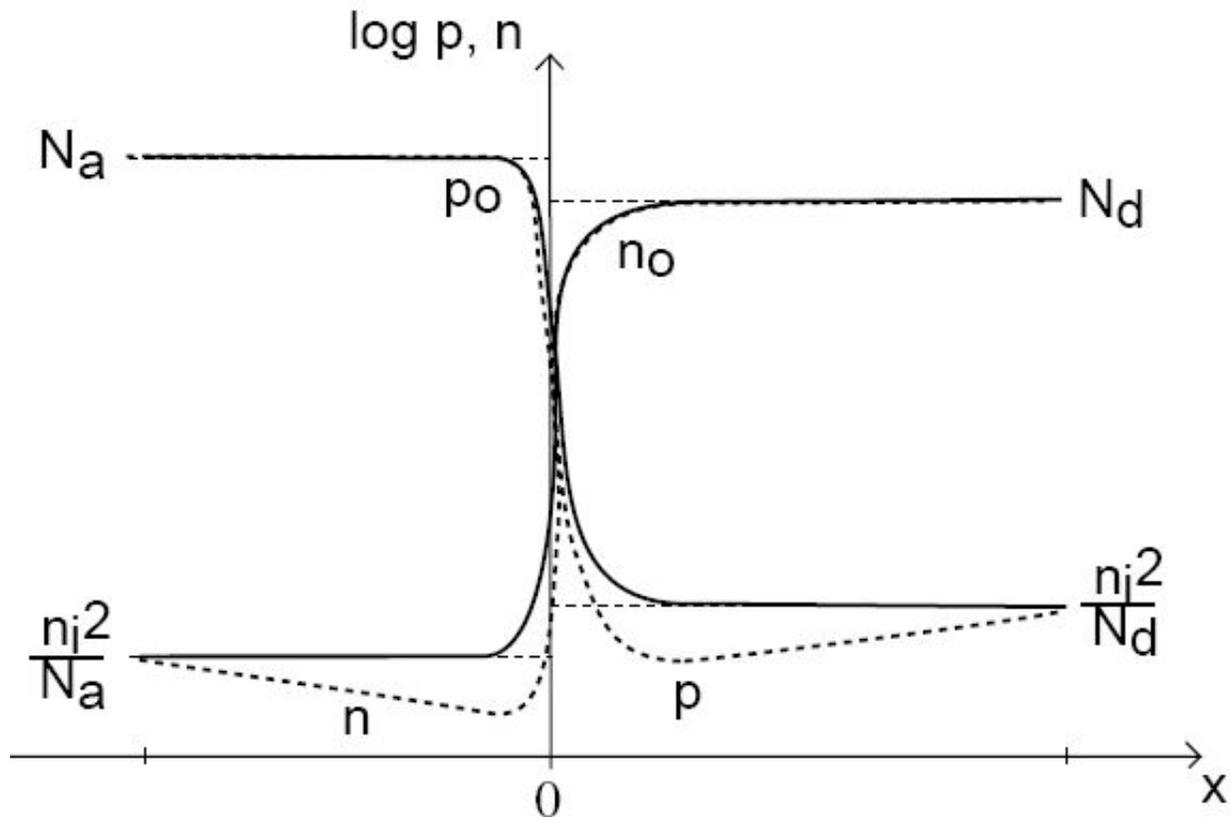
Esto agrega condiciones de contorno para nuestro modelo de diodo.

Completamos el panorama del diodo con tensión aplicada:

Polarización directa: los minoritarios inyectados se difunden a través de la región QNR y se recombinan en la superficie del semiconductor.

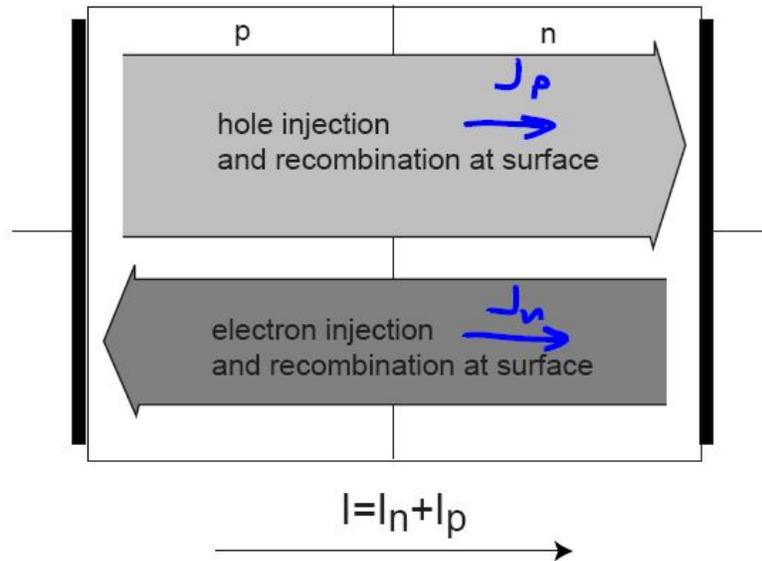


Polarización inversa: los minoritarios son arrastrados por campo eléctrico en la zona desierta (SCR). Se generan en la superficie y se difunden a través de las regiones QNR.

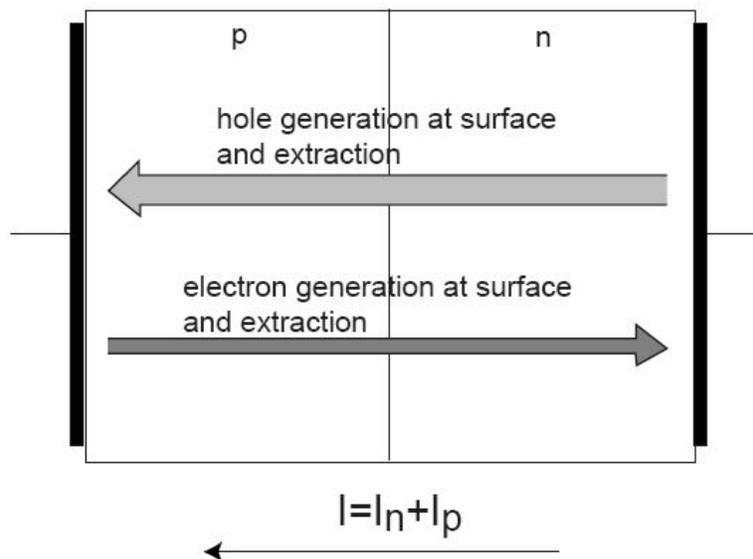


Análisis de las corrientes:

- Polarización directa:

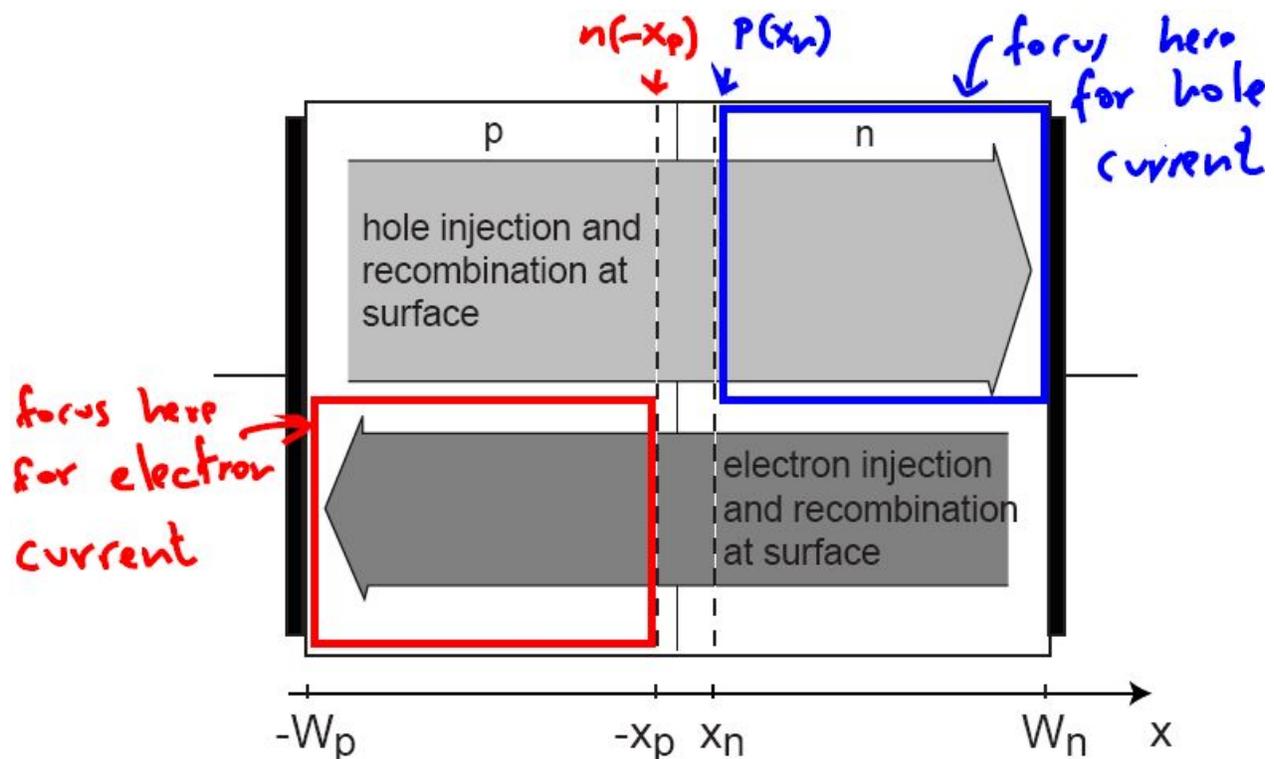


- Polarización inversa:



¿Qué limita la magnitud de la corriente del diodo?

- NO la tasa de generación o recombinación en las superficies
- NO la tasa de inyección o extracción a través de las regiones SCR
- El factor limitante es el gradiente de difusión en las regiones QNR



Desarrollo de un modelo analítico de las corrientes:

1. Calcular la concentración de portadores minoritarios en los bordes de la región SCR, $p(x_n)$ y $n(-x_p)$
2. Calcular las densidades de corriente de difusión de portadores minoritarios en cada región QNR: J_n y J_p
3. Sumar las corrientes de difusión de electrones y huecos y multiplicar por el área del diodo: $I = A(J_n + J_p)$

2. Características I-V

□ PASO 1: Calcular la concentración de portadores minoritarios en los bordes de la región SCR

En equilibrio térmico, en la SCR $|J_{drift}| = |J_{diff}|$, y

$$\frac{n_o(x_1)}{n_o(x_2)} = \exp\left(\frac{q[\phi(x_1) - \phi(x_2)]}{kT}\right)$$

$$\frac{p_o(x_1)}{p_o(x_2)} = \exp\left(-\frac{q[\phi(x_1) - \phi(x_2)]}{kT}\right)$$

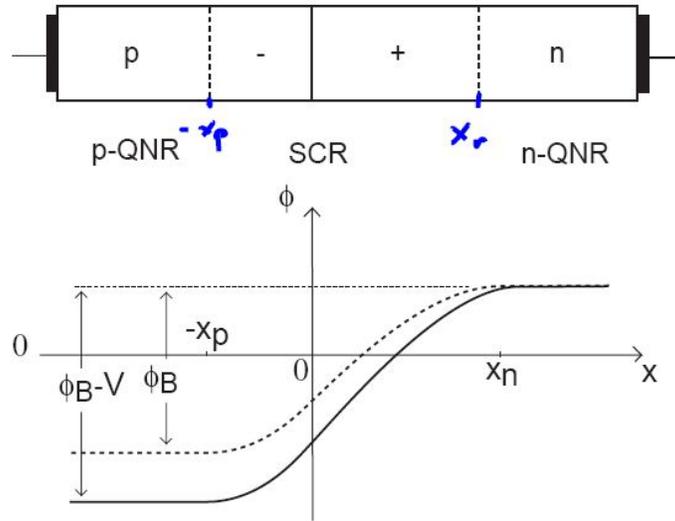
Al polarizar resulta $|J_{drift}| \neq |J_{diff}|$.

Pero si $|J_{drift} - J_{diff}|$ es pequeño respecto a $|J_{drift}|$ y a $|J_{diff}|$ entonces:

$$\frac{n(x_1)}{n(x_2)} \simeq \exp\left(\frac{q[\phi(x_1) - \phi(x_2)]}{kT}\right)$$

$$\frac{p(x_1)}{p(x_2)} \simeq \exp\left(-\frac{q[\phi(x_1) - \phi(x_2)]}{kT}\right)$$

Esto se conoce como estado de *cuasi-equilibrio*.



Recordando que $\phi(x_n) - \phi(-x_p) = \phi_B - V$, en los bordes de la región SCR, se tiene:

$$\frac{n(x_n)}{n(-x_p)} \simeq \exp\left(\frac{q[\phi(x_n) - \phi(-x_p)]}{kT}\right) = \exp\left(\frac{q(\phi_B - V)}{kT}\right)$$

$$\frac{p(x_n)}{p(-x_p)} \simeq \exp\left(-\frac{q[\phi(x_n) - \phi(-x_p)]}{kT}\right) = \exp\left(-\frac{q(\phi_B - V)}{kT}\right)$$

Consideraremos además que se verifica:

$$p(-x_p) \simeq N_a \quad \text{y} \quad n(x_n) \simeq N_d$$

Luego:

$$n(-x_p) \simeq N_d \exp\left(\frac{q(V - \phi_B)}{kT}\right)$$

y

$$p(x_n) \simeq N_a \exp\left(\frac{q(V - \phi_B)}{kT}\right)$$

Y recordando que el potencial de juntura es:

$$\phi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right)$$

Reemplazando obtenemos:

$$n(-x_p) \simeq \frac{n_i^2}{N_a} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$$

y

$$p(x_n) \simeq \frac{n_i^2}{N_d} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$$

Dependencia con la tensión aplicada:

- En equilibrio ($V = 0$):

$$n(-x_p) = \frac{n_i^2}{N_a} \quad p(x_n) = \frac{n_i^2}{N_d}$$

- En reversa ($V < 0$):

$$n(-x_p) \ll \frac{n_i^2}{N_a} \quad p(x_n) \ll \frac{n_i^2}{N_d}$$

Pocos h^+ en n-QNR y e^- en p-QNR que necesitan ser compensados:

\Rightarrow La corriente reversa es pequeña.

- En directa ($V > 0$):

$$n(-x_p) \gg \frac{n_i^2}{N_a} \quad p(x_n) \gg \frac{n_i^2}{N_d}$$

Muchos h^+ en p-QNR y e^- en n-QNR disponibles para ser inyectados:

$\Rightarrow V \uparrow \rightarrow$ concentración de portadores inyectados \uparrow

⇒ La corriente directa puede ser elevada

Este modelo será válido mientras se cumpla que el nivel de exceso de portadores minoritarios en los bordes de la zona desierta sea mucho menor que la concentración de mayoritarios, es decir:

$$n(-x_p) \ll N_a \quad y \quad p(x_n) \ll N_d$$

Esto se conoce como la hipótesis de *bajo nivel de inyección*.

□ PASO 2: Corriente de difusión en las regiones QNR:

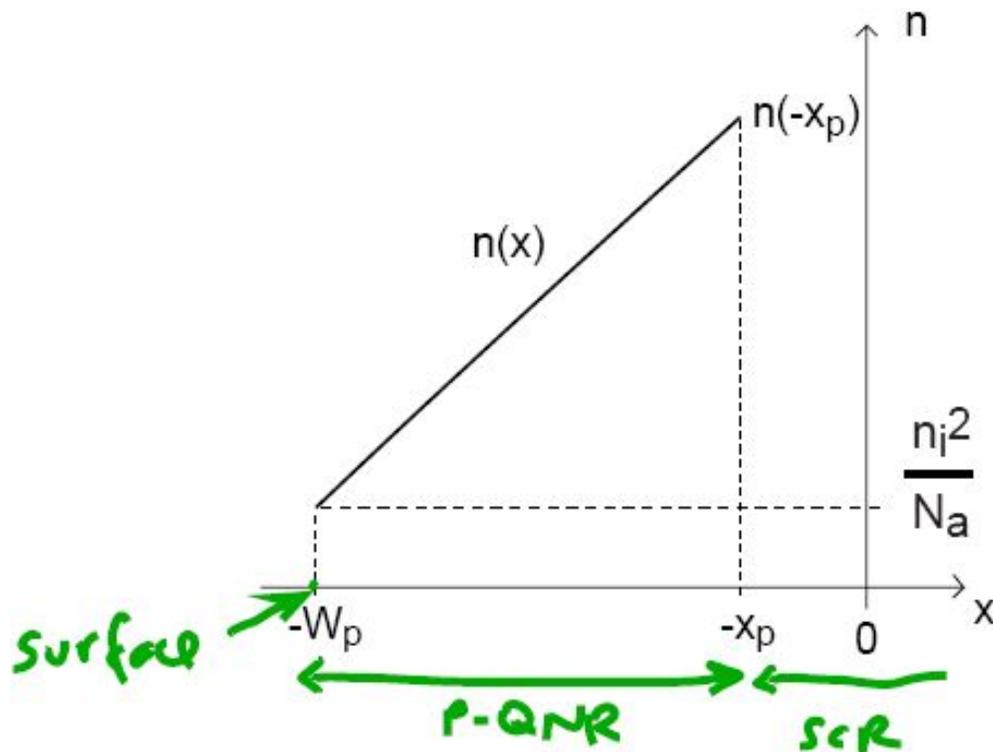
Ecuación de difusión (para electrones en la región p-QNR):

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx}$$

En la región p-QNR, **los electrones se difunden sin recombinarse hasta alcanzar el contacto:**

⇒ J_n es constante en la región p-QNR (y en n-QNR)

⇒ $n(x)$ **tiene que ser lineal.**



Condiciones de borde:

$$n(x = -W_p) = n_o = \frac{n_i^2}{N_a} \quad n(-x_p) = \frac{n_i^2}{N_a} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$$

Concentración de electrones:

$$n_p(x) = n_p(-x_p) + \frac{n_p(-x_p) - n_p(-W_p)}{-x_p + W_p}(x + x_p)$$

$$\frac{dn}{dx} = \frac{n_p(-x_p) - n_p(-W_p)}{-x_p + W_p}$$

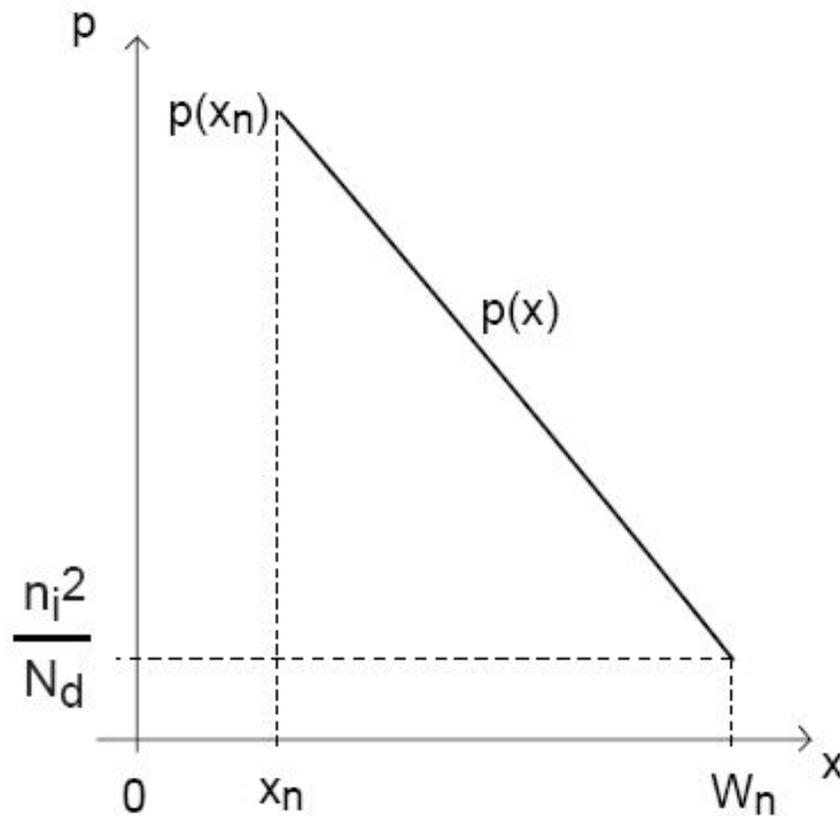
Densidad de corriente de electrones:

$$\begin{aligned} J_n &= qD_n \frac{dn}{dx} = qD_n \frac{n_p(-x_p) - n_p(-W_p)}{W_p - x_p} \\ &= qD_n \frac{\frac{n_i^2}{N_a} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - \frac{n_i^2}{N_a}}{W_p - x_p} \end{aligned}$$

o

$$J_n = q \frac{n_i^2}{N_a} \frac{D_n}{W_p - x_p} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

En forma similar, el flujo de huecos en la región n-QNR:



La densidad de corriente de huecos resulta:

$$J_p = q \frac{n_i^2}{N_d} \frac{D_p}{W_n - x_n} \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right]$$

□ PASO 3: sumamos ambos componentes de corriente:

$$J = J_n + J_p = q n_i^2 \left(\frac{1}{N_a} \frac{D_n}{W_p - x_p} + \frac{1}{N_d} \frac{D_p}{W_n - x_n} \right) \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right]$$

Corriente total:

$$I = q A n_i^2 \left(\frac{1}{N_a} \frac{D_n}{W_p - x_p} + \frac{1}{N_d} \frac{D_p}{W_n - x_n} \right) \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right]$$

Que habitualmente se escribe:

$$I = I_o \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right]$$

donde

$I_o \equiv$ corriente de saturacion

$$[I_o] = \text{A}$$

La condición de contorno vale en polarización directa e inversa \Rightarrow La ecuación es válida en directa y en inversa.

[la próxima clase continuaremos discutiendo en detalle este resultado]

3. Efectos de la temperatura en la corriente del Diodo

Expresión de la corriente del diodo:

$$I = I_o \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right]$$

$$I_o = qAn_i^2 \left(\frac{1}{N_a} \frac{D_n}{W_p - x_p} + \frac{1}{N_d} \frac{D_p}{W_n - x_n} \right)$$

¿Qué sucede cuando aumenta la temperatura?

- Aumenta el potencial térmico

$$\frac{kT}{q} \uparrow \Rightarrow \exp \left(\frac{qV}{kT} \right) \downarrow \Rightarrow I \downarrow$$

- Disminuye la movilidad y el coeficiente de difusión

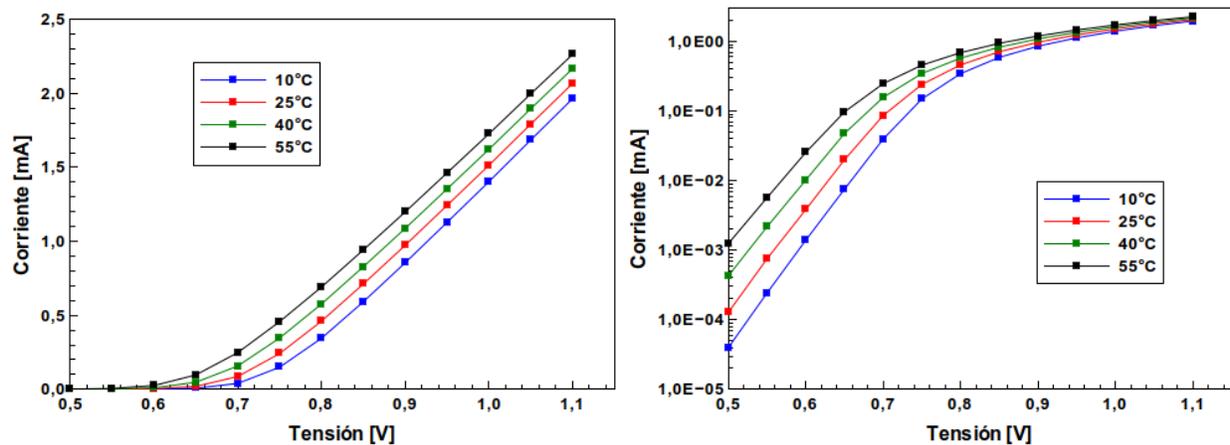
$$\mu_{n,p} \downarrow \Rightarrow D_{n,p} \downarrow \Rightarrow I_o \downarrow \Rightarrow I \downarrow$$

- Aumenta la concentración intrínseca de portadores

$$n_i \uparrow \Rightarrow n_i^2 \uparrow \Rightarrow I_o \uparrow \Rightarrow I \uparrow$$

Para determinar que ocurre cuando cambia la temperatura se podría desarrollar la expresión analítica completa. Sin embargo existen herramientas de simulación

que permiten estimar el comportamiento del dispositivo. En este caso el resultado de la simulación de SPICE es:



La corriente aumenta con la temperatura. El aumento de I_o es superior a la disminución de $\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$

\Rightarrow el aumento en n_i es predominante.

Principales conclusiones

- Al aplicar una tensión a un diodo de juntura PN se altera el balance entre corrientes de difusión y arrastre:
 - en polarización directa se *inyectan* portadores minoritarios en las regiones cuasi-neutrales
 - en polarización inversa se *extraen* portadores minoritarios de las regiones cuasi-neutrales
- La generación y recombinación ocurre predominantemente en las superficies en dónde se asume condición de equilibrio térmico.
- Para el cálculo de la concentración de portadores minoritarios en los bordes de la zona desierta (SCR) se asume la condición de *cuasi-equilibrio* y se utiliza la Boltzmann.
- El factor limitante de la corriente en directa es el gradiente de difusión en las regiones cuasi-neutrales.
- La ecuación característica I-V de un diodo PN es:

$$I = I_o \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right]$$

- La temperatura afecta las características del diodo provocando el aumento de la corriente.