

Auxiliar 2

Semiconductores

Profesores: Patricio Mendonza y Pablo Martín

Auxiliares: Bastián Matteo, Lukas Gleisner

Ayudantes: Manuel Aceituno, Joaquín Ormazábal, Tomás Ruiz, Diego Sanz

Pregunta 1: Preguntas Teóricas

1. En un semiconductor intrínseco, la concentración de electrones en la banda de conducción es igual a la concentración de huecos en la banda de valencia.

VERDADERO. En un semiconductor intrínseco, no existe dopaje con impurezas, por lo que la concentración de electrones en la banda de conducción y la concentración de huecos en la banda de valencia son idénticas. Cada vez que un electrón salta desde la capa de valencia a la capa de conducción, deja un hueco en esta última. De esta forma, se cumple que $n = p = n_i$ en base a la ecuación de ley de acción de masas $n_i^2 = n \cdot p$, donde n es la concentración de electrones del semiconductor, p la concentración de huecos y n_i es la concentración intrínseca de portadores de carga que depende de la temperatura y propiedades del semiconductor.

2. En el cero absoluto, sólo los semiconductores dopados son capaces de transmitir la corriente eléctrica.

FALSO. En el cero absoluto (0 K), no existe movimiento de electrones o huecos en los materiales, lo que significa que ningún semiconductor, dopado o intrínseco, puede transmitir corriente eléctrica. A 0 K, toda la energía térmica se ha eliminado del sistema, por lo que los electrones están en su estado de energía más bajo posible, sin energía suficiente para moverse hacia la banda de conducción. Es el aumento de energía térmica lo que permite la conducción de electrones y huecos en semiconductores.

3. Un semiconductor intrínseco posee una mayor conductividad eléctrica que un semiconductor extrínseco

FALSO. Un semiconductor extrínseco se dopa con impurezas aceptoras (tipo p) o donadoras (tipo n). Esto permite aumentar en mayor medida la concentración de portadores en el semiconductor y con ello la conductividad eléctrica en comparación al semiconductor intrínseco.

4. El nivel de Fermi en un semiconductor tipo n se encuentra más cerca de la banda de conducción que en un semiconductor tipo p.

VERDADERO. El nivel de Fermi se puede entender como el nivel de energía en el cual se presenta una probabilidad de 50 % de que se presente un electrón en dicho nivel. En un semiconductor tipo n, el nivel de Fermi se desplaza hacia la banda de conducción pues existe una mayor probabilidad de que se encuentren electrones cercanos a la banda de conducción debido al dopaje de impurezas donantes.

5. Al aplicar una polarización directa en una juntura p-n, la barrera de potencial disminuye, permitiendo que la corriente fluya a través de la juntura.

VERDADERO. Al aplicar una polarización directa, se está aplicando un voltaje en contra del voltaje de inhibición de la juntura P-N (V_0). Reducir la barrera de potencial implica que los electrones (y huecos) puedan cruzar con una mayor facilidad la zona de agotamiento. Esto resulta en un aumento significativo del flujo de portadores a través de la juntura, lo que permite que la corriente eléctrica fluya.

6. En una juntura p-n polarizada en directa, la corriente de huecos desde la región p hacia la región n es mayor que la corriente de electrones desde la región n hacia la región p.

FALSO. En una juntura P-N polarizada en directa, la corriente de electrones desde la región n a la región p es mayor que la corriente de huecos desde la región p a la región n. Esto se debe a la diferencia en la movilidad entre los electrones y los huecos en el semiconductor. Esto se relaciona con el concepto de masa efectiva en cristales, que permite representar a los electrones y huecos que se mueven en semiconductores como puntos puntuales con masa en el vacío. Se sabe que los huecos poseen una menor masa efectiva que los electrones por lo que la corriente de huecos es menor que la corriente de electrones.

Una manera de imaginarse esto, es mediante una analogía con una carretera y un taco. Se pueden considerar a los electrones como los autos que pueden avanzar rápidamente cuando el tráfico se despeja y llenan los espacios vacíos, en cambio, los huecos se pueden representar como los espacios vacíos que dejan los autos que se quedan detrás y que luego dichos espacios serán ocupados por otros autos (electrones). El movimiento de los autos representa la corriente de electrones y el retraso en el movimiento de estos representa la corriente de huecos.

Pregunta 2: Concentraciones

¡Felicidades!, durante su búsqueda de la primera práctica profesional usted fue contratado por la empresa TRANSISTORES DOS HERMANOS para realizar un estudio y análisis detallado de diversos materiales semiconductores que, serán empleados en la fabricación de distintos elementos electrónicos que se venderán al mercado, como lo son diodos, tiristores y transistores. Para realizar correctamente el trabajo, se le solicita lo siguiente:

1. Calcule la concentración de electrones y de huecos en un sólido de silicio cuya concentración intrínseca a 300 K es de $n_i = 5 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-3}$. Luego dibuje el diagrama de niveles de energía para este caso.
2. Al material anterior, se le realiza un dopaje de impurezas de fósforo a la misma temperatura con una concentración de $2 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$. Indique el tipo de dopaje, calcule las concentraciones de electrones y huecos usando el método exacto y aproximado. Por último, dibuje el diagrama de bandas.
3. Su supervisor le indica que el silicio subió de precio y la empresa decide fabricar semiconductores con sólidos de germanio pero se desconoce su concentración intrínseca, no obstante, por requisitos se requiere una concentración de electrones de $9 \cdot 10^9 \text{cm}^{-3}$. Además, se realiza un dopaje con impurezas de galio con concentración de 10^{17}cm^{-3} , calcule la concentración intrínseca y dibuje el diagrama de bandas.
4. Se realiza un segundo dopaje al semiconductor anterior usando impurezas de fósforo (misma concentración de 2.), de tal forma que una mitad del semiconductor está dopado con fósforo y la otra con Galio (Juntura).
Se le solicita determinar las concentraciones de equilibrio, el voltaje de inhibición de la juntura y el dibujo de diagrama de bandas.
5. Finalmente, y luego de un arduo mes de trabajo, su supervisor se da cuenta de que existe un voltaje de 0.2 [V] que se opone al voltaje V_0 (inhibición), por lo que le solicita que calcule las nuevas concentraciones de equilibrio antes de que se vaya de viaje con sus amigos a La Serena y olvide todo lo aprendido en su práctica.

1. Calcule la concentración de electrones y de huecos en un sólido de silicio cuya concentración intrínseca a 300 K es de $n_i = 5 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-3}$. Luego dibuje el diagrama de niveles de energía para este caso.

Al ser el silicio un elemento del grupo IV de la tabla periódica es idóneo como semiconductor. En este caso, se tiene que al ser un semiconductor intrínseco, la concentración de electrones y huecos son iguales ($n = p$) luego por la ecuación de ley de acción de masa se cumple que $n_i^2 = n \cdot p$, por lo tanto, $n = p = n_i = 5 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-3}$.

Se debe notar que en el diagrama de bandas 1, los electrones y huecos al ser iguales vienen de pares, por lo que si un electrón (círculos azules) salta a la banda de conducción deja atrás un hueco en la banda de valencia. Diagrama:

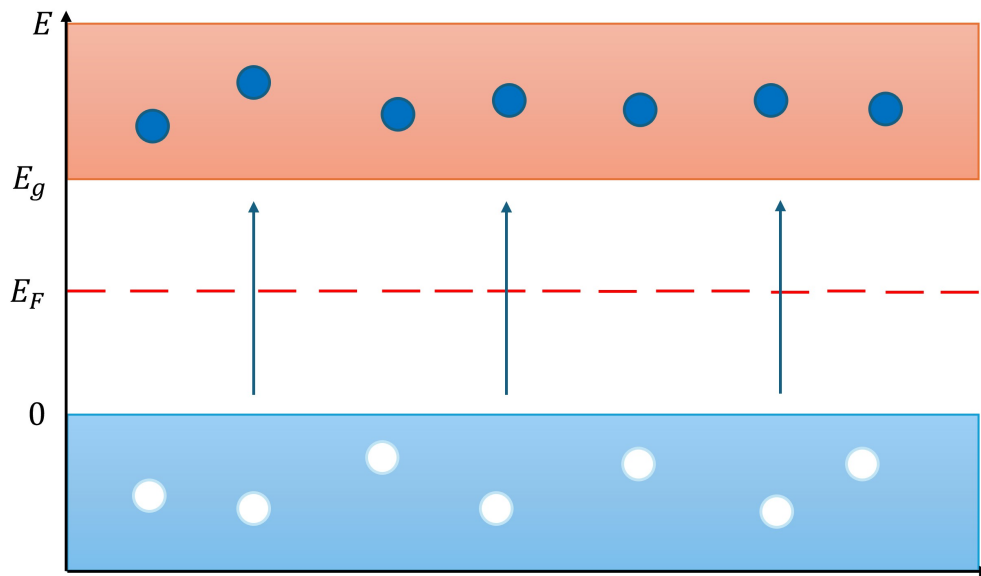


Figura 1: Diagrama Bandas 1

2. Al material anterior, se le realiza un dopaje de impurezas de fósforo a la misma temperatura con una concentración de $2 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$. Indique el tipo de dopaje, calcule las concentraciones de electrones y huecos usando el método exacto y aproximado. Por último, dibuje el diagrama de bandas.

Para resolver este problema es necesario conocer el tipo de dopaje sobre el material que estamos analizando. Dado que el material de silicio está dopado con fósforo (dopaje donador, grupo V), se tiene que es un conductor extrínseco tipo n. Luego se deben calcular las concentraciones planteando la ecuación de ley de acción de masas ($n_i^2 = n \cdot p$) y la ecuación de neutralidad del semiconductor ($n + N_A = p + N_D$). Dado que estamos ante un semiconductor dopado tipo n (sólo hay donadores), $N_A = 0 \text{cm}^{-3}$ y $N_D = 2 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$.

De esta forma usando el método exacto tenemos:

$$n_i^2 = n \cdot p \rightarrow (5 \cdot 10^{12})^2 = n \cdot p \rightarrow \frac{(5 \cdot 10^{12})^2}{n} = p \quad (1)$$

$$n = p + N_D \rightarrow n - p - 2 \cdot 10^{17} = 0 \quad (2)$$

Reemplazando (1) en (2):

$$n - \frac{5 \cdot 10^{12}}{n} - 2 \cdot 10^{17} = 0 \quad (3)$$

Multiplicando por n a ambos lados:

$$n^2 - 2 \cdot 10^{17}n - (5 \cdot 10^{12})^2 = 0 \quad (4)$$

Cuyas soluciones son $n_1 = 2.00000000125 \cdot 10^{17}$ y $n_2 = -1.25 \cdot 10^8$ y, dado que una concentración negativa no posee significado físico, se descarta n_2 y nos quedamos con la solución n_1 , por lo que $n = 2.00000000125 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$.

Luego calculamos p utilizando la ecuación (2) y reemplazando el valor obtenido n se llega a que $p = 1.249999999 \cdot 10^8 \text{cm}^{-3}$.

El método exacto puede resultar tedioso al emplear una ecuación cuadrática. Afortunadamente, existe un método alternativo, el aproximado. Para este otro método se debe analizar la ecuación de neutralidad en este caso:

$$(n = p + N_D) \quad (5)$$

Luego notamos que al ser un material de tipo n , uno debe esperar que la concentración de electrones (n) sea mucho mayor a la de huecos (p). Por lo tanto, es razonable suponer que la concentración de electrones debe ser de un orden similar a la concentración de donadores para mantener la igualdad de cargas en el semiconductor (donde la carga positiva debe igualar a la negativa). Por consiguiente, se puede aplicar la aproximación $N_D \approx n$, dado que el valor de p es significativamente menor comparado a N_D .

Aplicando la aproximación en (5) se cumple que $N_D \approx 2 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$. Usando la ecuación de ley de acción de masas obtenemos que $p = 1.25 \cdot 10^8 \text{cm}^{-3}$.

Se puede notar que los resultados obtenidos con el método aproximado son muy similares a los del método exacto, por lo que este será el método utilizado en el resto de problemas de semiconductores en el curso.

En el diagrama de bandas 6 se puede notar que hay electrones que saltan desde el nivel de energía E_D (nivel de energía de donadores) debido al dopaje con un átomo donador (fósforo), con lo que además de los electrones que saltan desde la banda de valencia, aparecen más electrones que saltan desde el nivel de donadores, que al saltar dejan un hueco en dicho

nivel. Además, el nivel de energía de Fermi aumenta y se acerca a la banda de conducción.

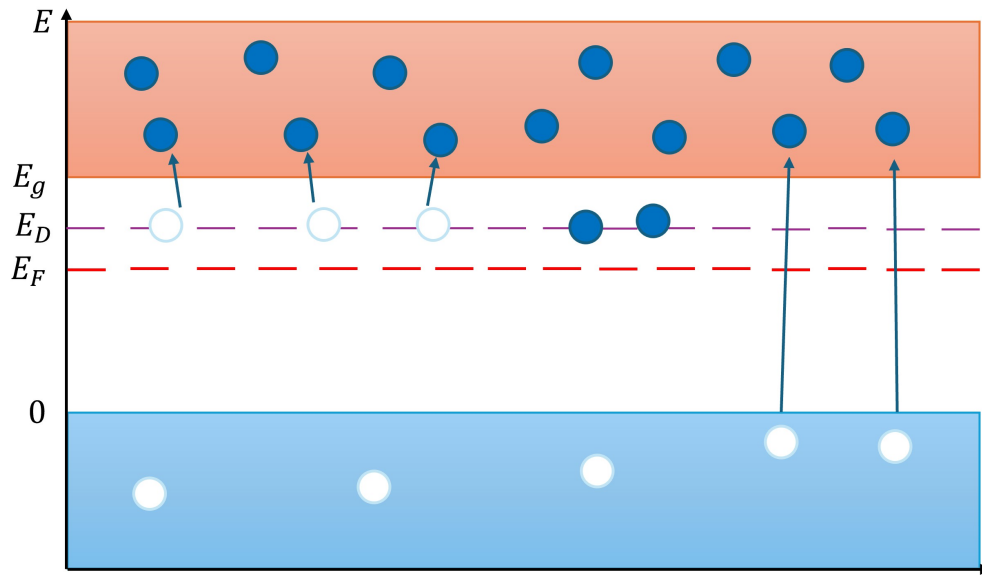


Figura 2: Diagrama Bandas 2 (Tipo N)

3. Su supervisor le indica que el silicio subió de precio y la empresa decide fabricar semiconductores con sólidos de germanio pero se desconoce su concentración intrínseca, no obstante, por requisitos se requiere una concentración de electrones de $9 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$. Además, se realiza un dopaje con impurezas de galio con concentración de 10^{17} cm^{-3} , calcule la concentración intrínseca y dibuje el diagrama de bandas.

Usando una tabla periódica se puede saber que el galio es un elemento del grupo III, por lo que este posee 3 electrones de valencia. De esta forma, tenemos un semiconductor extrínseco de germanio dopado con impurezas de galio, por lo que es un semiconductor extrínseco tipo p (aceptor).

Luego, por enunciado se tiene que $n = 9 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$, $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ y $N_D = 0 \text{ cm}^{-3}$, dado que no se indica la existencia de impurezas donadoras. Planteando la ecuación de neutralidad, se tiene:

$$n + N_A = p \quad (6)$$

Reemplazando los datos del enunciado, se llega a que $p = 1.00000009 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. En este contexto es válido realizar la aproximación $p = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Notar que dicha aproximación es equivalente a plantear que $p \approx N_A$, la cual es la aproximación que se debe utilizar para semiconductores extrínsecos tipo p.

Una vez obtenido p , se calcula el valor de n_i con la ecuación de ley de acción de masa:

$$n_i^2 = n \cdot p \rightarrow n_i = \sqrt{9 \cdot 10^9 \cdot 10^{17}} = 3 \cdot 10^{13} \quad (7)$$

Por lo tanto, $n_i = 3 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-3}$.

En el diagrama de bandas se puede observar que el nivel de Fermi disminuye acercándose a la banda de Valencia. Por otro lado, aparece el nivel de energía de aceptores, un nivel en el cual es permitido que los electrones salten y se quedan allí, de tal forma que dejen un hueco en la banda de valencia y aumenten la conductividad eléctrica (de huecos). Esto debe al hecho de dopar con un átomo aceptor, el galio.

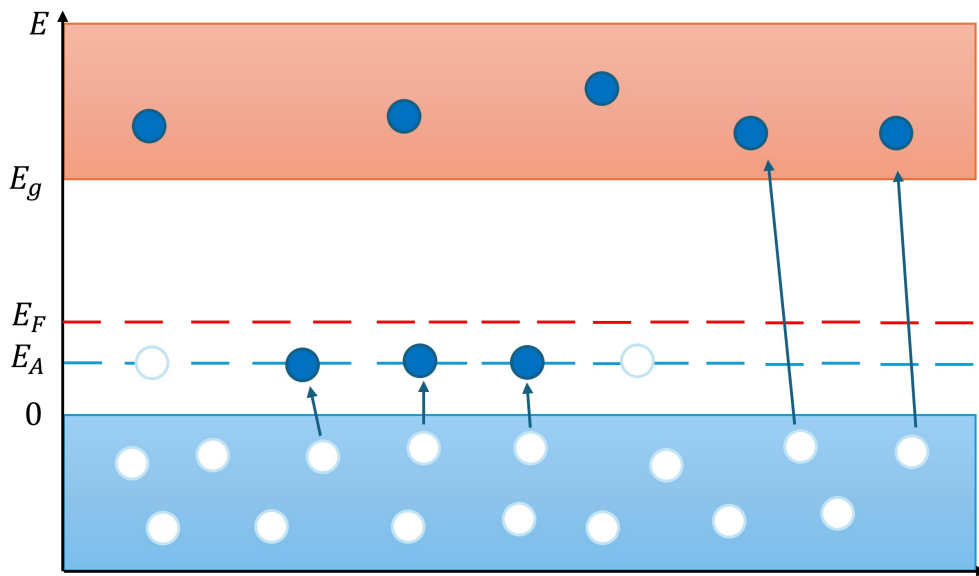


Figura 3: Diagrama Bandas 2 (Tipo N)

4. Se realiza un segundo dopaje al semiconductor anterior usando impurezas de fósforo (misma concentración de 2.), de tal forma que una mitad del semiconductor está dopado con fósforo y la otra con Galio (Juntura). Se le solicita determinar las concentraciones de equilibrio, el voltaje de inhibición de la juntura y el dibujo de diagrama de bandas.

En este caso se tiene una juntura, por lo que, para resolver el problema, debemos analizar cada uno de los lados de manera independiente, planteando las ecuaciones de semiconductores para calcular las concentraciones de electrones y huecos. Se usa el valor de $n_i = 3 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-3}$ calculado en el problema anterior.

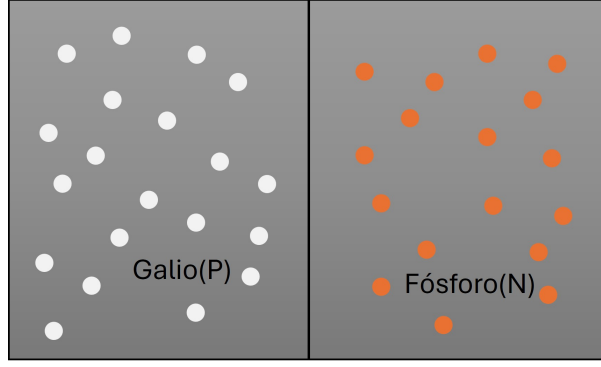


Figura 4: Juntura pregunta 2

Iniciamos el análisis con la región derecha tipo N (se puede partir también con la región P). Al pararnos a analizar esta región, tendremos que $N_{An} = 0 \text{ cm}^{-3}$ y que $N_{Dn} = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, pues esta zona está dopada sólo con fósforo.

Usando la ecuación de neutralidad de semiconductor:

$$n_n = n_n + N_{nD} \rightarrow n_n = p_n + 2 \cdot 10^{17} \quad (8)$$

Usando la aproximación, se tiene que $n_n \approx N_{Dn}$, por ello, $n_n = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Luego, usamos la ecuación de ley de acción de masas:

$$n_i^2 = p_n \cdot n_n \rightarrow p_n = \frac{n_i^2}{n_n} \rightarrow p_n = \frac{(3 \cdot 10^{13})^2}{2 \cdot 10^{17}} \quad (9)$$

Al calcular el valor, se obtiene que $p_n = 4.5 \cdot 10^9$.

Ahora analizamos el izquierdo, el lado P, donde se tiene que $N_{Dp} = 0$ y $N_{Ap} = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Se plantea la ecuación de neutralidad:

$$n_p + N_{Ap} = p_p \rightarrow n_p + 10^{17} = p_p \quad (10)$$

Usando la aproximación de tipo p, se tiene que $p_p \approx N_{Ap}$, por lo que $p_p = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Planteando entonces la ecuación de ley de acción de masas:

$$n_i^2 = p_p \cdot n_p \rightarrow n_p = \frac{n_i^2}{p_p} \rightarrow n_p = \frac{(3 \cdot 10^{13})^2}{10^{17}} \quad (11)$$

Con ello, se tiene que $n_p = 9 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$.

Para calcular el voltaje de inhibición utilizamos la siguiente fórmula:

$$V_0 = V_T \ln\left(\frac{n_n}{n_p}\right) = V_T \ln\left(\frac{p_p}{p_n}\right) \quad (12)$$

Luego eligiendo la primera expresión (también es válida la segunda) reemplazando las concentraciones calculadas y considerando que estamos a una temperatura de $T = 300 \text{ K}$,

$$V_T = 0.025[V]:$$

$$V_0 = 0.025 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot 10^{17}}{9 \cdot 10^9}\right) \quad (13)$$

Con lo que se obtiene que el voltaje de inhibición de la juntura es $V_0 = 0.4229[V]$.

Por último, en el diagrama de bandas se puede observar que al juntarse las regiones, en el nivel de Fermi se mantiene en un valor constante, lo que indica la existencia de una diferencia de voltaje (voltaje de inhibición y una diferencia de concentraciones de portadores entre ambas regiones, donde hay una mayor concentración de huecos en la banda de valencia de la región p y una mayor concentración de electrones en la banda de conducción de la región n.

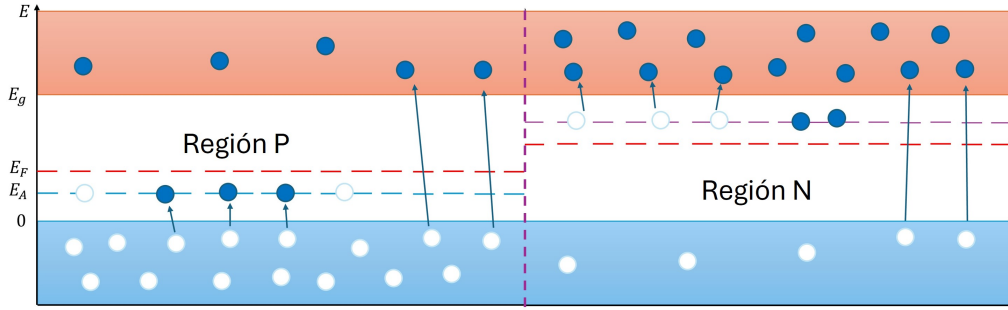


Figura 5: Diagrama Juntura sin equilibrio

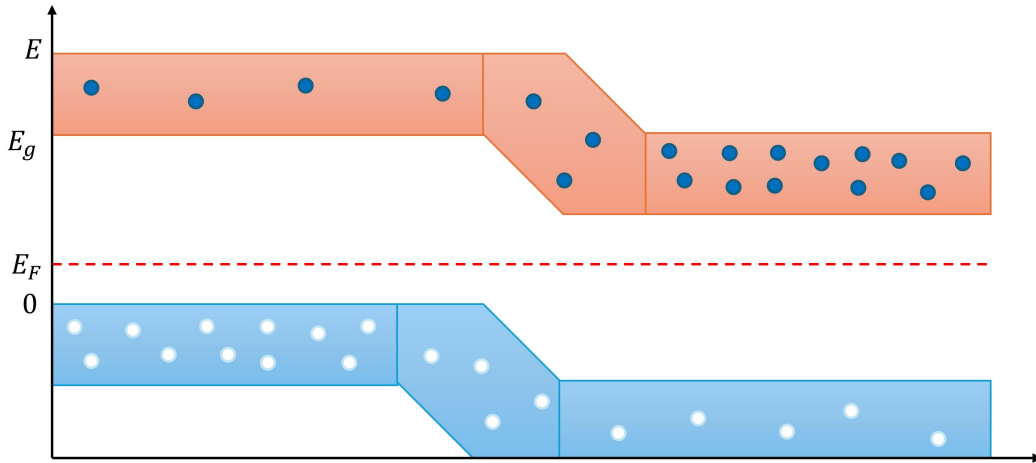


Figura 6: Diagrama Juntura con equilibrio

Finalmente, y luego de un arduo mes de trabajo, su supervisor se da cuenta de que existe un voltaje de $0.2 [V]$ que se opone al voltaje V_0 (inhibición), por lo que le solicita que calcule las nuevas concentraciones de equilibrio antes de que se vaya de viaje con sus amigos a La Serena y olvide todo lo aprendido en su práctica.

Para resolver este último problema se debe utilizar las siguientes fórmula para las con-

centraciones de equilibrio:

$$P_{n0} = p_n \cdot e^{\frac{V}{V_T}} \quad (14)$$

$$N_{p0} = N_p \cdot e^{\frac{V}{V_T}} \quad (15)$$

Donde reemplazando los datos ya calculados, considerando que $V = 0.2[V]$ se tiene:

$$P_{n0} = 4.5 \cdot 10^9 \cdot e^{\frac{0.2}{0.025}} \quad (16)$$

$$N_{p0} = 9 \cdot 10^9 \cdot e^{\frac{0.2}{0.025}} \quad (17)$$

Luego se obtiene que $P_{n0} = 1.341 \cdot 10^{13} cm^{-3}$ y $N_{p0} = 2.6828 \cdot e^{\frac{0.2}{0.025}} cm^{-3}$.