

*Problemas de  
Dispositivos Electrónicos*



E.T.S.I.T.  
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

Benito González Pérez  
Antonio Hernández Ballester  
Javier García García

## PROBLEMAS DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS. 3º ETSIT FUNDAMENTOS

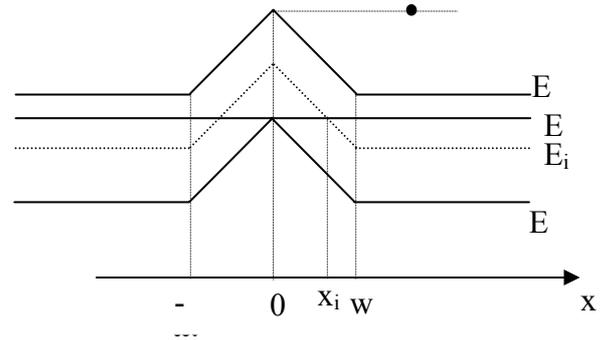
1. Con base en el modelo de bandas de energía para un semiconductor, indicar cómo se representa
  - a. un electrón,
  - b. un hueco,
  - c. niveles donadores,
  - d. niveles aceptores,
  - e. la congelación de electrones en los niveles donadores a 0K,
  - f. la congelación de huecos en los niveles aceptores a 0K,
  - g. la distribución de energías de los portadores en las bandas respectivas,
  - h. un semiconductor intrínseco,
  - i. un semiconductor tipo n,
  - j. un semiconductor tipo p,
  - k. un semiconductor no degenerado, y
  - l. un semiconductor degenerado.
  
2. Responder a las siguientes cuestiones:
  - a. En condiciones de equilibrio y a una temperatura superior a cero Kelvins, ¿cuál es la probabilidad de que un estado electrónico esté ocupado si su posición coincide con el nivel de Fermi?,
  - b. Si  $E_F$  coincide con  $E_C$ , determinar la probabilidad de hallar electrones en los estados de energía  $E_C+kT$
  
3. Las funciones de densidad de estados de un semiconductor hipotético son
$$g_C(E)=N_C/kT, \text{ si } E \geq E_C$$
$$g_V(E)=N_V/kT, \text{ si } E \leq E_V$$
Deducir expresiones para las concentraciones de portadores en dicho semiconductor.
  
4. En una muestra de Si uniformemente dopada, determinar las concentraciones de equilibrio de electrones y huecos en las siguientes condiciones:
  - a. temperatura ambiente,  $N_A \ll N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,
  - b. temperatura ambiente,  $N_D \ll N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,
  - c. temperatura ambiente,  $N_A = 9 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,
  - d.  $T=450 \text{ K}$ ,  $N_A=0$ ,  $N_D=10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ,
  - e.  $T=650 \text{ K}$ ,  $N_A=0$ ,  $N_D=10^{14} \text{ cm}^{-3}$ .
  
5. Para cada una de las condiciones especificadas en el problema anterior, determinar la posición del nivel intrínseco, calcular la diferencia entre el nivel de Fermi y el intrínseco, y dibujar el diagrama de bandas de energía de la muestra.  
Nota: el gap de energías del Si es 1,08 eV a 450 K y 1,015 eV a 650 K
  
6. Consideraciones sobre el GaAs:
  - a. Dibujar un diagrama de las densidades de estado conforme al hecho de que las masas efectivas son diferentes,
  - b. El nivel intrínseco ¿se hallará ligeramente por encima o por debajo de la mitad de la banda prohibida?,
  - c. Determinar la posición exacta del nivel de Fermi intrínseco a temperatura ambiente,
  - d. Determinar las concentraciones máximas no degeneradas de donadores y aceptores a temperatura ambiente.
  
7. Dada una muestra de Si dopada con  $N_D=10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ,
  - a. Presentar un razonamiento cualitativo para determinar la posición aproximada del nivel de Fermi a cero K.
  - b. Calcular  $E_F$  en función de la temperatura del material a intervalos de 50K desde 300K a 500K.
  - c. ¿A qué conclusión general se llega en relación a la posición del nivel de Fermi en función de la temperatura?
  - d. ¿Cómo se modifican las respuestas anteriores si la muestra de Si estuviera dopada con impurezas aceptoras en lugar de donadoras?

8. Usando el diagrama de bandas de energía, indicar cómo se puede visualizar:
- la existencia de un campo eléctrico dentro de un semiconductor,
  - un electrón con energía cinética nula,
  - un hueco con energía cinética  $E_g/4$ ,
  - la fotogeneración,
  - la generación térmica directa,
  - la recombinación térmica directa,
  - la recombinación por centros R-G
  - la generación por centros R-G.

- 9.
- Una muestra de silicio mantenida a temperatura ambiente está uniformemente dopada con  $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  átomos donadores. Calcular la resistividad de la muestra. Comparar el resultado con el que se obtiene de la figura 3.7.
  - La anterior muestra de silicio se compensa añadiendo  $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  átomos aceptores. Calcular la resistividad de la muestra compensada.
  - Calcular la resistividad del silicio intrínseco a temperatura ambiente. ¿Cómo se compara el resultado aquí obtenido con el del apartado b)?
  - Se desea fabricar una resistencia de  $500 \Omega$  con una barra de silicio tipo n. La barra tiene un área de sección transversal  $0,01 \text{ cm}^2$  y una longitud de 1 cm. Determinar la concentración de impurezas.

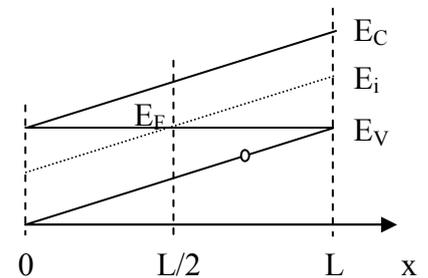
10. Un semiconductor, a temperatura ambiente, está caracterizado por el siguiente diagrama de bandas de energía:

- ¿Cómo es el potencial interno (V) del semiconductor?
- ¿Cómo es el campo eléctrico ( $\epsilon$ ) en el semiconductor?
- ¿Se dan las condiciones de equilibrio?
- ¿Dónde es degenerado el semiconductor?
- ¿Cómo es la concentración de electrones en una gráfica semilogarítmica:  $\ln(n)-x$ ?
- Calcular la densidad de corriente de arrastre de los electrones en  $x=x_i$ .
- Calcular la densidad de corriente de difusión de huecos en  $x=x_i$ .
- ¿Cuál es la energía cinética del electrón que aparece en el diagrama?

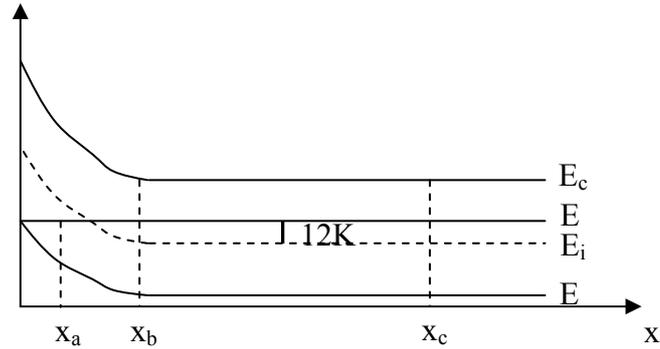


11. Un semiconductor bajo condiciones de equilibrio térmico está caracterizado por el siguiente diagrama de bandas. Considerando  $E_G = 1.12 \text{ eV}$ ,  $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  y  $KT = 0.026 \text{ eV}$ , determinar:

- Las concentraciones  $n$  y  $p$  en  $x=L/2$ .
- Las concentraciones  $n$  y  $p$  en  $x=L/4$ .
- ¿Para qué valores de  $x$ , si existen, el semiconductor es degenerado?
- ¿Cuál es la energía cinética del hueco indicado en el diagrama?
- ¿Cuál es la variación con  $x$  del campo eléctrico existente en el semiconductor?
- Si  $L = 1 \text{ cm}$ , ¿cuál es el valor del campo eléctrico dentro del semiconductor?

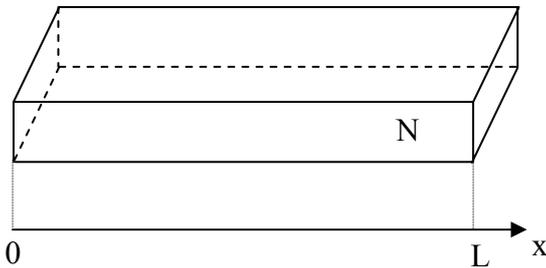


12. Un semiconductor está caracterizado por el diagrama de bandas de energía siguiente:



Si  $E_G=1.12$  eV,  $KT=0.026$  eV,  $n_i=10^{10}$   $\text{cm}^{-3}$ ,  $\mu_p=470$   $\text{cm}^2/\text{Vs}$  y  $\tau_p=10^{-6}$  s.

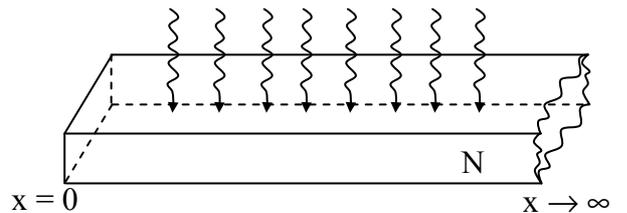
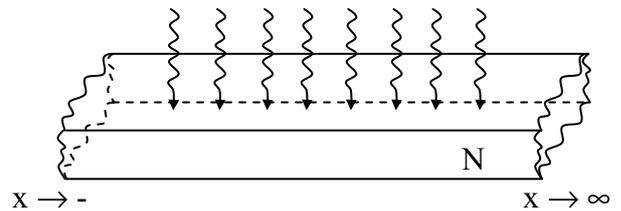
- ¿Cómo varía el potencial dentro del semiconductor en función de  $x$ ?
- ¿Cuál es la dependencia con  $x$  del campo eléctrico dentro del semiconductor?
- ¿Podremos considerar siempre situación clásica? ¿dónde no?
- ¿Cómo se modifica la concentración de huecos con la posición? Indicar sus valores numéricos en  $x=x_a$  y  $x=x_c$ .
- ¿Existe corriente de arrastre de huecos en  $x=x_a$ ? ¿Existe corriente de difusión de huecos en  $x=x_a$ ? ¿Cuál es la densidad de corriente de huecos total en  $x=x_a$ ?
- Supongamos que se introduce un exceso de huecos en  $x=x_c$ . Si  $x_c-x_b=10^{-2}$  cm, ¿llegará un número significativo de huecos a  $x_b$ ?



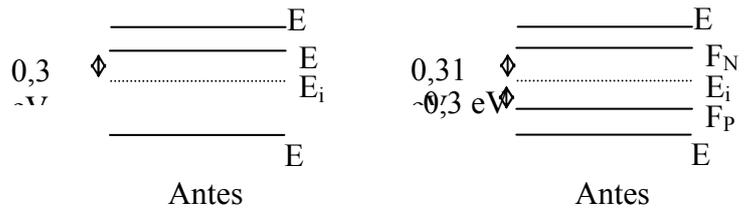
13. Una barra de silicio tipo n uniformemente dopada, de longitud  $L$ , se mantiene a temperatura ambiente en condiciones estacionarias de forma que  $\Delta p_n(0) > 0$  y  $\Delta p_n(L) = 0$ . Se sabe que  $N_D=10^{15}$   $\text{cm}^{-3}$ ,  $\Delta p_n \ll n_0$ , y  $n_0$  se producen dentro de la barra otros procesos. Calcular la solución general para  $\Delta p_n(x)$ .

14.

- Una barrera de Si uniformemente impurificada se ilumina a partir de un instante  $t=0$  generándose  $G_L$  pares de  $e-h^+$  por  $\text{cm}^3$  y por segundo en el volumen del semiconductor. Determinar las concentraciones de los portadores en función del tiempo.
- Consideremos ahora una muestra semi-infinita de la barra anterior, que alcanzó una situación estacionaria. En esta situación, extraemos en  $x=0$  el exceso de portadores. Determinar las concentraciones de portadores en la nueva situación estacionaria. ¿Qué implica la condición de que el exceso de portadores ha desaparecido en  $x=0$ ? ¿Existirá un campo eléctrico en esta barra semiconductor? Si es así, calcularlo.



15. Las situaciones de equilibrio y de régimen estacionario de un semiconductor, antes y después de su iluminación, están caracterizadas por los diagramas de bandas de energía que aparecen en la figura.  $T=300\text{ K}$ ,  $n_i=10^{10}\text{ cm}^{-3}$ ,  $\mu_n=1345\text{ cm}^2/\text{Vs}$  y  $\mu_p=458\text{ cm}^2/\text{Vs}$ . A partir de esta información determinar:



- las concentraciones de portadores de equilibrio,  $n_0$  y  $p_0$ ,
- $n$  y  $p$  en condiciones estacionarias,
- $N_D$ ,
- ¿Se tiene bajo nivel de inyección cuando se ilumina el semiconductor?
- ¿Cuál es la resistividad del semiconductor antes y después de la iluminación?

16. Una región ( $0 \leq x \leq L$ ) de una muestra de silicio, dopada uniformemente con  $N_D=10^{15}\text{ cm}^{-3}$  átomos donadores que se encuentra a temperatura ambiente, está sometida a una perturbación en régimen estacionario de tal forma que, para  $0 \leq x \leq L$  se cumple:

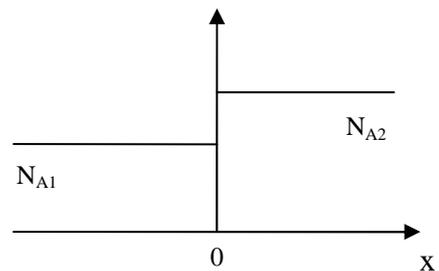
$$n \approx N_D$$

$$p = n_i \left( 1 - \frac{x}{L} \right) + \frac{n_i^2}{N_D}$$

Puesto que  $n \approx N_D$ , es razonable suponer que  $\epsilon \approx 0$  en la región  $0 \leq x \leq L$ . Considerando  $\epsilon \approx 0$ , dibujar el diagrama de bandas de energía para la región perturbada, incluyendo explícitamente  $E_C$ ,  $E_i$ ,  $F_N$  y  $F_P$ .

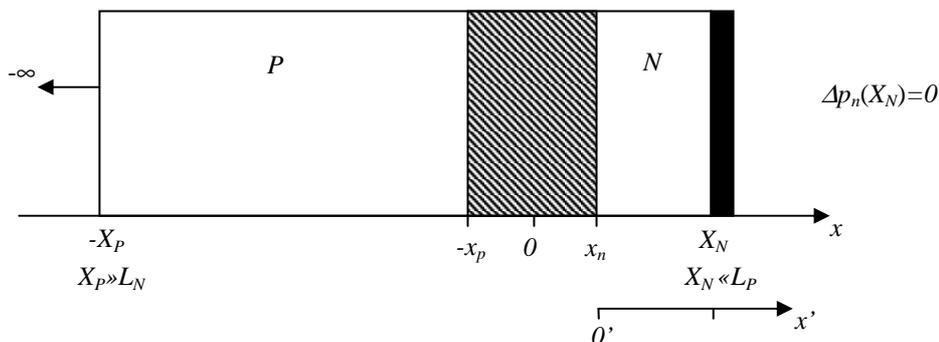
## PROBLEMAS DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS. 3º ETSIT EL DIODO

1. Una unión abrupta de silicio, aproximada por una unión escalón, tiene un dopado de  $N_D=10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_A=5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , y una sección transversal ( $A$ ) de  $10^{-4} \text{ cm}^2$ . Suponga una aproximación por vaciamiento,  $V_A=0$  y  $n_i=10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , y :
  - a) Calcule  $V_{bi}$ .
  - b) Calcule  $x_n$ ,  $x_p$  y la anchura total de la región de vaciamiento.
  - c) ¿Cuál es la carga iónica positiva total en la región de vaciamiento?
  - d) Calcule el campo eléctrico en  $x=0$ .
  - e) Trace el diagrama de densidad de cargas y campo eléctrico respecto al eje  $x$  desplazado.
  - f) Calcule los valores de  $n_p$  y  $p_n$  en las regiones masivas.
  - g) Dibuje los diagramas de bandas de energía del dispositivo.
  - h) ¿Qué porcentaje de  $W$  es la región de vaciamiento  $p$ , y cuál la región de vaciamiento  $n$ ?
  
2. Un diodo de unión escalón  $p^+-n$  tiene un dopado de  $N_D=10^{15} \text{ cm}^{-3}$  y  $N_A=10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Si  $kT=0,026 \text{ eV}$  y  $n_i=10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , calcule:
  - a)  $V_{bi}$ .
  - b)  $x_n$ ,  $x_p$ ,  $W$  y el campo eléctrico en  $x=0$ .
  - c) Si  $V_A=0,4 \text{ V}$ , los nuevos valores de  $x_n$ ,  $x_p$ ,  $W$  y el campo eléctrico en  $x=0$ .
  - d) Si  $V_A=-3 \text{ V}$ , los nuevos valores de  $x_n$ ,  $x_p$ ,  $W$  y el campo eléctrico en  $x=0$ .
  - e) De los resultados del punto d), calcule el cambio en porcentaje en  $x_n$  y  $W$  del caso  $V_A=0 \text{ V}$ .
  - f) ¿Qué concepto intenta ilustrar este problema?
  
3. En el caso de un diodo de unión escalón de silicio, mantenido a temperatura ambiente, éste es dopado de modo que  $E_F=E_V+2kT$  del lado  $p$ , y  $E_F=E_C-E_G/4$  del lado  $n$ ; la sección transversal  $A=10^{-3} \text{ cm}^2$ .
  - a) Trace el diagrama de bandas de energía en equilibrio para este diodo.
  - b) Determine la tensión interna  $V_{bi}$ , como resultado simbólico y numérico. Haga  $kT=0,026 \text{ eV}$ .
  
4. Se tiene una unión escalón de silicio, dopada como  $p_1$  y  $p_2$ , según se puede ver en la figura, en la cual  $N_{A1}<N_{A2}$ . Este tipo de unión se denomina unión "isotipo", porque tiene el mismo tipo de dopado en ambos lados.
  - a) Trace el diagrama de bandas de energía con el material de dopado más débil hacia el lado izquierdo.
  - b) Deduzca una expresión para la  $V_{bi}$  del diagrama de bandas de energía.
  - c) Basado en el diagrama de bandas de energía, trace la densidad de carga aproximada, el campo eléctrico y el potencial.
  - d) Explique de donde proviene la densidad de cargas y dónde está ubicada.



5. Trace el diagrama de bandas de energía para un diodo de unión escalón  $p^+-n$  en:
  - a) Equilibrio térmico.
  - b) Polarización directa (mostrado respecto al equilibrio térmico).
  - c) Polarización inversa (mostrado respecto al equilibrio térmico).
  - d) En el punto a), dibuje un nuevo diagrama que muestre el flujo de portadores y los cuatro componentes de corriente relacionados entre sí.

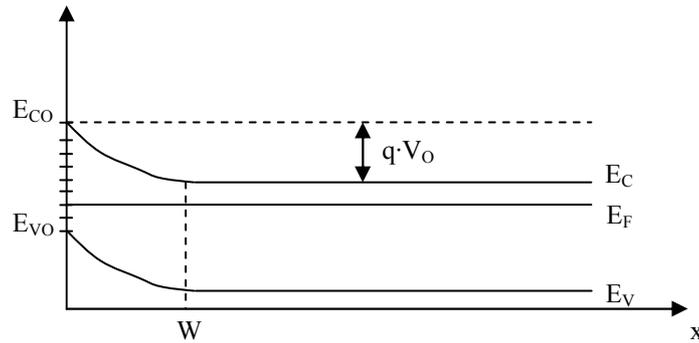
6. Una unión escalón de silicio tiene  $N_A=5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  y  $N_D=10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $D_N=33,75 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $D_P=12,4 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $n_i=10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ,  $kT=0,026 \text{ eV}$ ,  $A=10^{-4} \text{ cm}^2$ ,  $\tau_p=0,4 \mu\text{s}$  y  $\tau_n=0,1 \mu\text{s}$ . Calcule:
- La corriente de saturación inversa debida a huecos.
  - La corriente de saturación inversa debida a electrones.
  - La corriente de saturación inversa,  $I_o$ .
  - Si  $V_A=V_{bi}/2$ , calcule:
    - la concentración de huecos y la concentración de huecos inyectados en  $x_n$ .
    - la concentración de huecos en  $x'=L_p/2$ .
    - la concentración de electrones y la concentración de electrones inyectados en  $x_p$ .
    - la concentración de electrones en  $x'=L_n/2$ .
  - Repetir el apartado d) si  $V_A=-V_{bi}/2$ .
  - La carga total de huecos inyectada (o vaciada) para los puntos d) y e).
  - ¿Para qué valor de  $V_A$  y en qué lugar del diodo se contraviene por primera vez la hipótesis de bajo nivel de inyección? Utilice como criterio que los portadores minoritarios alcancen una concentración del 10% de la de los mayoritarios.
7. Dos diodos unión escalón  $p^+-n$  de silicio mantenidos a temperatura ambiente son idénticos, excepto en  $N_{D1}=10^{15} \text{ cm}^{-3}$  y  $N_{D2}=10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Trace ambos diagramas sobre unos ejes coordenados, y compare las características  $I-V$  de ambos diodos.
8. Si la unión escalón está polarizada en forma directa:
- Deduzca una ecuación que dé la carga total  $Q_p$  de portadores minoritarios inyectados en la región masiva  $n$ .
  - Deduzca una ecuación que dé la carga total  $Q_n$  de portadores minoritarios inyectados en la región masiva  $p$ .
  - Si cada  $\tau_p$  segundos recombina  $Q_p$ , ¿cuál es la corriente de recombinación de huecos?
  - Si cada  $\tau_n$  segundos recombina  $Q_n$ , ¿cuál es la corriente de recombinación de electrones?
  - Establezca un enunciado sobre recombinación y corriente, como resultado de los puntos c) y d), recordando que el tiempo de vida de un portador minoritario es el tiempo promedio de recombinación.
  - ¿Cuál es la corriente de recombinación total inyectada (huecos más electrones)? ¿Cómo compara esta ecuación con la del diodo ideal?
9. La figura describe lo que se denomina “diodo de base corta”.
- Deduzca una ecuación para obtener  $\Delta p_n(x')$  y trace un diagrama de  $p_n(x')$  si:
    - tiene polarización directa,
    - tiene polarización inversa.
  - Deduzca una ecuación para obtener  $J_p(x')$  en la región  $n$ , y trace un diagrama para polarización directa.
  - Utilice los resultados de clase para obtener  $J_n$  en la región  $p$ , y obtenga una ecuación para la curva característica  $I-V$  del diodo de base corta ideal.
  - Dibuje los diagramas para los puntos a) y b) con polarización inversa.
  - ¿Cuál es la relación entre la corriente de huecos y la corriente total?
  - Si se hiciera  $X_N$  aún más pequeña, explique cómo afectaría a la corriente de huecos inyectada en la región  $n$ .



## AMPLIACIÓN DE FÍSICA DE LOS DISPOSITIVOS PROBLEMAS – EL CONDENSADOR MOS

1. Para los valores de los parámetros  $\phi_F$  y  $\psi_S$  listados a continuación, indicar las condiciones de polarización y dibujar los diagramas de bandas y de carga que caracterizan la situación estática del sistema. Asumir estructura MOS ideal:
  - a)  $\phi_F=12$ ,  $\psi_S=12$ . b)  $\phi_F=-9$ ,  $\psi_S=3$ . c)  $\phi_F=9$ ,  $\psi_S=18$ . d)  $\phi_F=15$ ,  $\psi_S=36$ . e)  $\phi_F=-15$ ,  $\psi_S=0$
2. Considerando Si mantenido a 23 °C ( $\epsilon_{s,r}=11.8$ ,  $kT/q=0.0255$  V,  $n_i=8.6\cdot 10^9$  cm<sup>-3</sup>) con una concentración de impurezas  $N_A=10^{15}$  cm<sup>-3</sup>, calcular:
  - a)  $L_D$ . b)  $\phi_F$ . c)  $E_s$  cuando  $\psi_S=\phi_F$ . d)  $E_s$  cuando  $\psi_S=2\phi_F$ . e)  $W$  cuando  $\psi_S=\phi_F$ . f)  $W_T$
3. Consideraremos un condensador SOS (Semiconductor-Óxido-Semiconductor) obtenido reemplazando el terminal metálico de puerta de un condensador MOS estándar por un semiconductor, y asumamos estructura ideal con ambos electrodos idénticos (Si tipo N no degenerado).
  - a) Dibujar los diagramas de banda de esa estructura cuando: a.1)  $V_G=0$ ; a.2)  $V_G>0$ , pero pequeña; a.3)  $V_G>0$  y muy grande; a.4)  $V_G<0$ , pero pequeña; a.5)  $V_G<0$  y muy grande
  - b) Dibujar los diagramas de carga correspondientes a las cinco situaciones de polarización indicadas en el apartado a).
  - c) Cómo serían las curvas C-V, en alta frecuencia, para esa estructura SOS. Compararlas con las curvas del condensador MOS estándar.
4. Consideremos un condensador MOS ideal con  $t_{ox}=0.2$  μm,  $N_D=10^{15}$  cm<sup>-3</sup>,  $\epsilon_{ox}=3.9$ ,  $\epsilon_{s,r}=11.8$  y  $T=23$  °C. Calcular:
  - a)  $V_\delta$ . b)  $W_T$ . c)  $V_T$ . d) Empleando la aproximación  $\delta$ -capa vacía, obtener una representación gráfica aproximada de la curva  $C/C_0$  frente a  $V_G$ , en el intervalo entre 0 y  $V_T$ . Dibujar también la curva en situación de acumulación e inversión (alta frecuencia) ¿Cómo sería la curva si el semiconductor estuviese en situación de vaciamiento profundo? (Construir la curva  $C/C_0 - V_G$  en esta situación hasta valores de  $V_G=-5$  V).
5. En muchos dispositivos MOS la puerta está formada por Si policristalino fuertemente dopado. Consideremos un condensador MOS con una puerta de Si donde  $E_F=E_C$  en la puerta fuertemente dopada, y  $E_C-E_F=0.2$  eV en el sustrato de Si no degenerado. Asumiendo estructura ideal, excepto el hecho de que  $\phi_{ms}\neq 0$ ,
  - a) dibujar el diagrama de bandas de esta estructura bajo condición de banda plana,
  - b) ¿cuál sería la diferencia entre las funciones de trabajo en esta estructura?,
  - c) ¿estará esta estructura en situación de acumulación, vaciamiento o inversión, cuando  $V_G=0$ ?
6. Analicemos los desplazamientos en las curvas C-V de un condensador MOS resultantes de ciertas no idealidades.
  - a) Consideremos una estructura MOS como una puerta de  $C_T$  y una concentración de impurezas en el sustrato  $N_D=10^{15}$  cm<sup>-3</sup>. Si  $Q_M=0$ ,  $Q_F=0$  y  $Q_{IT}=0$ , determinar el valor de la tensión de puerta necesario para obtener la condición de banda plana. Usar  $kT=0.0255$  eV,  $n_i=8.6\cdot 10^9$  cm<sup>-3</sup> y  $E_G=1.12$  eV.
  - b) En un condensador MOS existe una distribución uniforme de iones de Na en el óxido, tal que  $\rho_{ox}(x)=\rho_o$  en todo el óxido. Calcular el desplazamiento resultante en las curvas características si  $\rho_o/q=10^{18}$  cm<sup>-3</sup>  $\equiv$  concentración de iones,  $t_{ox}=0.1$  μm y  $\epsilon_{ox}=3.9$ .
  - c) Un sustrato de (111)-Si se oxida térmicamente y a continuación se somete a un recocido en una atmósfera de N<sub>2</sub> a 1000 °C durante un tiempo suficiente, alcanzándose una situación estacionaria. Tras la deposición de una capa de Al, la estructura se calienta de nuevo (recocido postmetalización). El condensador MOS resultante es estable bajo la prueba BT ('bias temperature stressing'). Determinar la tensión de banda plana de esta condensador MOS si  $T=23$ °C,  $t_{ox}=0.1$  μm y  $N_A=10^{14}$  cm<sup>-3</sup>. Considerar todas las posibles causas de no idealidad.

7. En la figura se representa el diagrama de bandas de un semiconductor tipo n, en equilibrio, en la región inmediata a una de las superficies. Si la concentración de impurezas en el semiconductor es de  $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , calcular:



- la posición del nivel de Fermi referida al tope de la banda de valencia.
- la carga superficial por unidad de área, si la superficie produce una distribución uniforme de niveles de energía permitida (a los electrones) en la banda prohibida, cuyo número de estados por unidad de energía y superficie vale:  $g(E) = 10^{11} \text{ estados/eV} \cdot \text{cm}^2$ .
- la anchura de la zona de carga de espacio en el semiconductor,  $W$  (considerar que el semiconductor permanece neutro e hipótesis de capa vacía).
- Dibujar cualitativamente las curvas densidad de carga, campo y potencial.
- El valor del campo eléctrico máximo y del potencial,  $V_0$ .

Datos:  $kT/q = 0.025 \text{ V}$ ,  $n_i = 1.5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\epsilon_{r,s}\epsilon_0/q = 6.5 \cdot 10^6 \text{ V}^{-1}\text{cm}^{-1}$ ,  $E_G = 1.1 \text{ eV}$ ,  $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

8. En un sustrato de silicio con  $10^{15}$  átomos de Boro por  $\text{cm}^3$ , se ha construido una estructura MOS que se comporta idealmente. El área de la puerta es  $1 \text{ mm}^2$  y el espesor del óxido de  $0.2 \mu\text{m}$ . Inadvertidamente se toca con los dedos el electrodo de puerta introduciendo carga en el mismo, y provocando la aparición de una zona de depleción en la superficie del semiconductor. El vaciamiento de mayoritarios en la superficie provoca la aparición de un campo eléctrico en el semiconductor que toma un valor de  $1 \text{ V}/\mu\text{m}$  en la interfase óxido/semiconductor. Calcular:

- La anchura de la zona de depleción en superficie en estas condiciones.
- El potencial de superficie del semiconductor.
- La tensión de puerta.
- El valor y signo de la tensión mínima de puerta, para que se produzca inversión fuerte.
- La capacidad de pequeña señal y alta frecuencia en inversión fuerte.
- ¿En qué modo de operación se obtiene el valor máximo de la capacidad? ¿Cuánto vale?

Datos:  $kT/q = 0.025 \text{ V}$ ,  $n_i = 1.5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\epsilon_{r,s}\epsilon_0/q = 6.5 \cdot 10^6 \text{ V}^{-1}\text{cm}^{-1}$ ,  $\epsilon_{r,\text{óx}}\epsilon_0/q = 2.1 \cdot 10^6 \text{ V}^{-1}\text{cm}^{-1}$ ,  $\epsilon_{r,s}\epsilon_0/q = 6.5 \cdot 10^6 \text{ V}^{-1}\text{cm}^{-1}$ ,  $E_G = 1.1 \text{ eV}$ ,  $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

**FÍSICA DE LOS DISPOSITIVOS**  
**PROBLEMAS – EL TRANSISTOR BIPOLAR**

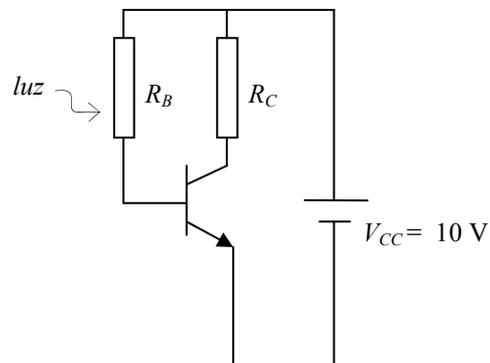
- Un transistor bipolar N<sup>+</sup>PN se encuentra en equilibrio térmico.
  - Dibujar su diagrama de bandas
  - Dibujar el diagrama de la densidad de carga y del campo eléctrico.
  - Dibujar el diagrama del potencial electrostático, suponiendo que  $V=0$  en la región N<sup>+</sup>.
  - Si se encuentra polarizado en la región activa normal, dibujar el diagrama de corrientes.
- Dibujar el diagrama de corrientes y sus tamaños relativos para un dispositivo P<sup>+</sup>NP, operando en las regiones de a) saturación, b) corte y c) activa inversa.
- Considerar la unión emisor-base P<sup>+</sup>N, donde  $V_{cb} > 0$  y  $V_{cb} = 0$ .
  - Determinar el exceso de carga en la base.
  - Determinar la corriente de emisor debida a los huecos.
- Para un dispositivo PNP,  $I_{ep} = 1$  mA,  $I_{en} = 0.01$  mA,  $I_{cp} = 0.98$  mA y  $I_{cn} = 0.0001$  mA. Calcular:
  - Factor de transporte.
  - Eficiencia de emisor.
  - Ganancia en base común y emisor común, e  $I_b$ .
  - Intensidad de saturación de C-B.
  - Si  $I_{cp}$  fuera de 0.99 mA, calcular de nuevo las ganancias.
  - Si  $I_{cp}$  fuera de 0.99 mA e  $I_{en}$  de 0.005mA, calcular de nuevo las ganancias.
  - ¿Cómo cambiaba la ganancia en emisor común si  $I_{en}$  se incrementa?
- Considerar un dispositivo PNP ideal operando en la región activa con los siguientes parámetros:

$n_{e0} = 2.56 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$	$L_b = 46.9 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$	$L_c = 39.5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$
$L_e = 22.8 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$	$D_b = 22 \text{ cm}^2/\text{s}$	$D_c = 15.6 \text{ cm}^2/\text{s}$
$D_e = 5.18 \text{ cm}^2/\text{s}$	$W = 4 \mu\text{m}$	$A = 1.265 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$
$p_{b0} = 6.39 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}$	$N_{c0} = 4.92 \cdot 10^{25} \text{ cm}^{-3}$	$N_{AC} = 2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
$N_{AEG} = 3.9 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	$N_{DB} = 1.57 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	

- Calcular, para  $V_{cb} = 0.67235$  V y  $V_{cb} = -1$  V:
- Las corrientes  $I_{ep}$  e  $I_{en}$ .
  - Las corrientes  $I_{cp}$  e  $I_{cn}$ .
  - Las tres componentes de la corriente de base.
  - Comparar los términos que contienen  $V_{cb}$  con los de  $V_{cb}$ .
  - Calcular la eficiencia de emisor y la ganancia de corriente en emisor común.
- Considerar la unión emisor-base P<sup>+</sup>N, donde  $V_{cb} > 0$  y  $V_{cb} = 0$ .
    - Determinar el exceso de carga en la base.
    - Determinar la corriente de emisor debida a los huecos.
  - Calcular los coeficientes del modelo de Ebers-Moll para el dispositivo ideal del problema 4, y examinar la curva característica  $I_c$ - $V_{ec}$  para los siguientes tres valores de  $V_{cb}$ : a) -1 V. b) 0 V y c) 0.45 V. Considerar que  $I_b = 2 \mu\text{A}$ .
  - Dibujar el diagrama de concentraciones de portadores y el de corrientes para un dispositivo N<sup>+</sup>PN operando en la región activa normal y en la región de saturación.
  - Un dispositivo P<sup>+</sup>NP ideal operando en la región activa normal tiene  $I_c = 961.3 \mu\text{A}$  y  $W = 3 \mu\text{m}$ , cuando  $V_{cb} = 0.65$  V.
    - Si consideramos los efectos de la modulación de la anchura de la base, ¿cómo varía  $I_c$  con respecto a  $W$ ?
    - Si  $W$  está determinado por la expresión típica:  $W = W_b - K(-V_{cb})^{1/2}$ , indica cómo varía  $I_c$  con respecto a  $V_{cb}$ .

10. Dado  $I_{FO} = qAD_b p_{bo}/W$  y  $W = W_b - K(-V_{cb})^{1/2}$ , obtener las ecuaciones para la transconductancias  $g_m$  y la admitancia de salida  $g_o$  en el modelo híbrido en pi.
11. De un transistor PNP de silicio se conocen los siguientes parámetros tecnológicos y geométricos:  $N_E = 10 \text{ cm}^{-3}$ ;  $N_B = 10 \text{ cm}^{-3}$ ;  $N_C = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ;  $A$  (área transversal) =  $10^{-2} \text{ cm}^2$ ;  $W_B = 6 \text{ }\mu\text{m}$ ; la constante de difusión de los huecos en la base,  $D_B = 12 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ ; y su tiempo de vida  $\tau_b = 20 \text{ }\mu\text{s}$ .
- Deducir una expresión general de la anchura efectiva de la zona neutra de base,  $W_B$ , en función de las tensiones de polarización,  $V_{EB}$  y  $V_{CB}$ .
  - Calcular el valor de  $W_B$  para  $V_{EB} = 0,5 \text{ V}$  y  $V_{CB} = -4 \text{ V}$ .
  - Dibujar el perfil de portadores minoritarios en la base para la polarización del apartado anterior, en el supuesto de que la recombinación en la zona neutra sea despreciable.
  - Calcular la corriente de huecos que el emisor inyecta en la base en esas condiciones de polarización.
  - Calcular el aumento relativo de la ganancia directa de corriente ( $\beta = I_C/I_B$ ), si se varía la tensión  $V_{CB}$  desde -4 a -16 voltios, manteniendo  $I_B$ .
  - Calcular la corriente de base si se sabe que la eficiencia de emisor es 0,998, y se mantienen las condiciones de polarización de b).

12. La resistencia  $R_B$  del circuito de la figura es una fotorresistencia, cuyo valor es de  $500 \text{ k}\Omega$  en oscuridad, y de  $125 \text{ k}\Omega$  cuando está iluminada. Se supone que la fuente luminosa está apagada para todo instante  $t < 0$ . En el instante  $t = 0$  se enciende la fuente luminosa y se apaga en el instante  $t = T$ . Se pide calcular la evolución con el tiempo de la corriente de colector y de la tensión entre el colector y el emisor, es decir, calcular  $i_C(t)$  y  $v_{CE}(t)$ , en los siguientes casos:
- para  $R_C = 1 \text{ k}\Omega$  y  $T = 1 \text{ }\mu\text{s}$ .
  - para  $R_C = 2 \text{ k}\Omega$  y  $T = \infty$ .



## AMPLIACIÓN DE FÍSICA DE LOS DISPOSITIVOS PROBLEMAS – EL MOSFET

1. La expresión analítica de las curvas características de un transistor MOS de inversión puede simplificarse si es despreciable la carga en la región despoblada del semiconductor, es decir, si puede considerarse que prácticamente toda la carga inducida en el semiconductor es carga de inversión.
- a) Indique de qué parámetros depende fundamentalmente la carga en dicha región despoblada, y en qué condiciones la hipótesis de considerarla despreciable es razonable.

Suponiendo en todo el resto del ejercicio que dicha hipótesis es razonable:

- b) Encontrar, para un MOSFET de canal n, la expresión de la carga por unidad de superficie en la capa de inversión en un punto del canal, en función del potencial en dicho punto,  $V(y)$ , del potencial aplicado a la puerta,  $V_G$ , y de los parámetros estructurales (potencial de banda plana, concentración de impurezas en el semiconductor, espesor del óxido, constantes dieléctricas del semiconductor y del óxido, etc.)
- c) Calcular el potencial umbral de puerta,  $V_T$ , en función del potencial de banda plana, el dopaje y la concentración intrínseca del semiconductor, y dar la relación entre la tensión de saturación,  $V_{Dsat}$  y la tensión de puerta  $V_G$ .
- d) Comprobar que las características de salida son de la forma,

$$I_D = K \cdot (V_G - V_T - V_D/2) \cdot V_D, \text{ si } V_D < V_{Dsat}$$

siendo K una constante que depende de los parámetros estructurales.

- e) Supóngase que se convierte el MOSFET en un dispositivo de dos terminales, uniendo fuente y sustrato por una parte, y puerta y drenador por otra. Indique, razonando la respuesta, cómo debería ser el sustrato de silicio y qué metal elegiría para hacer la metalización de puerta, con el objeto de que la característica tensión-corriente fuera de la forma:

$$I \propto V^2$$

si el proceso de fabricación se cuida de forma que no existan cargas en el óxido, y los estados superficiales no influyan apreciablemente en el voltaje de banda plana.

Datos:  $E_G = 1.1$  eV,  $n_i = 10^{10}$  cm<sup>-3</sup>,  $kT = 0.025$  eV. Barrera de extracción  $\equiv$  energía necesaria para llevar un electrón desde el nivel de Fermi en el material a la banda de conducción del óxido. Barrera de extracción silicio p<sup>+</sup>-óxido = 4.35 eV. Barrera de extracción metal-óxido (eV): Mg: 2.3, Al: 3.2, Ni: 3.7, Cu 3.8, Ag 4.2, Au 4.1.

2. Se fabrica un MOSFET con las siguientes características:

Metal de puerta: aluminio. Espesor de la capa de óxido:  $x_{ox} = 0.1$   $\mu$ m. Permitividad relativa del óxido:  $k_{ox,r} = 3.6$ . Cargas en la interfase óxido-silicio:  $Q_{IT}/q = 3 \cdot 10^{11}$  cm<sup>-2</sup>. Concentración de impurezas en el sustrato:  $N_A = 1.5 \cdot 10^{15}$  cm<sup>-3</sup>. Relación de dimensiones del canal:  $Z/L = 100$

Se conoce además que:

$n_i = 10^{10}$  cm<sup>-3</sup>.  $E_G = 1.1$  eV.  $\mu_n = 1000$  cm<sup>2</sup>/Vs. Barrera de extracción metal-óxido = 3.2 V. Barrera de extracción silicio n<sup>+</sup>-óxido = 3.25 V.  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-14}$  F/cm.  $kT = 0.026$  eV.

Calcular:

- a) Tensión de banda plana  
b) Tensión umbral del MOSFET  
c) Corriente de saturación con  $V_G = 0$

Si se conectan entre sí los terminales de drenador y puerta, y se desea que el dispositivo resultante siga una ley de la forma:  $I = K \cdot V^2$ . Calcular:

- d) El valor de  $Q_{IT}$  necesario para que esto ocurra  
e) El valor de la constante K

## Propiedades del Ge, Si y GaAs

	Ge	Si	GaAs
Átomos/cm <sup>3</sup>	4.42·10 <sup>22</sup>	5.0·10 <sup>22</sup>	4.42·10 <sup>22</sup>
Peso atómico	72.60	28.09	144.63
Campo de ruptura (V/cm)	~10 <sup>5</sup>	~3·10 <sup>5</sup>	~4·10 <sup>5</sup>
Estructura cristalina	Diamante	Diamante	Blenda
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	5.3267	2.328	5.32
Constante dieléctrica relativa	16.0	11.9	13.1
Densidad efectiva de estados en la banda de conducción, N <sub>C</sub> (cm <sup>-3</sup> )	1.04·10 <sup>19</sup>	2.8·10 <sup>19</sup>	4.7·10 <sup>17</sup>
Densidad efectiva de estados en la banda de valencia, N <sub>V</sub> (cm <sup>-3</sup> )	6.0·10 <sup>18</sup>	1.04·10 <sup>19</sup>	7.0·10 <sup>18</sup>
Masa efectiva reducida, m <sup>*</sup> /m <sub>0</sub>			
Electrones	m <sub>l</sub> <sup>*</sup> =1.64 m <sub>t</sub> <sup>*</sup> =0.082	m <sub>l</sub> <sup>*</sup> =0.98 m <sub>t</sub> <sup>*</sup> =0.19	0.067
Huecos	m <sub>lh</sub> <sup>*</sup> =0.044 m <sub>hh</sub> <sup>*</sup> =0.28	m <sub>lh</sub> <sup>*</sup> =0.16 m <sub>hh</sub> <sup>*</sup> =0.49	m <sub>lh</sub> <sup>*</sup> =0.082 m <sub>hh</sub> <sup>*</sup> =0.45
Afinidad electrónica, χ (V)	4.0	4.05	4.07
Gap de energía (eV) E <sub>G</sub> (T)=E <sub>G</sub> (0)-(α T <sup>2</sup> )/(T+β)			
E <sub>G</sub> (0)	0.7437	1.170	1.519
α	4.774·10 <sup>-4</sup>	4.73·10 <sup>-4</sup>	5.405·10 <sup>-4</sup>
β	235	636	204
300K	0.66	1.12	1.42
Concentración intrínseca, n <sub>i</sub> (cm <sup>-3</sup> )	2.4·10 <sup>13</sup>	1.45·10 <sup>10</sup>	1.79·10 <sup>6</sup>
Resistividad intrínseca (Ω cm)	47	2.3·10 <sup>5</sup>	10 <sup>8</sup>
Parámetro de red (Å)	5.64613	5.43095	5.6533
Punto de fusión (°C)	937	1415	1238
Tiempo de vida medio de los portadores minoritarios (s)	10 <sup>-3</sup>	2.5·10 <sup>-3</sup>	~10 <sup>-8</sup>
Movilidad (cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )			
Electrones	3900	1500	8500
Huecos	1900	450	400

## Constantes físicas y algunas unidades

Nombre	Símbolo	Valor
Angstrom	Å	10 <sup>-10</sup> m
Número de Avogadro	N <sub>AVO</sub>	6.02204·10 <sup>23</sup> mol <sup>-1</sup>
Constante de Boltzmann	K	1.38066·10 <sup>-23</sup> J/K
Carga elemental	q	1.60218·10 <sup>-19</sup> C
Masa del electrón en reposo	m <sub>0</sub>	0.91095·10 <sup>-30</sup> Kg
Electrón volt	eV	1.60218·10 <sup>-19</sup> J
Permeabilidad del espacio libre	μ <sub>0</sub>	4π·10 <sup>-9</sup> H/cm
Permitividad del espacio libre	ε <sub>0</sub>	8.85418·10 <sup>-14</sup> F/cm
Constante de Plank	h	6.62617·10 <sup>-34</sup> Js
Tensión térmica	V <sub>t</sub> =KT/q	0.0259 V

