



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 Nº 34 SEPTIEMBRE DE 2010

“DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE IMPUREZAS EN UNA UNION P⁺N MEDIANTE MEDIDAS DE SU CAPACIDAD EN ALTA FRECUENCIA”

AUTORÍA MARÍA FRANCISCA OJEDA EGEA
TEMÁTICA FÍSICA ELECTRÓNICA
ETAPA BACHILLERATO

Resumen

La base de la electrónica es el uso de materiales semiconductores, cuyas propiedades físicas se aprovechan especialmente al introducir impurezas, que pueden ser elementos químicos del grupo III A o VA, lo que proporciona dos tipos de semiconductores: tipo P o tipo N. Cuando dos semiconductores de estos tipos se ponen en contacto tenemos una unión PN. Se determinará la distribución de impurezas alrededor de esta unión a partir de medidas de su capacidad de almacenar carga.

Palabras clave

Física electrónica, semiconductores, unión P⁺N, diodo, capacidad, impurezas, perfil de impurezas.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Semiconductores.

Los materiales semiconductores son la base de la electrónica, pues sus características permiten controlar los impulsos eléctricos mejor que con otros materiales. Su estudio es necesario para poder aprovechar mejor sus propiedades.

Los semiconductores más empleados en la fabricación de dispositivos electrónicos son dos elementos químicos, silicio y germanio, aunque también existen varios compuestos con estas características. Estos elementos son del grupo IV A y tienen cuatro electrones de valencia, lo que explica sus propiedades eléctricas.

Los metales son conductores de la electricidad, tienen electrones libres que se mueven al aplicar una diferencia de potencial. En cambio, los electrones de valencia de los semiconductores necesitan de un



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 Nº 34 SEPTIEMBRE DE 2010

aporte de energía para poder estar libres y poder conducir la electricidad. Esta cualidad permite controlar la conducción y los impulsos eléctricos, lo que es el fundamento de la electrónica.

El aporte de energía que puede permitir que existan electrones libres en un semiconductor puede proceder de la temperatura, pues la agitación térmica puede permitir que electrones de valencia escapen de los átomos. Así, en un semiconductor la conductividad eléctrica aumenta con la temperatura.

Esos electrones, una vez estén en la banda de conducción, son capaces de conducir corriente eléctrica, del mismo modo que pueden hacerlo los huecos que han dejado en los átomos de los que escaparon, dando lugar a otro tipo de conducción, denominada por huecos. Se dice que tenemos un semiconductor intrínseco cuando sus propiedades electrónicas están dominadas por electrones térmicamente excitados de la banda de valencia a la de conducción.

1.2. Semiconductores extrínsecos.

Sin embargo, los semiconductores se alteran fácilmente con impurezas, que son átomos de grupos vecinos de la tabla periódica (del VA como el fósforo o del grupo IIIA como el aluminio). Si los electrones procedentes de las impurezas (o si las impurezas provocan huecos en la capa de valencia del semiconductor al capturar algún electrón de valencia) son los que determinan las propiedades electrónicas el semiconductor, éste se denomina extrínseco.

Si en un semiconductor se introducen impurezas con átomos de elementos del grupo VA, como el arsénico o el fósforo, es más fácil lograr que queden electrones libres en el material, pues el electrón "extra" de la impureza está menos ligado que los electrones de valencia de los átomos del semiconductor. Así, este tipo de impurezas que facilita la conducción por electrones se llama dadoras y el semiconductor extrínseco se denomina tipo N.

Si en un semiconductor se introducen impurezas con átomos de elementos del grupo IIIA, como el boro o el aluminio, existe un déficit de un electrón respecto a los átomos semiconductores de la red cristalina. La agitación térmica de los electrones del semiconductor puede hacer que fácilmente estos electrones pasen a ocupar los átomos de la impureza. Este tipo de impurezas se denomina aceptora y lo que hace es facilitar la conducción por huecos, pues realmente no llegan a escapar electrones, y el semiconductor extrínseco se llama tipo P.

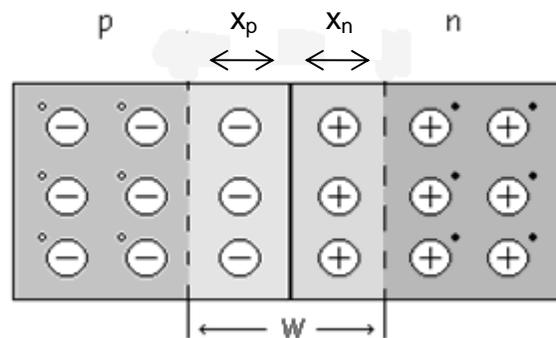
1.3. Unión PN en equilibrio.

Una unión PN o diodo de unión consiste en un semiconductor con una región tipo P y otra tipo N, separadas por una fina región de separación llamada unión metalúrgica.

La densidad de impurezas aceptoras del lado P se representa N_A . La densidad de impurezas dadoras del lado N se representa N_D . En general la distribución de impurezas N a ambos lados de la unión depende de la distancia x del punto del semiconductor a la zona de unión. Consideraremos el caso de una unión abrupta con densidad de impurezas constante en cada lado de la unión.

Si la densidad de impurezas es igual en ambos lados se tiene una unión simétrica. Si es mayor la concentración de impurezas dadoras la unión se llama PN⁺. Si es mayor la concentración de impurezasceptoras N_A>N_D la unión se llama P⁺N.

Si los dos semiconductores tipo P y tipo N se ponen en contacto a una temperatura uniforme, se va a producir un trasiego de electrones por difusión. Pasan electrones que estaban en el lado N cerca de la zona de unión hacia el lado P donde hay impurezas aceptoras, de modo que las impurezas próximas a la unión que quedarán cargadas negativamente hasta una extensión x_p. De forma análoga, pasan huecos de la región P hacia la región N, donde las impurezas próximas a la unión quedarán cargadas positivamente hasta una extensión x_n. La zona total alrededor de la unión en que quedan cargados los semiconductores sin cargas móviles se llama zona de deplexión, cuyo tamaño es W= x_n+ x_p



Esta acumulación de carga inmóvil que son las impurezas ionizadas, crea un campo eléctrico en la zona de deplexión que se opone al movimiento por difusión de los portadores móviles. La situación alcanza el equilibrio cuando este campo es lo suficientemente intenso como para impedir el trasiego de electrones.

Aparece, por tanto, una diferencia de potencial electrostático entre las regiones P y N llamada barrera de potencial V_{bi}. Puede demostrarse, a partir de la ecuación de Gauss para el campo eléctrico y de las correspondientes condiciones de continuidad del potencial eléctrico en las distintas zonas de los dos semiconductores, que la altura de la barrera de potencial depende de la carga de los portadores móviles “q” (electrón), constante dieléctrica del semiconductor “e_s”, concentración de ambos tipos de impurezas N_A y N_D y del tamaño de las zonas de deplexión en cada zona de la unión (x_n y x_p respectivamente):

$$V_{bi} = \frac{q}{e_s}(N_D x_n^2 + N_A x_p^2)$$

Por condición de continuidad del campo eléctrico en la zona de unión se tiene que N_Ax_p = N_Dx_n, por lo que:

$$V_{bi} = \frac{q}{e_s}(N_D x_n^2 + N_A x_p^2) = \frac{q}{2e_s} N_A x_p W \quad \text{y} \quad V_{bi} = \frac{q}{e_s}(N_D x_n^2 + N_A x_p^2) = \frac{q}{2e_s} N_D x_n W$$

Multiplicando ambas igualdad por N_D y N_A respectivamente y sumando se llega a:



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 Nº 34 SEPTIEMBRE DE 2010

$$V_{bi}(N_D + N_A) = \frac{q W^2}{2e_s} N_A N_D$$

Con lo que la anchura total W de la zona de deplexión es:

$$W = \sqrt{\frac{2e_s(N_A + N_D)V_{bi}}{q N_A N_D}}$$

La cantidad de carga acumulada en la zona de deplexión de cada semiconductor es, a partir de expresiones anteriores:

$$|Q| = Aq x_n N_D = Aq x_p N_A = \frac{2Ae_s V_{bi}}{W} = A \sqrt{\frac{2e_s q V_{bi} N_A N_D}{(N_A + N_D)}}$$

Donde A es la sección común de los dos semiconductores.

1.4. Unión PN polarizada.

A una unión PN se le puede aplicar una diferencia de potencial externa V :

Si se conecta a una diferencia de potencial directa, con el electrodo negativo conectado al lado N, se reduce la barrera de potencial, de modo que disminuye el campo eléctrico y la carga de la zona de deplexión. Esto hace que la zona de deplexión se estreche respecto al equilibrio.

Si se conecta a una diferencia de potencial inversa, con el electrodo positivo conectado a la zona N, aumenta la barrera de potencial, de modo que aumenta el campo eléctrico y la carga de la zona de deplexión. Esto hace que la zona de deplexión se ensanche respecto al equilibrio.

Así, la unión PN forma un diodo, pues deja pasar sólo corriente en un sentido de polarización, siendo la diferencia de potencial entre sus extremos prácticamente fija al polarizarse de forma directa.

Cuando se polariza la unión con una diferencia de potencial V , el tamaño de la zona de deplexión se puede obtener a partir de su tamaño en la condición de equilibrio:

$$W = \sqrt{\frac{2e_s(N_A + N_D)(V_{bi} - V)}{q N_A N_D}}$$

Y para la carga acumulada en la zona de deplexión:

$$|Q| = A \sqrt{\frac{2e_s q N_A N_D (V_{bi} - V)}{(N_A + N_D)}}$$

2. FUNDAMENTO.

Al estudiar la unión de dos semiconductores PN encontramos una expresión que nos da la carga almacenada a un lado de la unión en función de la concentración de impurezas de ambos lados de la misma, el potencial barrera y la tensión aplicada si la unión no se encuentra en equilibrio:

$$|Q| = \left[\frac{2A^2 e_s q (V_{bi} - V) N_A N_D}{N_A + N_D} \right]^{1/2}$$

donde "q" es la carga del electrón, "A" la sección de la unión que supondremos constante y "e_s" la constante dieléctrica del semiconductor del que está hecha la unión (silicio en nuestro caso). En el caso de una unión P⁺N la concentración de impurezas del lado P (N_A) es mucho mayor que la del lado N (N_D), con lo que si ambas concentraciones de impurezas se suman nos resulta aproximadamente la concentración de impurezas del lado P. Entonces, en la expresión anterior tenemos en el denominador aproximadamente N_A, que se simplifica con el numerador. En consecuencia, en el caso de una unión P⁺N la expresión se aproxima a:

$$|Q| = \left[\frac{2A^2 e_s q (V_{bi} - V) N_A N_D}{N_A + N_D} \right]^{1/2} \cong \left[\frac{2A^2 e_s q (V_{bi} - V) N_A N_D}{N_A} \right]^{1/2} = [2A^2 e_s q (V_{bi} - V) N_D]^{1/2}$$

$$\boxed{|Q| \approx [2A^2 e_s q (V_{bi} - V) N_D]^{1/2}}$$

A partir de la carga acumulada en la unión se puede obtener la capacidad de la unión C:

$$C = \frac{d|Q|}{dV} = -[2A^2 e_s q N_D]^{1/2} \cdot \frac{1}{2} [(V_{bi} - V)]^{-1/2} = - \left[\frac{A^2 e_s q N_D}{2(V_{bi} - V)} \right]^{1/2}$$

Manipulamos esta expresión para ponerla en función de la tensión aplicada con exponente 1 positivo y en el numerador. Lo conseguimos elevando al cuadrado y haciendo el inverso de la expresión que sale, obteniendo finalmente:

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi} - V)}{A^2 e_s q N_D} = \frac{2V_{bi}}{A^2 e_s q N_D} - \frac{2V}{A^2 e_s q N_D}$$

Si hacemos medidas de la capacidad frente a la tensión externa y representamos gráficamente 1/C² frente a V obtendremos en cada punto de la gráfica una pendiente que permite obtener un valor para la concentración de impurezas. La pendiente en un punto de la curva 1/C² frente a V vale:

$$\boxed{\text{pendiente} = \frac{d(1/C^2)}{dV} = - \frac{2}{A^2 e_s q N_D}}$$

de tal manera que podemos obtener una expresión para la concentración de impurezas:



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 Nº 34 SEPTIEMBRE DE 2010

$$N_D = -\frac{2}{A^2 e_s q d(1/C^2)/dV}$$

Puede decirse que la concentración de impurezas es función del ancho de la zona de transición en el lado N, "W", que está relacionada con la capacidad de forma análoga a la de un condensador de caras paralelas de superficie "A" y distancia entre placas W:

$$C = \frac{e_s A}{W}$$

Nosotros queremos averiguar que forma tiene la dependencia de N_D frente a W.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

Se realizan medidas experimentales de capacidad de un diodo de silicio, para tensiones de polarización en inverso.

Para cada valor de voltaje se tiene una pendiente de la curva $1/C^2-V$. Ese valor de la pendiente proporciona, para cada tensión, un valor de la concentración de impurezas. El valor de la capacidad correspondiente a ese punto permite hallar el ancho de la zona de depleción "W". De este modo se obtiene un valor de la concentración de impurezas para cada valor de "W".

Para obtener el valor de la pendiente, que llamaremos " d_i ", de $1/C^2$ frente a V para un valor de $V=V_i$ lo que hacemos es medir la tangente que pasa por ese punto, usando el valor inmediatamente anterior de $1/C_i^2$ y el inmediatamente posterior y lo mismo para V_i . Es decir, se usa la expresión:

$$d_i = \frac{\frac{1}{C_{i+1}^2} - \frac{1}{C_{i-1}^2}}{V_{i+1} - V_{i-1}} = \frac{C_{i+1}^{-2} - C_{i-1}^{-2}}{V_{i+1} - V_{i-1}}$$

Se considera, implícitamente, que los tres puntos consecutivos de la gráfica $1/C^2-V^2$ implicados en la expresión están en una recta, lo que, al ser puntos muy próximos como se ve en la gráfica, es admisible.

Por ejemplo, para obtener el d_i correspondiente al valor de $V_i=V_2=-0.2V$ tendríamos que:

$$d_2 = \frac{C_3^{-2} - C_1^{-2}}{V_3 - V_1} = \frac{(11,67 \cdot 10^{-2} - 16,02 \cdot 10^{-2})(\text{pF}^{-2})}{-0,4 - 0(V)} = 8,6156 \cdot 10^{-3} \text{ V}^{-1} \text{ pF}^{-2}$$

Eso no puede usarse para los valores extremos, pues falta un dato, el anterior ó el posterior (según). Lo que se hace es poner C_i y V_i en el lugar del que falte.

A cada valor de la pendiente le corresponde un valor de la concentración de impurezas que viene dado por la expresión:

$$N_D = -\frac{2}{A^2 e_s q} \frac{d(1/C^2)}{dV}$$

Cada valor de la capacidad, determina junto con la tensión un punto de la curva $1/C_2-V$, con ello una pendiente y en definitiva una concentración de impurezas, que permite obtener un valor de la anchura de la zona de deplexión:

$$C = \frac{e_s A}{W}$$

De ese modo se tiene el valor de la anchura de la zona de deplexión que corresponde a cada valor de la concentración de impurezas. En definitiva, se obtiene el perfil de impurezas (distribución de impurezas en la unión).

4. TRATAMIENTO DE DATOS.

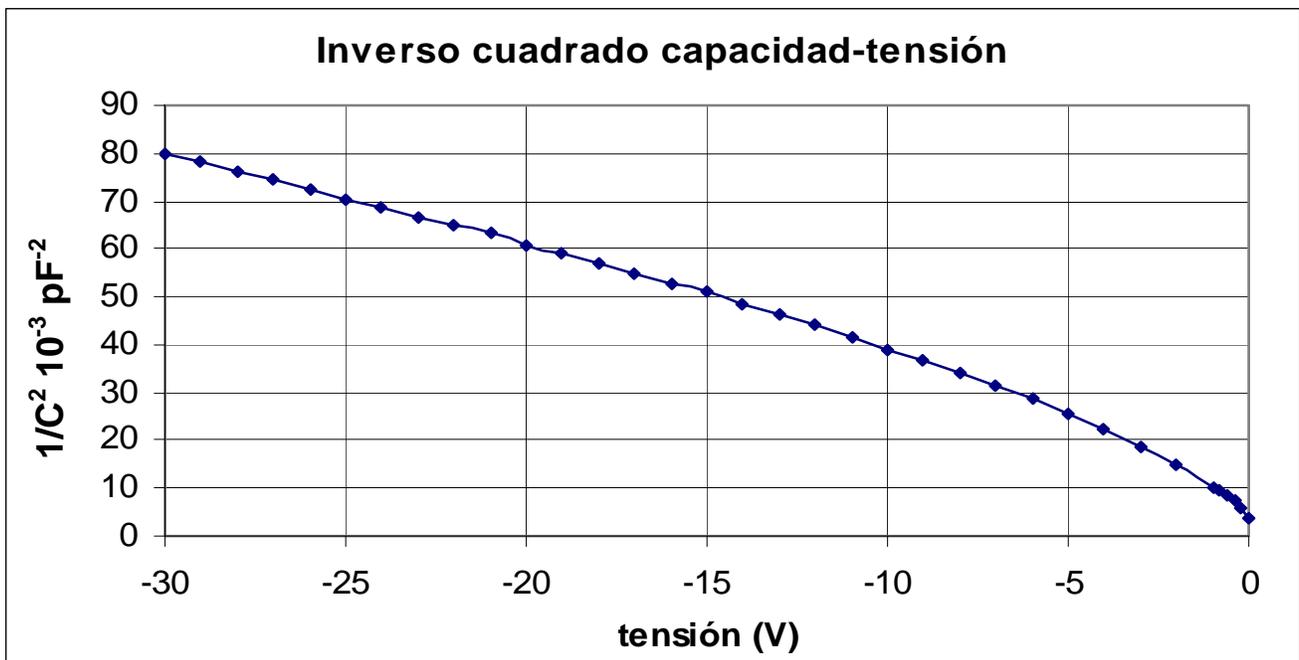
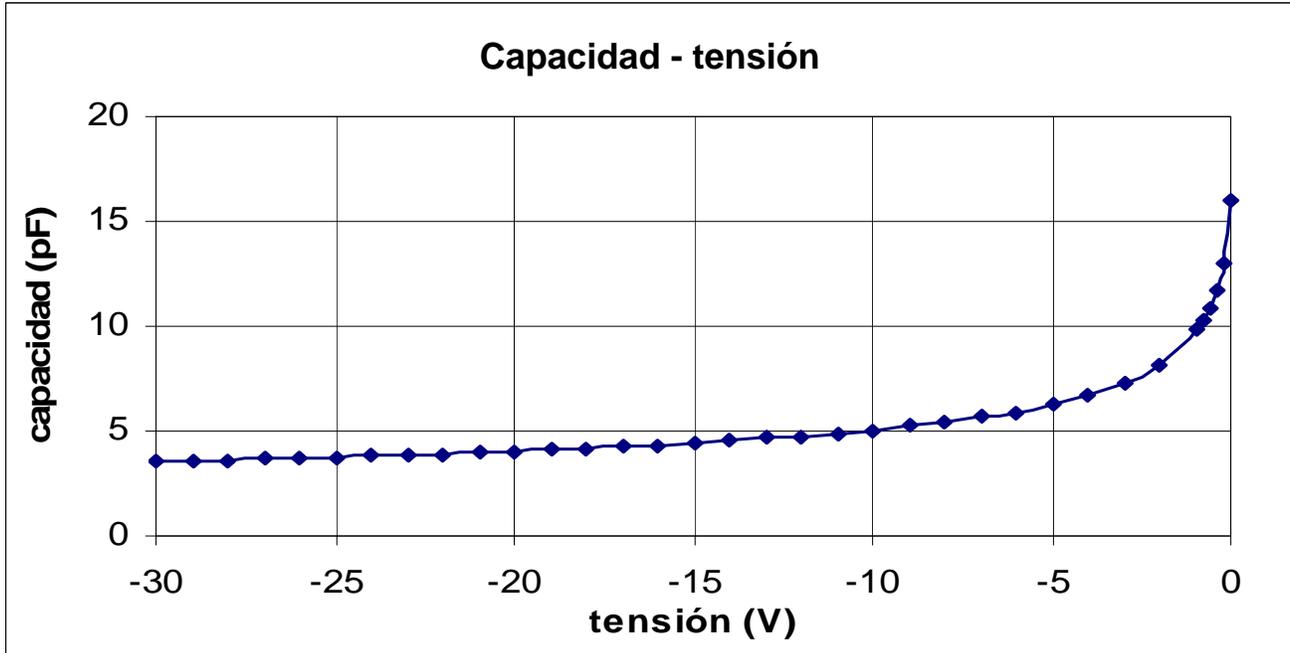
Suponemos una sección $A=0.7\text{mm}^2$. Como el diodo es de silicio, la constante dieléctrica es: $e_{Si}=11.7e_0$. Con esos datos, las medidas de diferencia de potencial y capacidad y las ecuaciones anteriores obtenemos la siguiente tabla:

V (V)	C (pF)	d $10^{-3}(V^{-1}pF^2)$	N_D $10^{13}(cm^{-3})$	W (μm)
0	16.02	-9.877	2.493	4.526
-0.2	13.05	-8.616	2.858	5.557
-0.4	11.67	-6.635	3.711	6.214
-0.6	10.83	-5.026	4.900	6.696
-0.8	10.34	-4.557	5.404	7.013
-1.0	9.83	-4.629	5.320	7.377
-2.0	8.19	-4.208	5.852	8.854
-3.0	7.30	-3.618	6.806	9.933
-4.0	6.72	-3.377	7.292	10.791
-5.0	6.26	-3.195	7.708	11.584
-6.0	5.92	-2.848	8.647	12.249
-7.0	5.66	-2.691	9.151	12.812

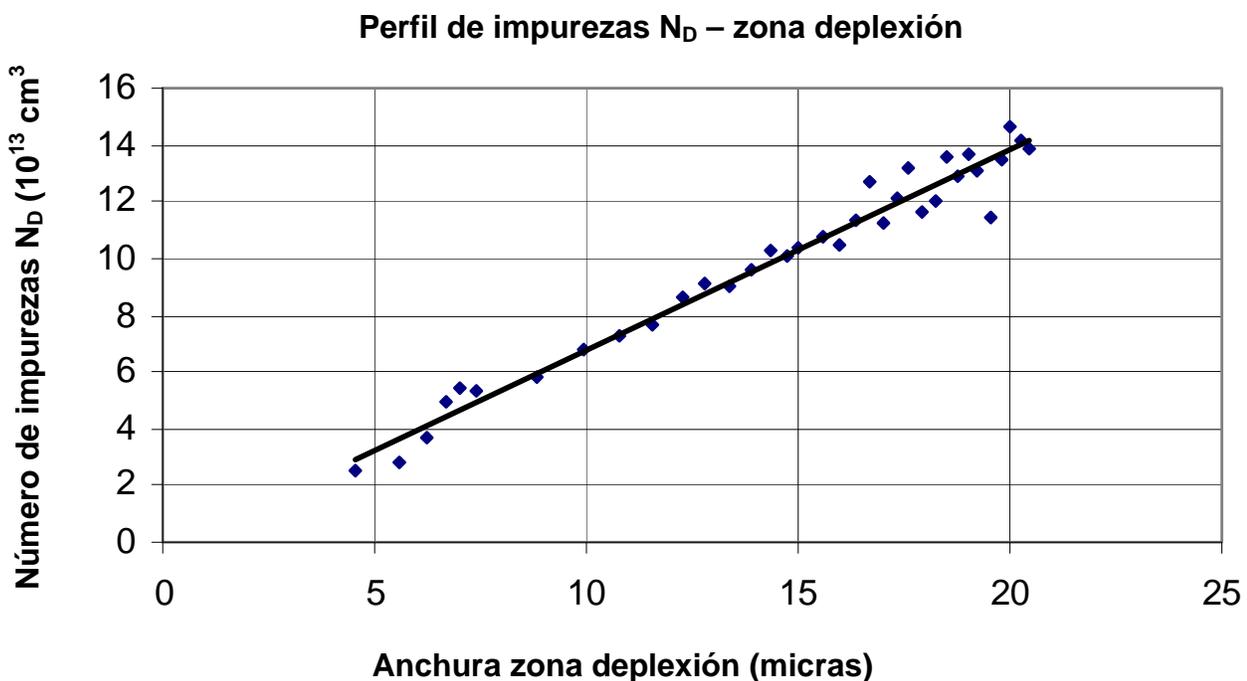
V (V)	C (pF)	d $10^{-3}(V^{-1}pF^2)$	N_D $10^{13}(cm^{-3})$	W (μm)
-8.0	5.43	-2.742	8.981	13.354
-9.0	5.22	-2.571	9.578	13.892
-10.0	5.06	-2.390	10.304	14.331
-11.0	4.91	-2.447	10.064	14.769
-12.0	4.77	-2.384	10.330	15.020
-13.0	4.65	-2.283	10.787	15.594
-14.0	4.54	-2.354	10.461	15.972
-15.0	4.43	-2.165	11.374	16.369
-16.0	4.35	-1.945	12.661	16.670
-17.0	4.27	-2.193	11.229	16.982
-18.0	4.18	-2.033	12.113	17.348
-19.0	4.12	-1.867	13.190	17.600
-20.0	4.05	-2.109	11.676	17.905
-21.0	3.98	-2.055	11.983	18.220
-22.0	3.92	-1.820	13.531	18.499
-23.0	3.87	-1.906	12.920	18.738
-24.0	3.81	-1.795	13.719	19.033
-25.0	3.77	-1.882	13.085	19.235
-26.0	3.71	-2.146	11.475	19.546
-27.0	3.66	-1.829	13.464	19.813
-28.0	3.62	-1.687	14.597	20.032
-29.0	3.58	-1.744	14.120	20.255
-30.0	3.54	-1.773	13.889	20.484

Ofrecemos la representación de la capacidad frente a la tensión C-V:

También $1/C^2-V$, donde se justifica a simple vista que supongamos recta la curva que une tres puntos consecutivos.



Lo que nos interesa es el perfil de impurezas: concentración de impurezas N_D frente anchura de la zona de deplexión W . En la gráfica, hemos representado el número de impurezas por centímetro cúbico, teniendo todos los valores que multiplicarse por 10^{13} . La zona de deplexión se ha representado en micras.



A la vista de los puntos experimentales parece ser que los datos pueden ajustarse a una recta. Hacemos un análisis de regresión de los datos, ajustándolos a una recta y obtenemos:

$$r = 0.984917869$$

$$\text{pendiente} = (0.70376 \pm 0.04377) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-4}$$

$$\text{ord.origen} = -(0.24679 \pm 0.66303) \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

El valor del coeficiente de correlación lineal es bastante próximo a la unidad, por lo que podemos concluir que el perfil de impurezas es lineal, mayor concentración de impurezas en la zona de deplexión cuanto más ancha es ésta. Por tanto, las impurezas estarían repartidas uniformemente en el semiconductor.



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 Nº 34 SEPTIEMBRE DE 2010

5. CONCLUSIONES.

Hemos determinado que, con cierta aproximación, cuando se tiene una unión P⁺N, la distribución de impurezas del lado N, en el que las impurezas son mucho menores que las del lado P, tiene una distribución lineal con el tamaño de la zona de deplexión.

Los resultados experimentales son suficientemente aproximados con un coeficiente de regresión cercano a la unidad. Que no exista mayor proximidad a la unidad debe proceder de que el reparto de impurezas por el semiconductor no es perfectamente homogéneo, en lo que, por otra parte, es difícil que la tecnología consiga la perfección.

BIBLIOGRAFÍA.

- Shalimova, K.V. (1975). *“Física de los semiconductores”*. Madrid: Mir.
- Tipler, P. (1998). *“Física”*. Barcelona: Reverte.
- Kittel, C. (1997). *“Introducción a la Física del Estado Sólido”*. Barcelona: Reverté.
- Albella, J.M., Martínez-Duart, J.M. (1996). *“Fundamentos de electrónica física y microelectrónica”*. Buenos Aires: Addison Wesley Iberoamericana.
- Rosado, L. (1987). *“Problemas resueltos de electrónica física”*. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Mac Kelvey, J. P. (1976). *“Física del estado sólido y de semiconductores”*. México, D.F.: Limusa.
- Sze, S.M. (1969). *“Physics of semiconductor devices”*. New York: John Wiley and Sons.

Autoría

- Nombre y Apellidos: María Francisca Ojeda Egea.
- Centro, localidad, provincia: IES Ángel Ganivet, Granada (Granada).
- E-mail: francisojedaegea@gmail.com