



UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE SUCRE
ESCUELA DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

ESTUDIO DE LA UNIÓN $n-n^+$ EN SILICIO TIPO n COMPENSADO CON ORO
(Modalidad: Investigación)

ROBERT ALBENIS CARVAJAL VALOR

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIADO EN FÍSICA

CUMANÁ, 2010

**ESTUDIO DE LA UNIÓN $n-n^+$ EN SILICIO TIPO n COMPENSADO CON
ORO**

APROBADO POR:

Prof. José Rafael Franco Sarabia
Asesor Académico

Prof. Delfín Antonio Marval Vargas
Jurado

Prof. Francisco Alfonso Pérez Herrera
Jurado

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
LISTA DE FIGURAS.....	iii
RESUMEN	vi
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Semiconductor.	5
2.2. Semiconductor intrínseco.	6
2.3. Función de distribución de Fermi-Dirac.	7
2.4. Densidad de estado en un semiconductor intrínseco.	8
2.5. Densidad de portadores de carga.	9
2.6. Semiconductor extrínseco.....	11
2.6.1. Semiconductor tipo n.	11
2.6.2. Semiconductor tipo p.	14
2.6.3. Semiconductor extrínseco con impurezas profundas.....	16
2.7 Unión p-n.....	17
2.8 Polarización inversa.....	19
2.9 Polarización directa.....	20
2.10 Zona de vaciamiento en equilibrio.....	21
2.11 Capacitancia de un diodo semiconductor.	25
CAPITULO III. METODOLOGÍA.....	29
3.1 Conexión entre los electrodos de los dispositivos de doble inyección y los instrumentos de medición.	31

3.2. Montaje del circuito para determinación de las curvas de corriente en función del voltaje en los dispositivos de doble inyección (p^+-n-n^+ y n^+-n-n^+) en polarización directa e inversa.	33
3.3 Determinación de las curvas de capacitancia en función del voltaje en los dispositivos de doble inyección (p^+-n-n^+ y n^+-n-n^+) en polarización directa e inversa en los dispositivos de doble inyección.	35
3.4 Determinación de la densidad de oro difundido en el sustrato de silicio tipo n y el efecto que este produce en una unión $n-n^+$	36
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DICUSIÓN	37
4.1 Curvas de corriente en función del voltaje en dispositivos de doble inyección p^+-n-n^+ en base a silicio dopado con oro en polarización directa e inversa.	37
4.2 Determinación de las curvas de corriente en función del voltaje en dispositivos de doble inyección n^+-n-n^+ en base a silicio dopado con oro.	39
4.3 Determinación de las curvas de capacitancia en dispositivos de doble inyección p^+-n-n^+ en base a silicio dopado con oro en polarización directa e inversa.	40
4.4 Determinación de las curvas de capacitancia en dispositivos de doble inyección n^+-n-n^+ en base a silicio dopado con oro.	41
4.5 Determinación de la concentración de oro en silicio tipo n.	42
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES	45
BIBLIOGRAFÍA	46
HOJA DE METADATOS	47

DEDICATORIA

A:

Mis padres Josefina Valor de Carvajal y Jesús Armando Carvajal Rodríguez por su apoyo incondicional.

Mi esposa Rossianny Rodríguez y mi hija Ana Cecilia Carvajal Rodríguez por ser motivo de inspiración.

Mis hermanos Teresita Fabiola Carvajal y Marcos Carvajal por apoyarme en las buenas y en las malas.

Mis tías Ramona Valor y Raquel Valor; por la memoria de mis abuelos y la señora Elvia Rosa Alfonso.

A todos muchas gracias.

AGRADECIMIENTO

A:

Mi asesor académico Prof. Franco Sarabia que gracias a su asesoría fue posible este trabajo.

El Prof. López Planes y Alfonso Pérez por su valiosa colaboración durante el desarrollo de esta investigación.

José Ramírez por estar presente en todo momento.

Todo el personal del Departamento de Electricidad del Instituto Universitario de Tecnología Cumaná, especialmente a Meris Álvarez, Mervis Villanueva y Miguel Flores por su apoyo incondicional.

Muchas Gracias.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de un dispositivo de inyección doble p ⁺ -n-n ⁺ con sustrato de silicio tipo n compensado con oro.	2
Figura 2. Característica I-V de un dispositivo de doble inyección p ⁺ -n-n ⁺	2
Figura 3. Tabla periódica de los elementos químicos.....	5
Figura 4. Representación bidimensional de la estructura cristalina de un semiconductor intrínseco bajo condiciones térmicas: a) T= 0k y b) T > 0k.	6
Figura 5. Diagrama de bandas de energía de un semiconductor intrínseco en equilibrio térmico.	7
Figura 6. Diagrama de energía en función de la probabilidad P para la función de distribución de Fermi-Dirac en un semiconductor intrínseco.....	7
Figura 7. Diagrama de energía en función del momento K para la densidad de estado en un semiconductor intrínseco.	8
Figura 8. Diagrama de energía en función del momento de la densidad de portadores de un semiconductor intrínseco.	9
Figura 9. Representación bidimensional de la estructura cristalina de un semiconductor extrínseco tipo n bajo condiciones de equilibrio térmico.	12
Figura 10. Diagrama de bandas de energía de un semiconductor extrínseco tipo n en equilibrio térmico.....	12
Figura 11. Representación bidimensional de la estructura cristalina de un semiconductor extrínseco tipo p bajo condiciones de equilibrio térmico.	15
Figura 12. Diagrama de bandas de energía de un semiconductor extrínseco tipo p en equilibrio térmico.....	15
Figura 13. (a) semiconductor libre de trampas. (b) el mismo semiconductor con un nivel de trampas de oro.	16
Figura 14. Diagrama de energía de los semiconductores tipo p y tipo n antes de la unión.	18
Figura 15. (a) Diagrama de energía de la unión p-n bajo condición de equilibrio. (b) diodo de unión p-n en condición de equilibrio.	19

Figura 16. (a) Diodo de unión p-n en condición de equilibrio. (b) diodo de unión p-n polarizado inversamente.	20
Figura 17. (a) Diodo de unión p-n en condición de equilibrio. (b) diodo de unión p-n polarizado directamente.	21
Figura 18. Característica I-V de un diodo de unión p-n, con voltaje de ruptura V_R y de saturación V_S	21
Figura 19. (a) Representación gráfica de la densidad de carga-distancia de la zona de vaciamiento para un diodo de unión p+- n. (b) representación gráfica del campo eléctrico-distancia de la zona de vaciamiento para un diodo de unión p+- n con un máximo valor negativo del campo en la unión metalúrgica.	22
Figura 20. Gráfica de la capacitancia de un diodo de unión p-n.	25
Figura 21. (a) Diagrama de energía de la unión n+-n con silicio tipo n compensado con oro, bajo condiciones de equilibrio. (b) Diagrama de energía de la unión p+-n, silicio tipo n compensado con oro bajo condiciones de equilibrio.	28
Figura 22. Pastilla de silicio tipo n compensada con oro donde están contenidos los dispositivos de doble inyección.	29
Figura 23. Diagrama de la pastilla donde se especifican los componentes del mismo. ...	30
Figura 24. Base porta muestra.	31
Figura 25. Conexión entre los brazos y los contactos de la pastilla.	32
Figura 26. Tablero de mando de la base porta muestra.	32
Figura 27. Circuito de medición para obtener datos de corriente en componentes de inyección doble.	33
Figura 28. Fuente de voltaje Hp modelo MC 3030C.	34
Figura 29. Multímetro UNIT modelo UT-55.	34
Figura 30. Circuito de medición para obtener datos de capacitancia en componentes de inyección doble.	35
Figura 31. Medidor de capacitancia Booton modelo 72B.	36
Figura 32. Curva característica de corriente voltaje para un dispositivo de doble inyección p+-n-n+ en polarización.	37

Figura 33. Curva característica de corriente voltaje para un dispositivo de doble inyección p+-n-n+ en polarización inversa.....	38
Figura 34. Curva característica de corriente voltaje para un dispositivo de doble inyección n+-n-n+.....	39
Figura 35. Curva característica de capacitancia-voltaje para un dispositivo de doble inyección p+-n-n+ en polarización directa.	40
Figura 36. Curva característica de capacitancia-voltaje para un dispositivo de doble inyección p+-n-n+ en polarización inversa.....	41
Figura 37. Curva característica de capacitancia-voltaje para un dispositivo de doble inyección n+-n-n+.....	42
Figura 38. Curva característica del inverso de la capacitancia al cuadrado en función del voltaje para un dispositivo de doble inyección p+-n-n+ en polarización inversa.....	43
Figura 39. Curva característica del inverso de la capacitancia al cuadrado-voltaje para un dispositivo de doble inyección n+-n-n+.	44

RESUMEN

En el presente trabajo se determinó la concentración de oro (N_{Au}) en el sustrato de silicio tipo n compensado con oro de los dispositivos de doble inyección p⁺-n-n⁺ y n⁺-n-n⁺, por medio de las curvas de corriente y capacitancia en función del voltaje construidas a partir de datos experimentales, de los cuales resultó que $N_{Au} = 5,9 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, lo que supera significativamente a la concentración de donadores en el sustrato ($5,0 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$). Además se realizó el estudio de las curvas antes mencionadas, de las que se determinó que la unión n-n⁺ en estos dispositivos, tiene un comportamiento rectificador, debido a que el sustrato tipo n cambia sus propiedades a tipo p.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Los semiconductores ocupan un lugar prominente en el conjunto de los materiales, esto se debe al alto grado de desarrollo que se ha alcanzado en el conocimiento de sus propiedades, así como también en el de sus aplicaciones. Se puede decir que hoy los semiconductores son piezas básicas en toda la tecnología electrónica, la cual en los últimos años ha mostrado un crecimiento espectacular, abarcando el campo de los procesadores, las comunicaciones y la robótica, entre otros [1].

El silicio es el material semiconductor más usado en la industria electrónica, no sólo porque es el segundo elemento más abundante de la corteza terrestre, sino también porque posee excelentes propiedades electrónicas, mecánicas, químicas, magnéticas. etc.

Con el fin de mejorar las propiedades de este semiconductor, se han hecho estudios de los efectos que producen diversos tipos de impurezas en silicio. En estos estudios, se han hallado comportamientos muy interesantes en el material. Cuando el silicio tipo n es compensado con oro, los átomos de oro actúan como trampas para electrones cuando están neutros, y como trampas para huecos cuando están ionizados negativamente. Este comportamiento ha permitido desarrollar dispositivos electrónicos de avanzada tecnología [2].

Uno de los dispositivos construidos en base a silicio tipo n compensado con oro, es el dispositivo de inyección doble, que no es más que un pedazo de material con contactos adecuados para la inyección simultánea de huecos y electrones. Algunos de estos dispositivos son construidos con una estructura del tipo 'sandwich' y otros con estructura planar. Todos están compuestos por uniones de tipo p^+-n y de tipo $n-n^+$, donde el sustrato es tipo n compensado con oro. El dispositivo de inyección doble p^+-n-n^+ está representado por la figura 1:

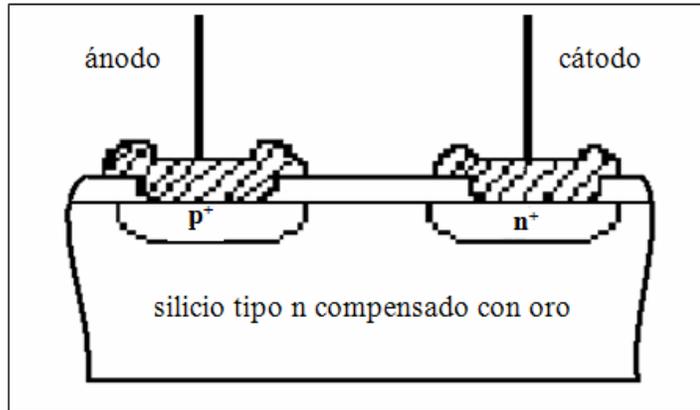


Figura 1. Estructura de un dispositivo de inyección doble p^+-n-n^+ con sustrato de silicio tipo n compensado con oro.

Trabajos experimentales han demostrado que para un número apropiado de trampas, las características de corriente-voltaje pueden mostrar una región de Resistencia Negativa Diferencial (RND); como se muestra en la figura 2, la cual está relacionada al fenómeno de realimentación positiva.

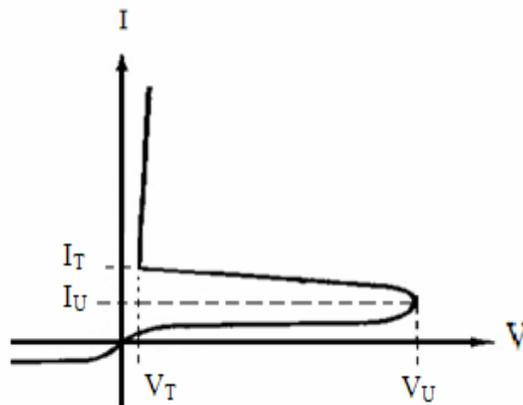


Figura 2. Característica I-V de un dispositivo de doble inyección p^+-n-n^+ , donde V_U es el voltaje de umbral, V_T es el voltaje de trabajo, I_U la corriente de umbral y I_T la corriente de trabajo.

Aunque se han intentado algunas explicaciones de cómo estas estructuras funcionan, todas están en la categoría de especulaciones fenomenológicas. Unas de las primeras suposiciones hechas, es que los contactos no presentan ninguna restricción al flujo de la

corriente. También, debido a que la caída de voltaje es muy pequeña en los contactos, éstos son despreciados en el análisis. Lo cual se puede justificar cuando se compara con la caída de voltaje en la región intrínseca n. Pero; si se tiene un cambio, aún cuando sea pequeño, en una unión p-n, éste puede producir una gran variación en el nivel de inyección, por esta razón los contactos deberían estudiarse con más detenimiento.

En investigaciones realizadas [3], se hace por primera vez un análisis de las uniones p^+-n y $n-n^+$ en presencia de impurezas profundas, donde el material base es silicio y la impureza considerada es el oro. Este sugiere, para el caso de la unión p^+-n , que cuando se aumenta la concentración de oro activando su nivel aceptor, tiende a convertir el lado n de la unión a tipo p, reduciendo el voltaje de difusión de la unión y aumentando la zona vaciada en el lado n de la misma. Como resultado la unión presenta una tendencia a cambiar sus características de tipo rectificador a tipo óhmico. Ésto parece obvio, por cuanto el oro actúa ordinariamente una impureza aceptor. Aunque también tiene un nivel donador, el cual se activa cuando entre las impurezas que generan los niveles llanos dominan sobre las aceptoras.

Para el caso de la unión $n-n^+$ cuando se aumenta la concentración de oro tiende de nuevo a cambiar el lado n de la unión al tipo p. Así, el aumento de la concentración de oro tiene el efecto de hacer lucir la unión como p-n convencional, cambiando sus características de tipo óhmico a rectificador.

Un resultado sorprendente de la unión $n-n^+$, en condiciones de polarización inversa es que el voltaje es soportado por la carga en los niveles profundos, permitiendo así la determinación de la concentración de estas trampas por medio de medidas de capacitancia.

Para tratar de esclarecer muchas de las interrogantes que presentan estas estructuras, se hace necesario investigar con mayor profundidad los fenómenos involucrados en las uniones de las mismas. Por esta razón, este trabajo pretende determinar las

concentraciones de oro en el sustrato tipo n de la unión n-n⁺ mediante medidas de capacitancia en polarización inversa y verificar si éstas tienden a cambiar las características de la unión de tipo óhmicas a rectificadoras.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Semiconductor.

Un semiconductor es un material que presenta conductividad eléctrica intermedia entre metales y aislantes. Bajo la acción de ciertas condiciones, (temperatura, inyección de impurezas, excitación óptica, etc.), su conductividad se puede variar de tal manera que tiende a comportarse como un conductor o como un aislante. En la tabla periódica, estos se encuentran ubicados en el grupo 14, que presentan valencia 4, como se muestra en la figura 3.

1																	18
H 1																	He 2
	2											13	14	15	16	17	
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	La 57	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86

Figura 3. Tabla periódica de los elementos.

En este grupo se tienen como elementos semiconductores el germanio y el silicio que tienen valencia 4, lo que significa que en su última subcapa poseen 4 electrones que son los responsables de las propiedades químicas y eléctricas de los mismos. Además también pueden fabricarse materiales semiconductores combinando elementos del grupo 13 con algunos del 15 de la tabla periódica, como es el caso del arseniuro de galio [4]

Los semiconductores se clasifican en semiconductores intrínsecos y extrínsecos:

2.2. Semiconductor intrínseco.

Un semiconductor intrínseco es un material extremadamente puro que contiene una cantidad insignificante de impurezas. En éste la densidad de electrones (n) en la banda de conducción es igual a la densidad de huecos (P) en la banda de valencia. Esta concentración se denomina concentración de portadores intrínseco (n_i).

La creación térmica de un electrón en la banda de conducción crea un hueco en la banda de valencia. Una manera de explicar el comportamiento de un semiconductor, es a través de una representación bidimensional de su estructura cristalina bajo diferentes condiciones de temperatura, tal como se muestra en la figura 4.

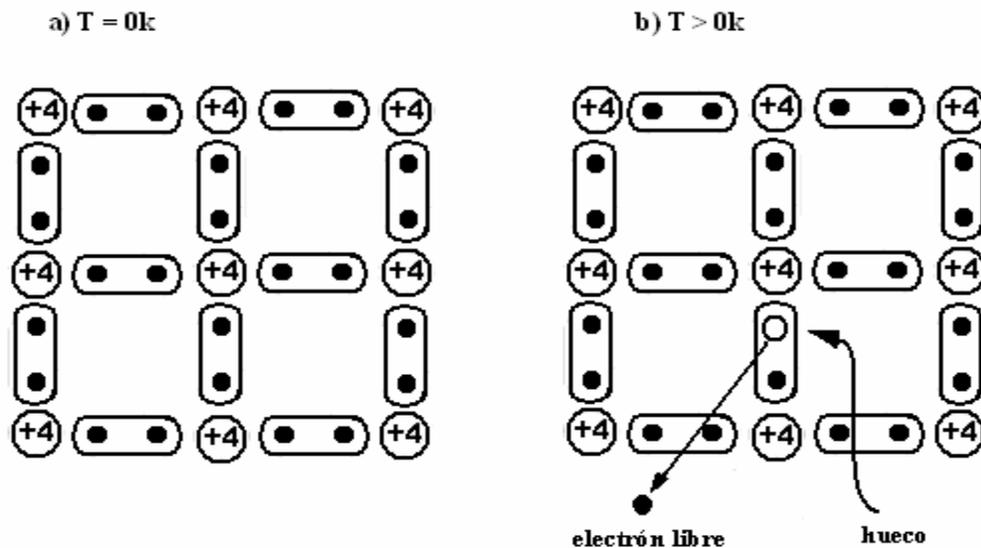


Figura 4. Representación bidimensional de la estructura cristalina de un semiconductor intrínseco bajo condiciones térmicas: a) $T = 0\text{K}$ y b) $T > 0\text{K}$.

Para 0K , todos los enlaces de la estructura están completos, en este caso no hay conducción eléctrica y el material se comporta como un aislante; pero para temperaturas mayores algunos enlaces se rompen, dejando electrones y huecos libres en el material. En este caso la conducción eléctrica se va haciendo presente y se realiza por medio de los electrones y de los huecos.

La figura 5, muestra el diagrama de bandas de energías de un semiconductor intrínseco bajo condiciones de equilibrio térmico a temperatura ambiente. La densidad de electrones en la banda de conducción es igual a la densidad de huecos en la banda de valencia. Es decir, la concentración de portadores intrínsecos n_i . Para el caso de silicio, (n_i) es $1,5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ [5].

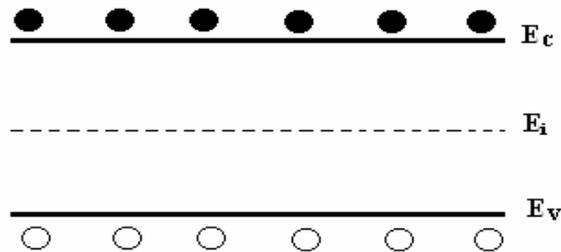


Figura 5. Diagrama de bandas de energía de un semiconductor intrínseco en equilibrio térmico.

En esta figura los círculos negros representan los electrones los vacios los huecos, E_c es el fondo de la banda de energía de conducción, E_v es el tope de la banda de energía de valencia y E_i es el nivel de energía de Fermi intrínseco.

2.3. Función de distribución de Fermi-Dirac.

Una grafica de la función de distribución de Fermi-Dirac se observa en la figura 6.

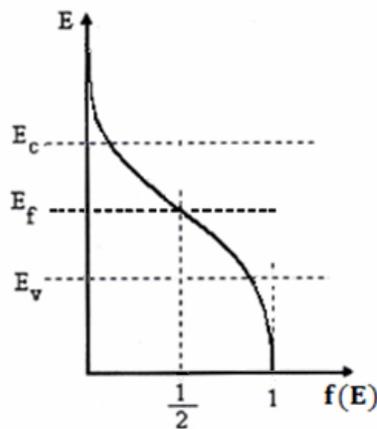


Figura 6. Diagrama de energía en función de la probabilidad P para la función de distribución de Fermi-Dirac en un semiconductor intrínseco.

Esta figura muestra, la probabilidad de ocupación de estados de energía para los electrones. Esta función está expresada por medio de la siguiente ecuación:

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_f)/kT} + 1} \quad (1)$$

donde k es la constante de Boltzmann, T la temperatura en kelvin y E_f la energía del nivel de Fermi

2.4. Densidad de estado en un semiconductor intrínseco.

La figura 7 muestra la densidad de estados de energía.

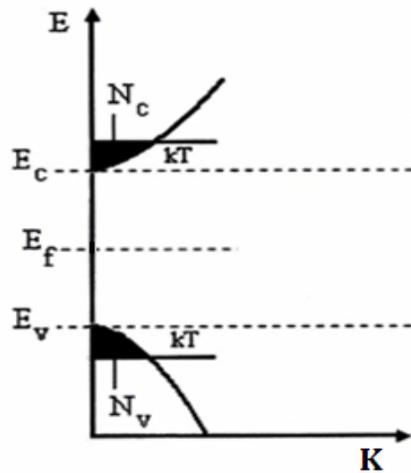


Figura 7. Diagrama de energía en función del momento K para la densidad de estado en un semiconductor intrínseco.

En la figura 7, se observa la densidad efectiva de estados de energía que pueden ser ocupados por los electrones en la banda de conducción, la cual está expresada por la siguiente ecuación:

$$N_c(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m_e^*)^{3/2} (E - E_c)^{1/2}, \quad (2)$$

donde m_e^* es la masa efectiva del electrón, h es la constante de Planck y $E - E_c$ es la energía cinética de los electrones y E_c es el nivel mínimo de energía en la banda de conducción.

La figura 7 también muestra la densidad efectiva de estados de energía que pueden ser ocupados por los huecos en la banda de valencia, cuya ecuación es:

$$N_v(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m_h^*)^{3/2} (E_v - E)^{1/2}, \quad (3)$$

para la cual m_h^* es la masa efectiva de los huecos, $E_v - E$ es su energía cinética y E_v es el nivel máximo de energía de la banda de valencia.

2.5. Densidad de portadores de carga.

La densidad de portadores de carga para un semiconductor intrínseco está representada por la figura 8.

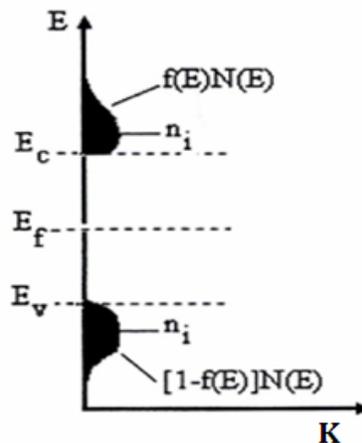


Figura 8. Diagrama de energía en función del momento de la densidad de portadores de un semiconductor intrínseco.

La densidad de electrones en la banda de conducción, se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$n = \int_{E_c}^{\infty} f(E) N_c(E) dE. \quad (4)$$

siendo $f(E)$ la función de distribución de electrones

Si $E_c - E_f \gg 3kT$, la ecuación 1 se reduce a la siguiente expresión:

$$f(E) = e^{-(E-E_f)/kT}, \quad (5)$$

que es idéntica a la función de distribución que corresponde a la estadística de Maxwell-Boltzmann.

Al sustituir las ecuaciones 2 y 5 en la ecuación 4 se obtiene que la densidad de electrones en la banda de conducción, está expresada de la siguiente forma:

$$n = N_c e^{-(E_c-E_f)/kT}, \quad (6)$$

donde N_c es la densidad efectiva de estados disponibles en la banda de conducción, representada en la figura 7 por la región oscura en la banda de conducción; la cual, para silicio a temperatura ambiente es de $2,8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

En la figura 8, también se observa la densidad de huecos en la banda de valencia, ésta puede ser calculada mediante la siguiente expresión:

$$p = \int_{-\infty}^{E_v} [1 - f(E)] N_v(E) dE. \quad (8)$$

Al sustituir las ecuaciones 3 y 5 en la ecuación 8, se obtiene que la densidad de huecos en la banda de valencia queda definida por:

$$p = N_v e^{-(E_f - E_v)/kT}, \quad (9)$$

donde N_v es la densidad efectiva de estados en la banda de valencia y está representada por la región oscura que se encuentra por debajo del tope de la misma banda, observada en la figura 8. Para silicio a temperatura ambiente, esta densidad es de 10^{19} cm^{-3} [6]

2.6. Semiconductor extrínseco.

Un semiconductor extrínseco es un material semiconductor el cual se le ha añadido cantidades controladas de impurezas, para formar, dependiendo de éstas semiconductores de tipo n ó p. En éstos, su conductividad está relacionada con el tipo portadores de carga mayoritarios que posea cada uno de ellos.

2.6.1. Semiconductor tipo n.

Son semiconductores a los cuales se les añaden, mediante procesos de difusión u otros métodos, impurezas de tipo donadoras (átomos de valencia 5), tales como arsénico, fósforo o antimonio; lo que favorece la aparición de electrones libres en el material. En nuestro caso el semiconductor usado es silicio y la impureza donadora es el fósforo.

Cuando se sustituyen átomos de la red cristalina del semiconductor por átomos de valencia 5, cuatro de sus cinco electrones forman enlaces covalentes con cuatro electrones de los átomos vecinos en el semiconductor, quedando así un electrón débilmente ligado al átomo, tal como se muestra en la figura 9.

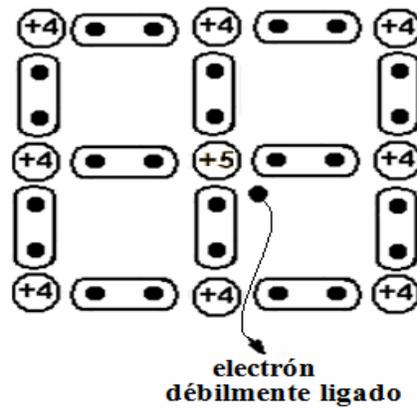


Figura 9. Representación bidimensional de la estructura cristalina de un semiconductor extrínseco tipo n bajo condiciones de equilibrio térmico.

La difusión de este tipo de impurezas al semiconductor introduce niveles de estados de energía en la banda prohibida y una gran cantidad de electrones en la banda de conducción. Este aumento de electrones en la banda de conducción hace que el nivel de Fermi se desplace hacia esta banda, tal como lo señala el diagrama de energía de la figura 10

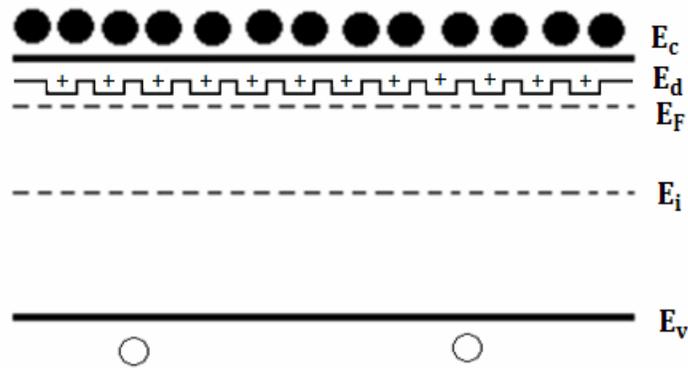


Figura 10. Diagrama de bandas de energía de un semiconductor extrínseco tipo n en equilibrio térmico.

En el caso del silicio, a temperatura ambiente todos los electrones de los átomos donadores quedan libres en la red, formando una densidad de electrones libres en la banda de conducción expresado mediante la siguiente ecuación:

$$n = p + N_d, \quad (10)$$

donde N_d es la densidad de átomos donadores.

La densidad de electrones y huecos presentes en un semiconductor tipo n, está dado por las siguientes ecuaciones:

$$n_n = \frac{\sqrt{N_d^2 + 4n_i^2} + N_d}{2} \quad (11)$$

y

$$p_n = \frac{\sqrt{N_d^2 + 4n_i^2} - N_d}{2}, \quad (12)$$

donde n_n y p_n son la densidad de electrones y huecos en el semiconductor tipo n.

Una manera de reducir estas ecuaciones a una forma mas compacta, es usando la expansión binomial $((1 + x)^m = 1 + mx + \dots = 1 + mx$ para $x \ll 1$). Ahora podrán escribirse de la siguiente manera:

$$n_n = N_d + \frac{n_i^2}{N_d} \approx N_d \quad (13)$$

y

$$p_n = \frac{n_i^2}{N_d} \quad (14)$$

Esto es posible debido a que $n_i^2/N_d \ll 1$

También se puede obtener la posición del nivel de energía de Fermi sustituyendo la ecuación 13 en la ecuación 7, resultando:

$$E_f = E_c - kT \ln \frac{N_c}{N_d} . \quad (15)$$

2.6.2. Semiconductor tipo p.

Son semiconductores a los cuales se le añaden por medio de la difusión u otros métodos, impurezas de tipo aceptoras (átomos de valencia 3), tales como boro, aluminio, galio o indio; que favorecen la aparición huecos en el material. En nuestro caso el semiconductor usado es silicio y la impureza donadora es el boro.

El proceso de difusión ocurre sustituyendo un átomo de la red cristalina de silicio por un átomo de boro que tiene tres electrones en su última capa, formando éstos, enlaces covalentes con tres átomos vecinos de la red y tomando adicionalmente un electrón de uno de los átomos de silicio vecino para estar más estable, dejando un hueco libre en la red, tal como se muestra en la figura 11.

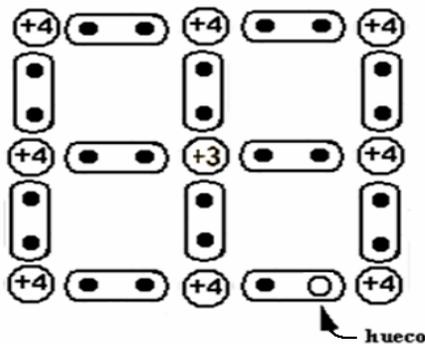


Figura 11. Representación bidimensional de la estructura cristalina de un semiconductor extrínseco tipo p bajo condiciones de equilibrio térmico.

En un semiconductor tipo p, la introducción de átomos de impurezas del tipo aceptoras crean estados de energía en la banda prohibida y una gran cantidad de huecos en la banda de valencia, lo que ubica el nivel de Fermi cerca de esta banda, como se ilustra en la figura 12.

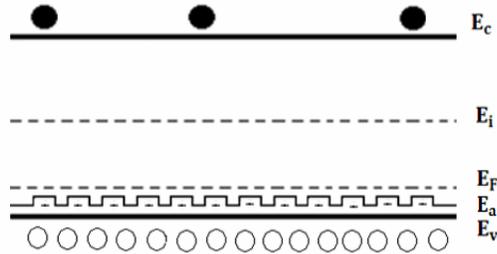


Figura 12. Diagrama de bandas de energía de un semiconductor extrínseco tipo p en equilibrio térmico.

La figura 12, también expone una densidad de huecos en la banda de valencia y una densidad de electrones en la banda de conducción, las cuales están definidas por las siguientes ecuaciones:

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_a} \quad (16)$$

y

$$p_p = N_a \quad (17)$$

donde n_p y p_p son las densidades de electrones y huecos y N_a es la densidad de átomos aceptores en el semiconductor tipo p.

La posición del nivel de energía de Fermi, para este tipo de semiconductores, se obtiene mediante la expresión:

$$E_F = E_V + kT \ln \frac{N_V}{N_A} . \quad (18)$$

2.6.3. Semiconductor extrínseco con impurezas profundas.

En los semiconductores tipo n y p mencionados anteriormente, los niveles de energía aceptores y donadores se ubican cerca de la banda de conducción y de valencia respectivamente, en estos casos se dice que el semiconductor tiene impurezas llanas, pero cuando el nivel de impurezas se encuentra alejado de estas bandas, se dice que la impureza es profunda.

Cuando se introducen impurezas profundas como el oro en silicio tipo n el material resultante adquiere nuevas propiedades, debido a que los átomos de oro se comportan como trampas para los electrones en el material. Se puede decir que el semiconductor ha sido compensado con oro, tal como se muestra en la figura 13.

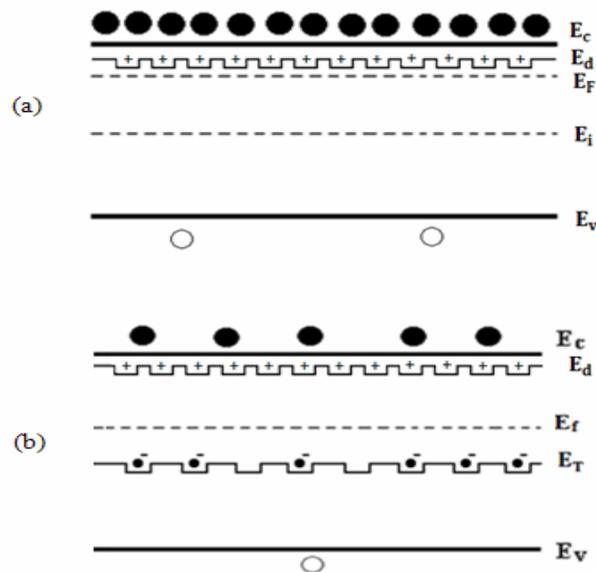


Figura 13. (a) semiconductor libre de trampas. (b) el mismo semiconductor con un nivel de trampas de oro.

En la figura 13 se hace la comparación de un semiconductor tipo n sin trampas (a) y con trampas (b). Bajo condición de equilibrio térmico algunas de estas trampas están llenas con electrones, lo que reduce la cantidad de los mismos en la banda de conducción.

2.7 Unión p-n

Una unión p-n es un cristal semiconductor único, con una región dopada con impurezas aceptoras y otra con impurezas donadoras, a este cristal se le da el nombre de diodo. En el proceso de su formación hipotética, se produce una difusión de electrones (J_n) desde la región n a la región p y una difusión de huecos (J_p) desde la región p a la n, representada por las siguientes ecuaciones:

$$J_n = qD_n \nabla n \quad (19)$$

y

$$J_p = -qD_p \nabla p, \quad (20)$$

donde D_n y D_p son las constantes de difusión de electrones y huecos respectivamente, las cuales son descritas por las siguientes ecuaciones:

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n \quad (21)$$

y

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p, \quad (22)$$

donde μ_n y μ_p son las movilidades de los electrones y huecos respectivamente.

Al establecerse estas corrientes de portadores de carga, aparecen cargas fijas en una zona a ambos lados de la unión, llamada **zona de vaciamiento**. A medida que progresa el proceso de difusión de portadores, esta zona va incrementando su anchura profundizando en el cristal a ambos lados de la unión metalúrgica. Sin embargo, el desbalance de iones positivos en la zona n y de iones negativos en la zona p, crea un campo eléctrico (\mathcal{E}) que actuará sobre los electrones y huecos libres de la zona n y p respectivamente, con una determinada fuerza de desplazamiento, que se opondrá a la corriente de electrones y huecos hasta hacerla cero. Como se observa en las figuras 14 y 15.

En la figura 14, se muestran los diagramas de energía de los semiconductores tipo p y tipo n antes de la unión.

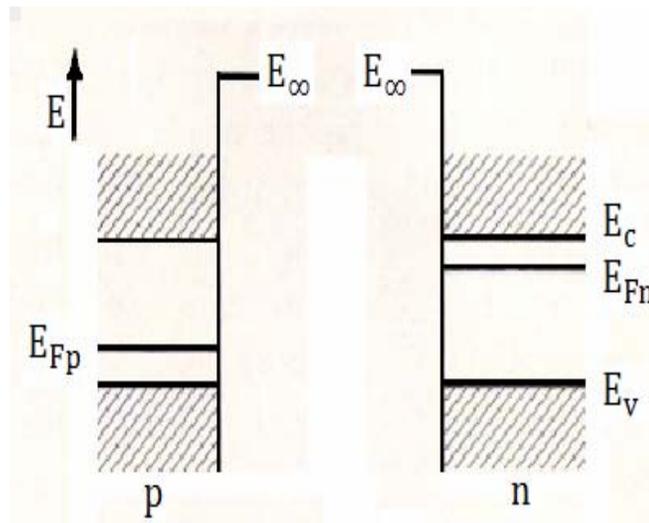


Figura 14. Diagrama de energía de los semiconductores tipo p y tipo n antes de la unión.

En la figura 14, se observa la posición característica del nivel de energía de Fermi en cada uno de los semiconductores. Para el tipo p en la banda de energía prohibida cerca del borde superior de la banda de valencia y para el tipo n en la banda prohibida cerca del borde inferior de la banda de conducción.

Cuando se unen estos dos semiconductores, en estado de equilibrio debe existir un único nivel de energía de Fermi, tal como lo muestra la figura 14 (a).

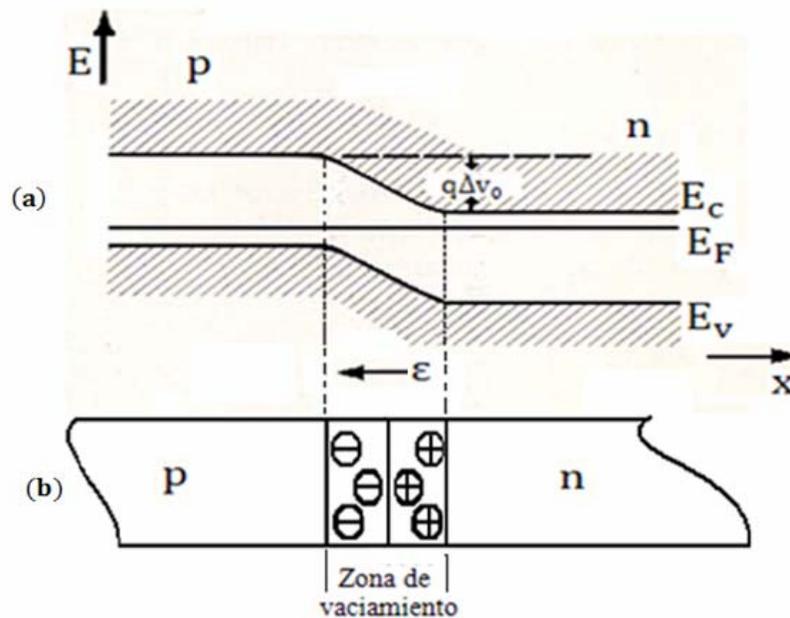


Figura 15. (a) Diagrama de energía de la unión p-n bajo condición de equilibrio. (b) diodo de unión p-n en condición de equilibrio.

Este único nivel de Fermi ocasiona una dobladura de las bandas de energía, tanto para el semiconductor tipo p como para el tipo n, creándose la zona de vaciamiento, debido a la diferencia de potencial (ΔV_0), que a su vez da origen al campo eléctrico (ϵ), en esta zona, en sentido del semiconductor n hacia el p.

2.8 Polarización inversa.

Cuando se le aplica un potencial más positivo a la región n que a la región p, se crea un campo eléctrico (ϵ_{pi}) que tiene el mismo sentido del ya presente en la zona de vaciamiento, haciendo que ésta aumente su tamaño e impida aun más el flujo eléctrico. En este caso se dice que el diodo está polarizado inversamente; y se muestra en la figura 16.

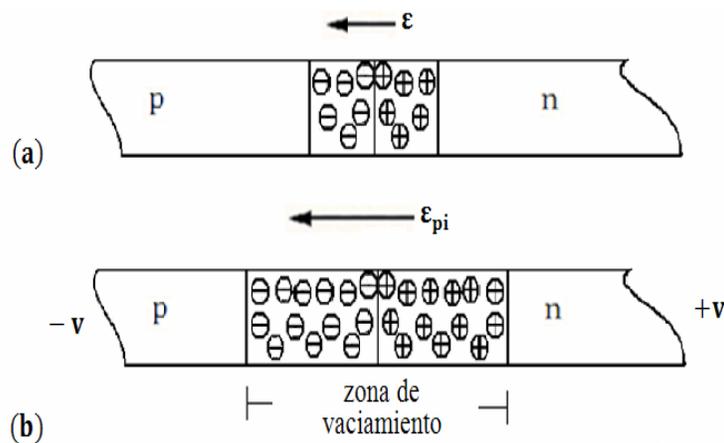


Figura 16. (a) Diodo de unión p-n en condición de equilibrio. (b) diodo de unión p-n polarizado inversamente.

2.9 Polarización directa

Cuando el potencial aplicado a la región p es más positivo que el aplicado a la región n, la diferencia de potencial crea un campo eléctrico (ϵ_{pd}) que se opone al de la zona de vaciamiento, haciendo que ésta disminuya su tamaño y se establezca un flujo eléctrico. Esto se conoce como polarización directa de un diodo y está representado por la figura 17.

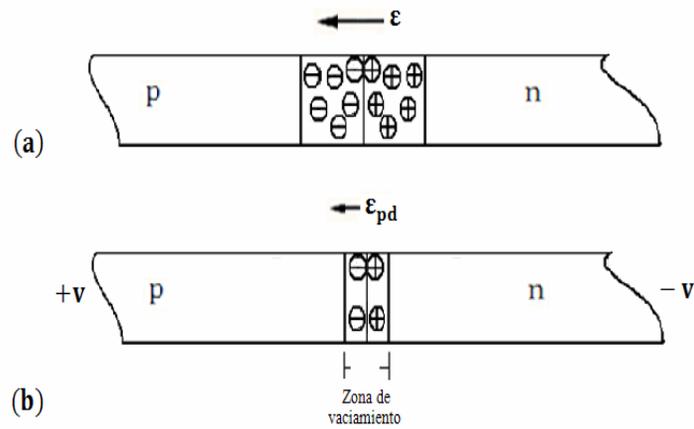


Figura 17. (a) Diodo de unión p-n en condición de equilibrio. (b) diodo de unión p-n polarizado directamente.

La figura 18 muestra las características ideales de corriente y voltaje de un diodo en polarización inversa y directa.

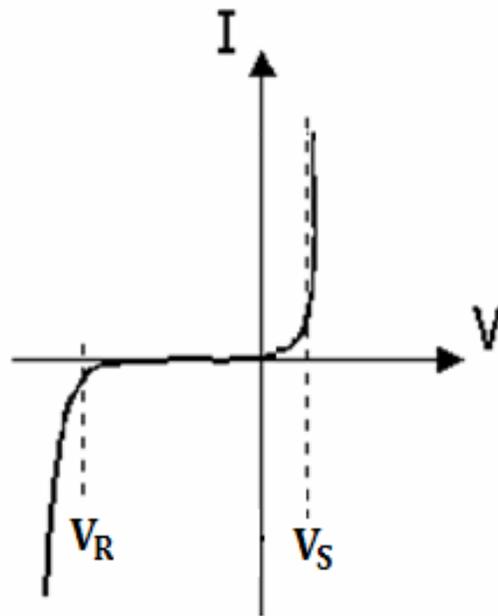


Figura 18. Característica I-V de un diodo de unión p-n, con voltaje de ruptura V_R y de saturación V_S .

2.10 Zona de vaciamiento en equilibrio.

En una unión $p^+ - n$, la región p^+ tiene una alta densidad de impurezas en comparación con la n , como consecuencia deben ionizarse una gran zona con átomos donadores para neutralizar los iones de los átomos aceptores hasta que se alcance el equilibrio. Así el ancho de la zona de vaciamiento está casi en su totalidad en la región n , tal como se muestra en la figura 19.

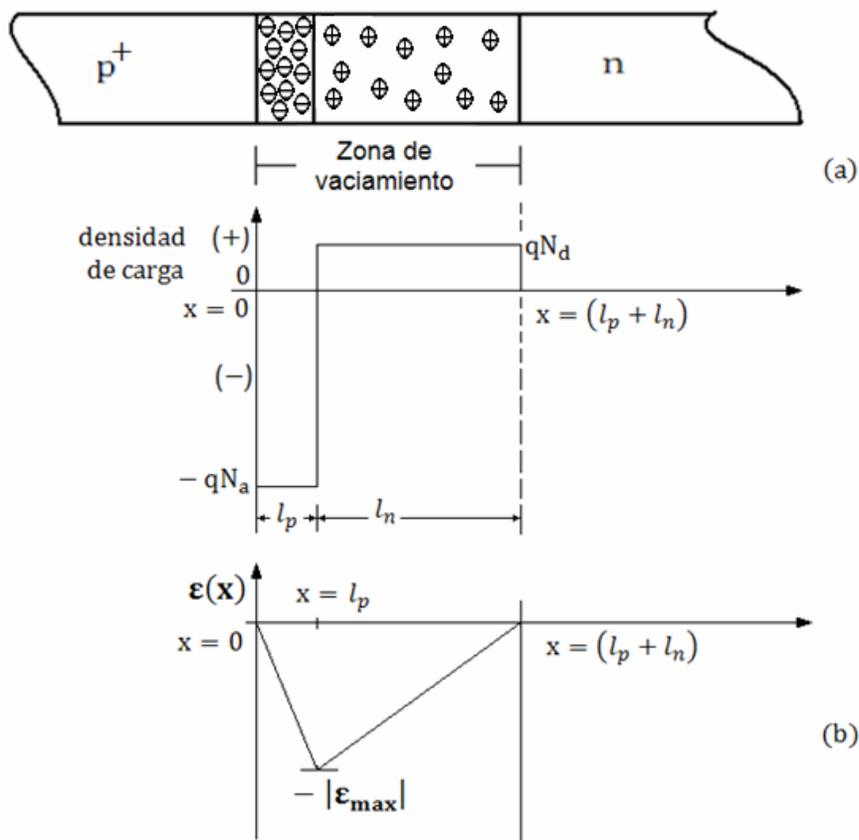


Figura 19. (a) Representación gráfica de la densidad de carga-distancia de la zona de vaciamiento para un diodo de unión $p^+ - n$. (b) representación gráfica del campo eléctrico-distancia de la zona de vaciamiento para un diodo de unión $p^+ - n$ con un máximo valor negativo del campo en la unión metalúrgica.

Bajo condiciones de equilibrio, el número de iones negativos es igual al número de iones positivos en la zona de vaciamiento y puede ser expresado por la siguiente ecuación:

$$N_a l_p = N_d l_n \quad (23)$$

donde l_p representa el ancho de la zona de vaciamiento que se adentra hacia el lado p y l_n representa el ancho de la zona de vaciamiento que se adentra hacia el lado n y.

Para obtener el campo eléctrico máximo (ϵ_{max}) en la zona de vaciamiento, se hace uso de la ley de Gauss aplicándola en la región l_p de la zona de vaciamiento.

$$\epsilon_0 \epsilon_r \frac{d\epsilon}{dx} = -qN_a \quad (24)$$

donde ϵ_0 es la permitividad del espacio libre de cargas y ϵ_r la constante dieléctrica del semiconductor. Integrando esta ecuación se obtiene:

$$\epsilon = \frac{qN_a}{\epsilon_0 \epsilon_r} x + B \quad (25)$$

De acuerdo al gráfico de la figura 19 (b), cuando $x = 0$, $\epsilon = 0$ para que esto se cumpla $B = 0$. Para $x = l_p$ se obtiene que el campo eléctrico máximo es:

$$|\epsilon_{max}| = \frac{qN_a l_p}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (26)$$

También se puede obtener otra expresión para el campo eléctrico máximo, la sustituir la ecuación 23 en la 26. resultando:

$$|\epsilon_{max}| = \frac{qN_d l_n}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (27)$$

La diferencia de potencial total en la zona de vaciamiento se puede obtener integrando el campo eléctrico en esta zona, por medio de la siguiente ecuación:

$$|\Delta v_0| = \int_0^{i_p+i_n} \mathbf{e}(x) dx, \quad (28)$$

donde $|\Delta v_0|$ representa el área bajo la curva de la figura 19 (b). la integral la ecuación 28 se obtiene:

$$|\Delta v_0| = \frac{q}{2\epsilon_0\epsilon_r} (N_a l_p^2 + N_d l_n^2). \quad (29)$$

Sustituyendo las ecuaciones 23, 26 y 27 en la 29 esta se reduce a:

$$|\Delta v_0| = \frac{|\mathbf{e}_{max}| l_n}{2} \left(1 + \frac{N_d}{N_a} \right). \quad (30)$$

Expresión que representa la altura de la barrera.

Despejando l_n de la ecuación 28 y utilizando las ecuaciones 23, 26 y 27 se obtienen las siguientes expresiones [6]:

$$l_n = \left[\Delta v_0 \left(\frac{2\epsilon_0\epsilon_r}{qN_d} \frac{N_a}{N_a + N_d} \right) \right]^{1/2} \quad (31)$$

y

$$L_p = \left[\Delta V_0 \left(\frac{2\epsilon_0 \epsilon_r N_d}{q N_a (N_a + N_d)} \right) \right]^{1/2} \quad (32)$$

2.11 Capacitancia de un diodo semiconductor.

Aunque un diodo no es un capacitor propiamente dicho, se puede considerar que tienen una estructura similar. Las regiones p y n se pueden modelar como las placas del capacitor y el aislante es la zona de vaciamiento. Gracias a esta estructura es posible hacer mediciones de capacitancia en estos dispositivos, la cual va a depender del ancho de la zona de vaciamiento, que a su vez depende del dopaje de los semiconductores y del potencial aplicado. Este comportamiento se puede observar mediante el gráfico de la figura 20.

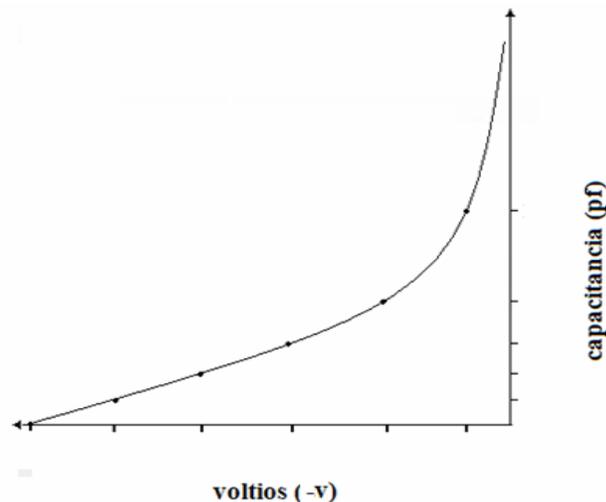


Figura 20. Gráfica de la capacitancia de un diodo de unión p-n.

De la misma forma que para un capacitor, se puede obtener una expresión para la capacitancia de un diodo de unión p-n, mediante la siguiente ecuación:

$$C = \frac{dq_{sc}}{dv}, \quad (33)$$

donde dq_{sc} representa la variación de la carga de los iones donadores o aceptores, debido a la variación del voltaje (dv) en la zona de vaciamiento.

Mediante el uso de las ecuaciones 23, 31 y 32 se puede expresar q_{sc} mediante la siguiente ecuación:

$$q_{sc} = qAN_d L_n = qAN_a L_p = A \left| \frac{2q\epsilon_0\epsilon_r N_a N_d (\Delta v_0 - v)}{N_a + N_d} \right|^{1/2}. \quad (34)$$

Al sustituir la ecuación 32 en la 31 y realizando la derivada, se obtiene que la capacitancia en una unión semiconductor/semiconductor se puede expresar por la siguiente ecuación:

$$C = A \left| \frac{q\epsilon_0\epsilon_r}{2(1/N_a + 1/N_d)(\Delta v_0 - v)} \right|^{1/2}, \quad (35)$$

Donde ΔV_0 es la diferencia de potencial entre los lados de la unión, bajo condiciones de equilibrio, ϵ_0 es la permitividad del espacio libre de cargas, ϵ_r es la constante dieléctrica del semiconductor, A es el área de la sección transversal de la unión, v es el voltaje aplicado y q es el modulo de la carga del electrón [6].

La ecuación 35 plantea que al graficar $1/C^2 - v$, resulta una recta, porque cumple con la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{C^2} = -\frac{2v(1/N_a + 1/N_d)}{q\epsilon_0\epsilon_r A^2} + \frac{2\Delta v_0(1/N_a + 1/N_d)}{q\epsilon_0\epsilon_r A^2}, \quad (36)$$

en la cual la pendiente depende de la densidad de donadores y aceptores. Si el diodo es de unión p⁺-n, la densidad de aceptores es muy alta y el ancho de la zona de vaciamiento está casi en su totalidad en el semiconductor n, así la ecuación 36 se reduce a la siguiente expresión:

$$\frac{1}{C^2} = -\frac{2v}{q\epsilon_0\epsilon_r A^2 N_d} + \frac{2\Delta v_0}{q\epsilon_0\epsilon_r A^2 N_d}, \quad (37)$$

En la cual la pendiente de la recta (m) se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$m = \frac{\frac{1}{C_2^2} - \frac{1}{C_1^2}}{v_2 - v_1} = -\frac{2}{q\epsilon_0\epsilon_r A^2 N_d}, \quad (38)$$

donde $\frac{1}{C_2^2}$, $\frac{1}{C_1^2}$, v_2 y v_1 son valores extraídos de la recta resultante.

2.12 Unión p⁺-n y n⁺-n con sustrato tipo n compensado con oro.

Tal como se mostró en el diagrama de energía de la figura 13 (b) cuando se difunde oro en silicio tipo n a concentraciones del orden de las concentraciones de las impurezas llanas, el nivel de energía de Fermi se ubica cerca del nivel de energía intrínseco. Al igual que en una unión p-n ordinaria, en una unión del tipo p⁺-n ó n⁺-n en condiciones de equilibrio debe existir un único nivel de Fermi, ésto provoca las dobladuras de las bandas de valencia y conducción para los semiconductores unidos. Tal como se muestra en la figura 21.

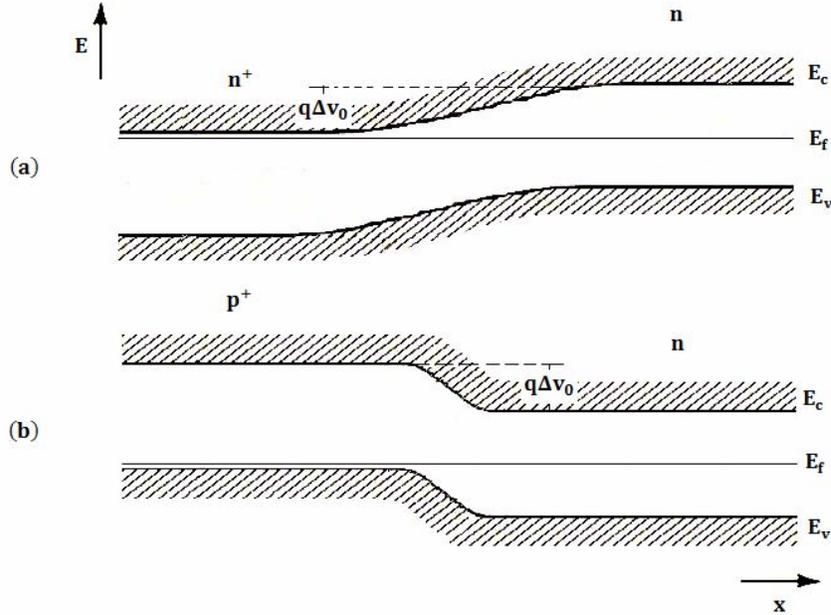


Figura 21. (a) Diagrama de energía de la unión n⁺-n con silicio tipo n compensado con oro, bajo condiciones de equilibrio. (b) Diagrama de energía de la unión p⁺-n, silicio tipo n compensado con oro bajo condiciones de equilibrio.

La figura 21 indica que la unión n⁺-n y la unión p⁺-n tienen el mismo comportamiento que el de la unión p-n de un diodo. Gracias a esto es posible construir las curvas de capacitancia para ambas uniones.

El hecho de tener oro en el sustrato n, trae como consecuencia la disminución significativa de la concentración de portadores en la banda de conducción, debido a que las trampas de oro están llenas con electrones. En este caso la densidad de carga efectiva (N) se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$N = q(N_{Au} + N_d), \quad (39)$$

donde N_{Au} es la densidad de trampas ionizadas (oro).

Si N_d es conocida se puede determinar N_{Au} , construyendo el gráfico del inverso del cuadrado de la capacitancia en función del voltaje. La pendiente de ésta depende de la concentración de carga efectiva $q(N_{Au} + N_d)$. Usando la ecuación 38 se obtiene:

$$N = \frac{2}{mq\epsilon_0\epsilon_r A^2} \quad (40)$$

donde m es la pendiente extraída del gráfico

Combinando la ecuación 37 con la 38 se obtiene:

$$N_{Au} = \frac{2}{mq\epsilon_0\epsilon_r A^2} - N_d \quad (41)$$

CAPITULO III. METODOLOGÍA

Para estudiar la unión n^+-n se utilizó la pastilla mostrada en la figura 22, en la que están contenidos los dispositivos de doble inyección p^+-n-n^+ y n^+-n-n^+ con estructura planar. La misma fue construida por el Laboratorio de Electrónica del Estado Sólido de la Universidad de Cincinnati.

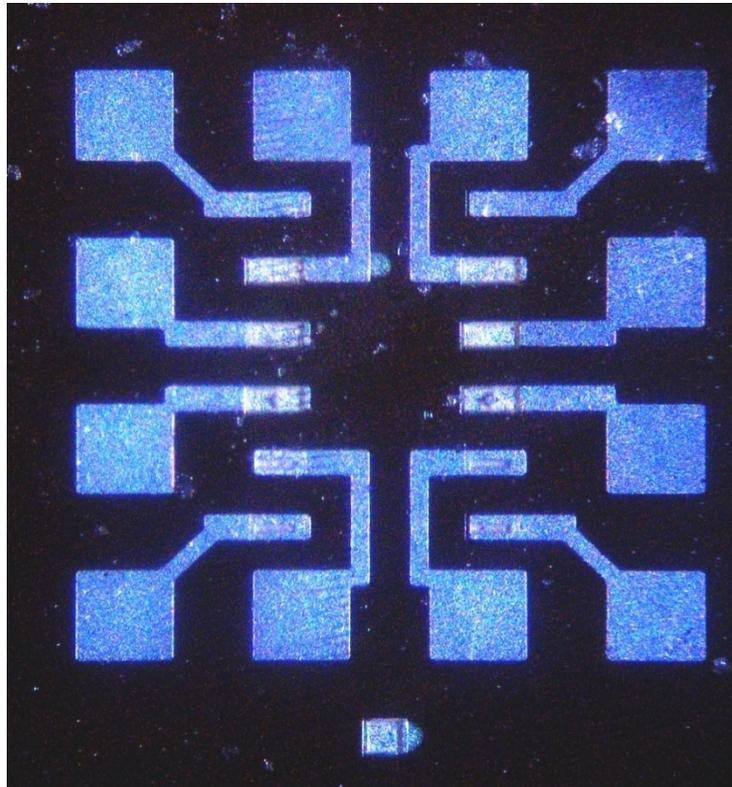


Figura 22. Pastilla de silicio tipo n compensada con oro donde están contenidos los dispositivos de doble inyección.

La pastilla de la figura 22 fue fabricada en una oblea de silicio tipo n compensada con oro, con fósforo como impureza donadora. La oblea es de 250 μm de espesor y de 2

pulgadas de diámetro; la misma posee una resistividad (ρ) de $10\Omega\text{cm}$, lo que equivale a una concentración de $5 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$ átomos de fósforo.

La figura 23 representa en forma más detallada a la pastilla de la figura 21. En ésta se identifican las ubicaciones y dimensiones de los electrodos que lo caracterizan.

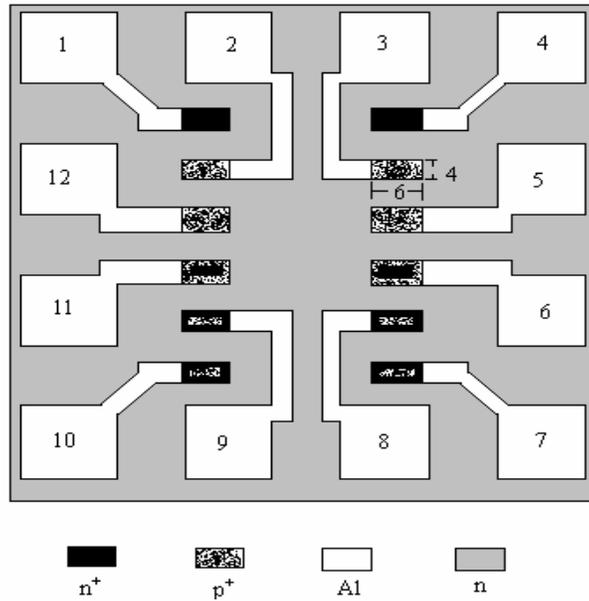


Figura 23. Diagrama de la pastilla donde se especifican los componentes del mismo.

Los electrodos: 1 y 4 son del tipo n^+ ; 2, 3, 5 y 12 del tipo p^+ ; 6 y 11 son electrodos compuestos con bordes del tipo p^+ y centro del tipo n^+ y 7, 8, 9 y 10 son electrodos compuestos con bordes del tipo n^+ y centro del tipo p^+ .

Las dimensiones de los electrodos están expresadas en unidades de mils o milésima de pulgada ($1\text{mils} = 2,54 \times 10^{-3}\text{cm}$). Se tiene que el área de cada uno de éstos es de 24mils^2 que es igual a $1,55 \times 10^{-4}\text{cm}^2$ [3].

La estructura de los electrodos compuestos no permite configurar dispositivos de doble inyección del tipo p^+-n-n^+ o del tipo n^+-n-n^+ ; por esta razón se seleccionaron los electrodos 1, 2, 3 y 4.

3.1 Conexión entre los electrodos de los dispositivos de doble inyección y los instrumentos de medición.

Debido a las pequeñas dimensiones a manipular, fue necesaria la construcción de la base porta muestra de la figura 24, para lograr las conexiones entre los electrodos de los dispositivos y los instrumentos de medición.

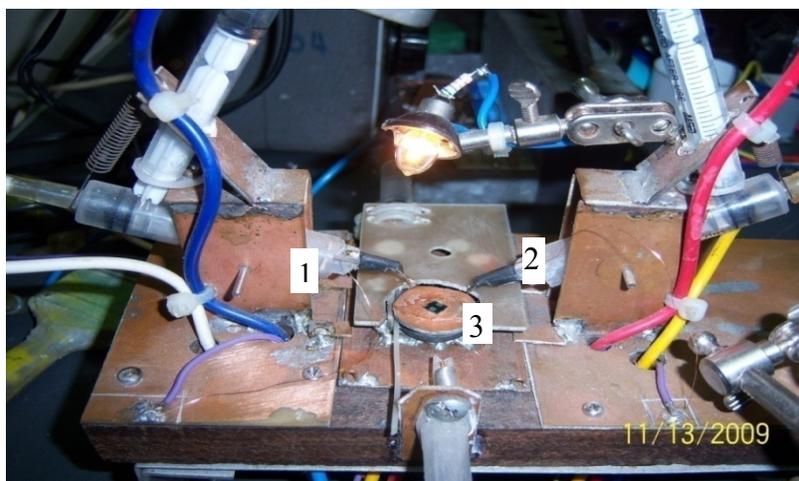


Figura 24. Base porta muestra.

La conexión es hecha por medio de las agujas ubicadas en los extremos de cada uno de los brazos 1 y 2, los cuales se pueden mover en un plano vertical. La pastilla es colocada en la bandeja 3 que puede rotar y además moverse horizontalmente. Ésto permite orientar la pastilla de manera tal que los brazos 1 y 2 puedan tocar los contactos que conforman a los dispositivos de doble inyección, tal como se observa en la figura 25.



Figura 5. Conexión entre los brazos y los contactos de la pastilla.

Los movimientos que realiza esta base son controlados por medio del tablero de mando mostrado en la figura 26.

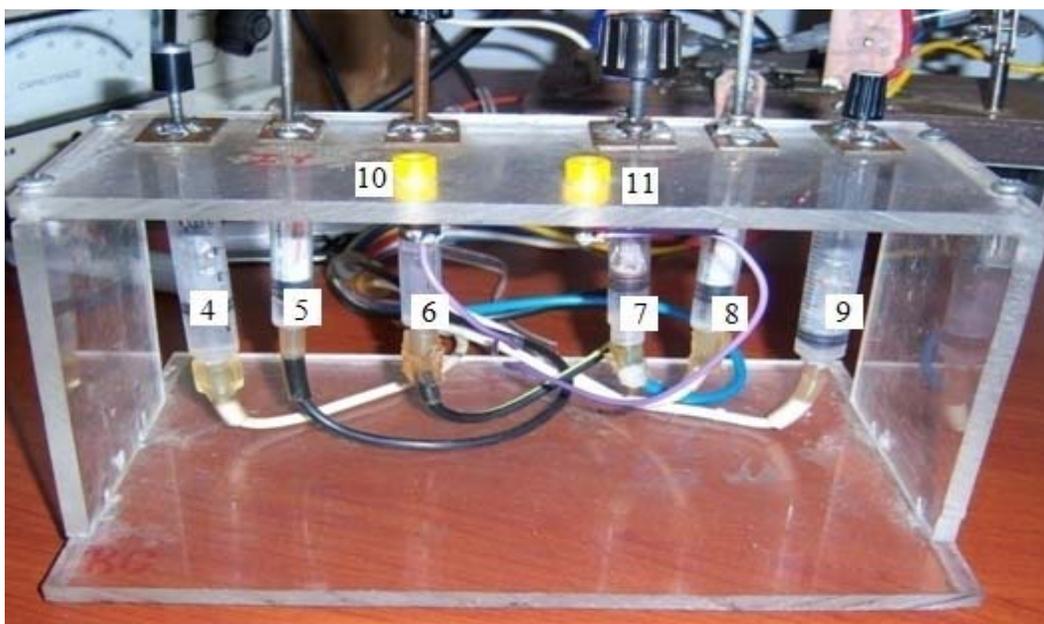


Figura 26. Tablero de mando de la base porta muestra.

Los movimientos son transmitidos desde las inyectoras 4, 5, 6, 7, 8 y 9 mediante presión hidráulica hasta los brazos 1 y 2 y hasta la bandeja 3. Los conectores 10 y 11 son usados para unir a los instrumentos con la muestra.

3.2. Montaje del circuito para determinación de las curvas de corriente en función del voltaje en los dispositivos de doble inyección (p^+-n-n^+ y n^+-n-n^+) en polarización directa e inversa.

En esta parte fue necesario armar un circuito de medición de corriente en función del voltaje aplicado [4], representado por la figura 27:

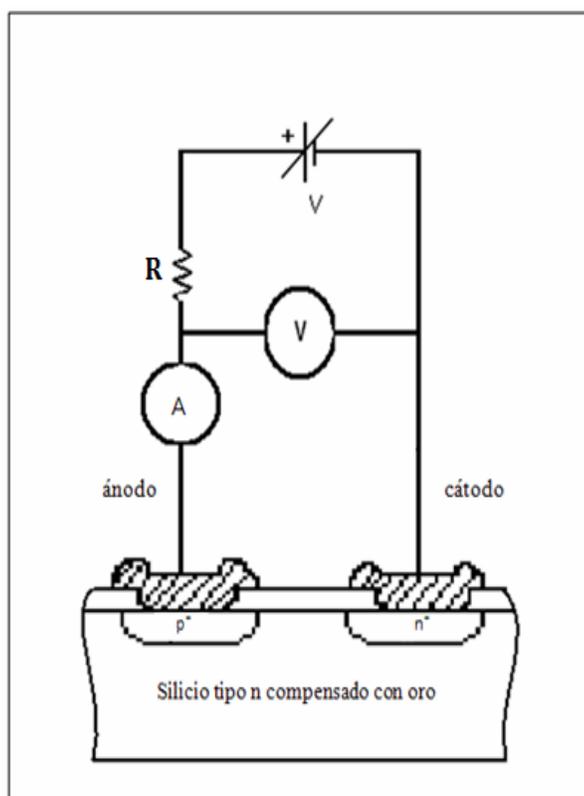


Figura 27. Circuito de medición para obtener datos de corriente en componentes de inyección doble.

Para el montaje de este circuito se utilizó la fuente de voltaje Hp modelo MC 3030C de la figura 28 y 2 multímetros maca UNIT modelo UT-55 mostrado en la figura 29.



Figura 28. Fuente de voltaje Hp modelo MC 3030C.



Figura 29. Multímetro UNIT modelo UT-55.

Las curvas se construyeron punto por punto a partir de las lecturas del amperímetro y el voltímetro. Estos datos fueron introducidos en el programa “originpro7.5”. Para polarizar directa e inversamente el dispositivo, sólo se invirtió la polaridad de la fuente de voltaje.

3.3 Determinación de las curvas de capacitancia en función del voltaje en los dispositivos de doble inyección (p^+-n-n^+ y n^+-n-n^+) en polarización directa e inversa en los dispositivos de doble inyección.

Las curvas se determinaron armando el circuito de medición de capacitancia en función del voltaje aplicado [5]. En el circuito original se hace uso de un registrador, para trazar la curva directamente. Debido a que la toma de datos se realizará punto a punto, el circuito se reducirá al mostrado en la figura 30:

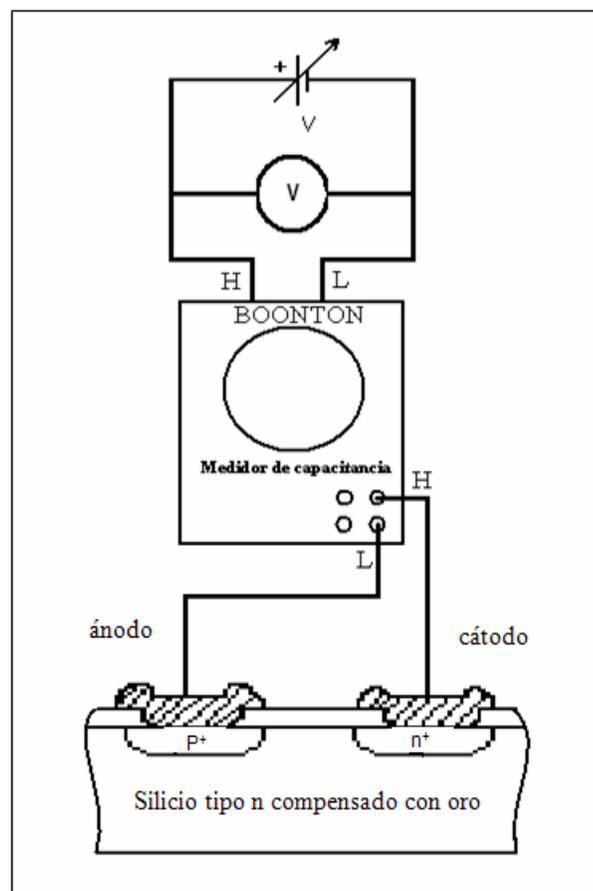


Figura 30. Circuito de medición para obtener datos de capacitancia en componentes de inyección doble.

Para armar el circuito de la figura 30 se utilizó el medidor de capacitancia marca Booton modelo 72B, mostrado en la figura 31.



Figura 31. Medidor de capacitancia Booton modelo 72B.

La polarización directa e inversa del dispositivo se hizo invirtiendo la polaridad de la fuente de voltaje.

3.4 Determinación de la densidad de oro difundido en el sustrato de silicio tipo n y el efecto que este produce en una unión n-n⁺.

Para determinar la densidad de oro difundido se necesitó el análisis de las curvas de capacitancia en función del voltaje en polarización inversa para los dispositivos de doble inyección p⁺-n-n⁺ y n⁺-n-n⁺, de la que se extrajeron las pendientes de los tramos más rectos.

Los valores obtenidos de las pendientes fueron sustituidos en la ecuación 41, con la que se obtuvieron las densidades de oro difundido en el sustrato tipo n con densidad de donadores de 5×10^{14} , para cada dispositivo.

El efecto que produce el oro en la unión n⁺-n, se explicó por medio de los comportamientos de las curvas de corriente y capacitancia en función del voltaje y de la obtención de las densidades de oro.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DICUSIÓN

Los resultados obtenidos en este trabajo se muestran de manera gráfica. De éstas se extrajo información de las medidas de corriente-voltaje y de capacitancia- voltaje con las que se estudió el comportamiento de una unión $n-n^+$ en silicio tipo n dopado con oro.

4.1 Curvas de corriente en función del voltaje en dispositivos de doble inyección $p+-n-n+$ en base a silicio dopado con oro en polarización directa e inversa.

Las curvas que se observan a continuación se construyeron mediante medidas de corriente-voltaje en polarización directa e inversa, en un dispositivo de doble inyección $p+-n-n+$, en las que fue necesario limitar la corriente a un máximo de 0,18 mA con un resistor de $100K\Omega$, debido a que estos se dañan cuando la corriente supera los 0,2mA. (Ver figura 27)

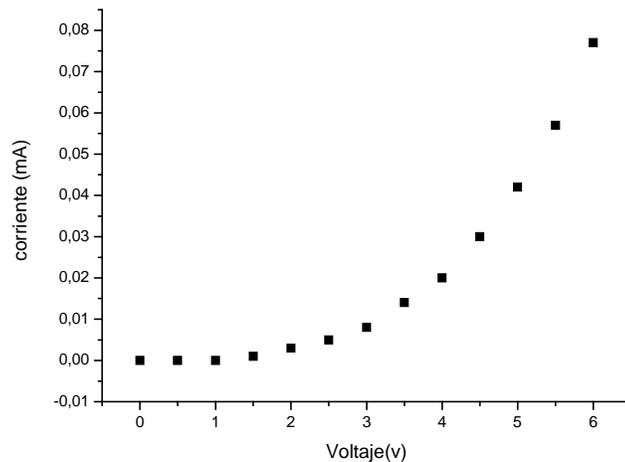


Figura 32. Curva característica de corriente voltaje para un dispositivo de doble inyección $p+-n-n+$ en polarización directa.

La figura 32 muestra la curva obtenida de los datos experimentales de corriente-voltaje en polarización directa. Aquí se observa un comportamiento similar a la curva ideal de corriente-voltaje de un diodo de unión p-n en polarización directa, pero en este caso la saturación empieza a notarse a los 1,04 voltios aproximadamente y además se tiene una corriente de 0,077 mA para 6 voltios, esto es debido al número de trampas de oro difundidas en el sustrato tipo n, que hace muy resistivo el mismo.

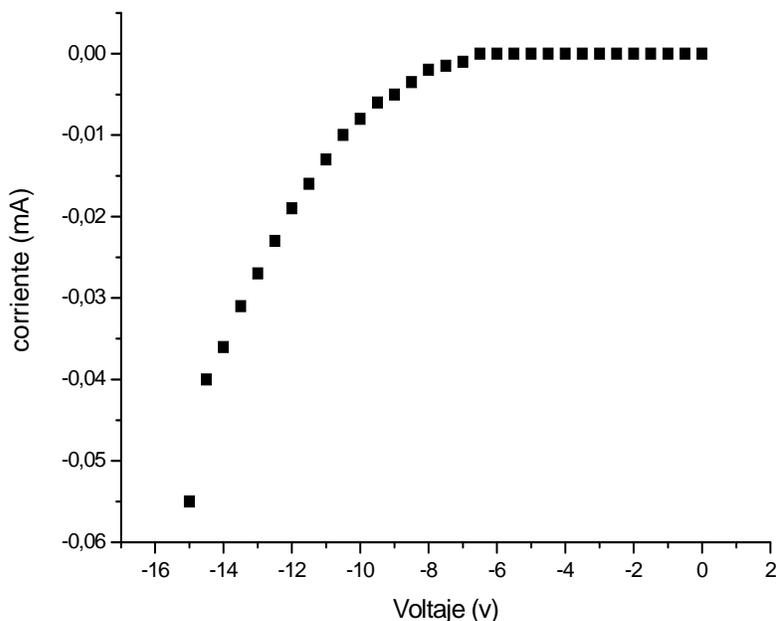


Figura 33. Curva característica de corriente voltaje para un dispositivo de doble inyección p+-n-n+ en polarización inversa, con corriente limitada a 0,18mA.

En la figura 33 se muestra el gráfico de los datos experimentales de corriente-voltaje en polarización inversa, en un dispositivo de doble inyección p+-n-n+. El comportamiento de esta curva es similar a la curva ideal de corriente-voltaje de un diodo de unión p-n en polarización inversa. En este caso el voltaje de ruptura ocurre a los -6,55 voltios, pero no se presenta la corriente de avalancha. Como se mencionó anteriormente esto es producto de la difusión de oro en el sustrato tipo n.

4.2 Determinación de las curvas de corriente en función del voltaje en dispositivos de doble inyección n⁺-n-n⁺ en base a silicio dopado con oro.

El siguiente gráfico representa los datos obtenidos experimentalmente de un dispositivo de doble inyección n⁺-n-n⁺, con corriente limitada a 0,18 mA mediante un resistor de 100 kΩ. En este dispositivo una de las dos uniones n-n⁺ siempre está polarizada inversamente.

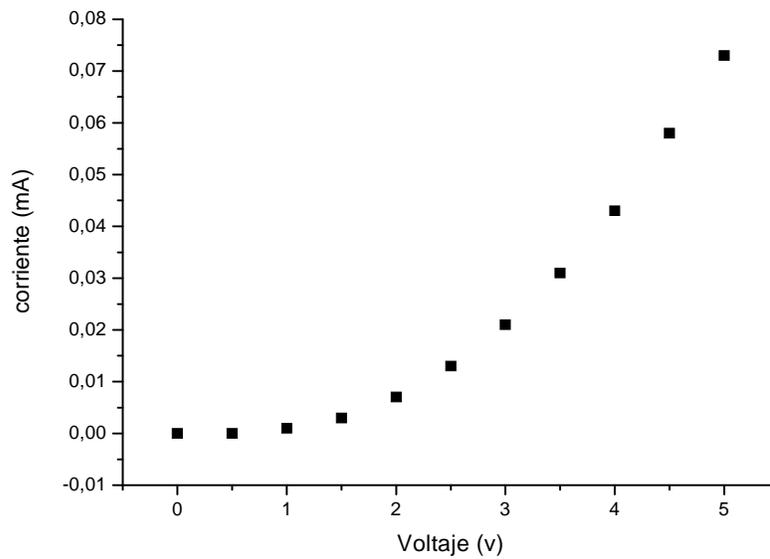


Figura 34. Curva característica de corriente voltaje para un dispositivo de doble inyección n⁺-n-n⁺.

La figura 34 muestra que la unión n⁺-n-n⁺ tiene el comportamiento de un diodo de unión p-n con una tensión de ruptura de 1,5 voltios aproximadamente. Para que esto pueda ser posible, el sustrato tipo n debe tener características de tipo p, debido a las concentraciones de oro difundido. Estos resultados respaldan la teoría que señala que se comete un error en asumir que en los dispositivos de doble inyección p⁺-n-n⁺, la difusión n⁺ hecha en el sustrato tipo n forma un contacto con características óhmicas.

4.3 Determinación de las curvas de capacitancia en dispositivos de doble inyección p+-n-n+ en base a silicio dopado con oro en polarización directa e inversa.

Las figuras 35 y 36 representan los resultados obtenidos de las medidas de capacitancia-voltaje para un dispositivo de doble inyección p+-n-n+ en polarización directa e inversa

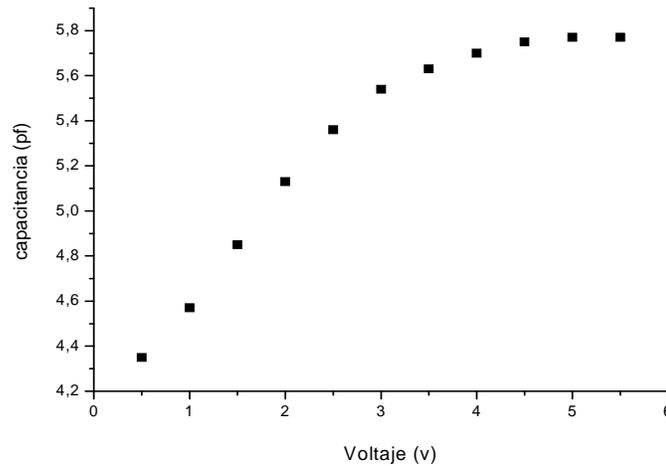


Figura 35. Curva característica de capacitancia-voltaje para un dispositivo de doble inyección p+-n-n+ en polarización directa.

En la figura 35 se observa, que en polarización directa la capacitancia en el dispositivo crece cuando se aumenta el voltaje, esto puede deberse a que el ancho de la zona de vaciamiento se va reduciendo cuando el voltaje va aumentando. Este comportamiento es familiar, ya que también está presente en un diodo de unión p-n bajo condición de polarización directa.

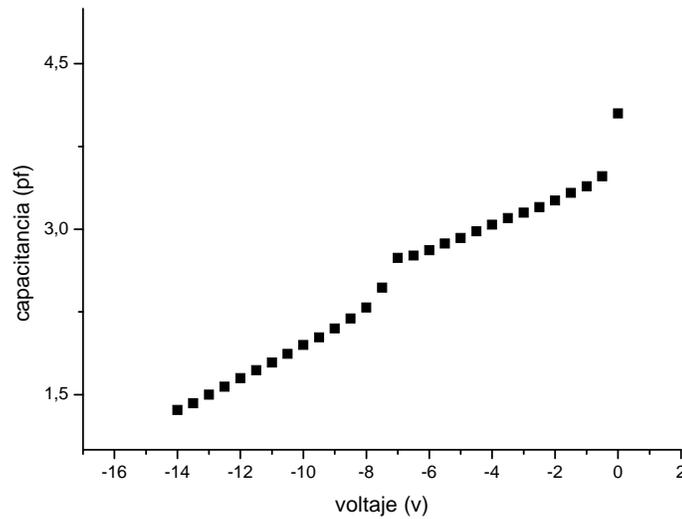


Figura 36. Curva característica de capacitancia-voltaje para un dispositivo de doble inyección p+-n-n+ en polarización inversa.

De las medidas de capacitancia-voltaje representadas por la figura 36, se puede observar la disminución de la capacitancia a medida que el voltaje aumenta. Ésto indica que el ancho de la zona de vaciamiento se va incrementando, como consecuencia de la polarización aplicada al dispositivo. Este comportamiento también se puede observar en la figura, que representa la Curva característica de capacitancia-voltaje de un diodo de unión p-n en polarización inversa.

4.4 Determinación de las curvas de capacitancia en dispositivos de doble inyección n⁺-n-n⁺ en base a silicio dopado con oro.

La figura 37 representa los datos experimentales obtenidos de las medidas de capacitancia-voltaje en un dispositivo de doble inyección n⁺-n-n⁺, en la que se observa como la capacitancia decrece cuando se va aumentando el voltaje. Este comportamiento es el que caracteriza a un diodo de unión p-n bajo condición de polarización inversa.

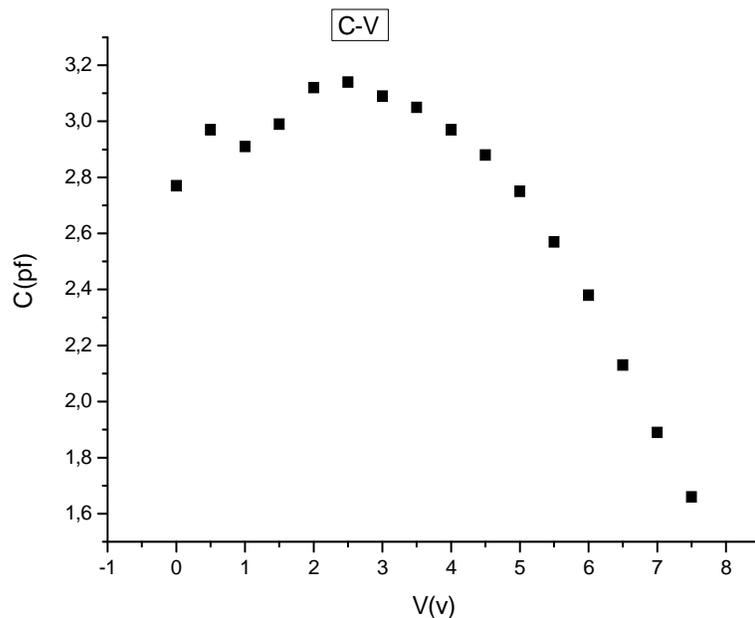


Figura 37. Curva característica de capacitancia-voltaje para un dispositivo de doble inyección n⁺-n-n⁺.

Para que un dispositivo de doble inyección n⁺-n-n⁺ pueda tener este comportamiento, es necesario la presencia de una zona de vaciamiento que crece con el aumento de voltaje. Esta debe estar ubicada entre una de las uniones n-n⁺, lo que indica que el oro difundido en la región n ha cambiado sus propiedades a tipo p.

Los resultados obtenidos se contradicen con la teoría que propone que entre la unión n-n⁺ se comporta como un contacto óhmico. De ser esto cierto las medidas de capacitancia en este dispositivo deben ser constantes con la variación del voltaje.

4.5 Determinación de la concentración de oro en silicio tipo n.

El cálculo de la concentración de oro en silicio tipo n, se realizó de los datos experimentales obtenidos de las medidas de capacitancia-voltaje en polarización inversa de los dispositivos de doble inyección p⁺-n-n⁺ y n⁺-n-n⁺, de los cuales se construyeron

las curvas del inverso de la capacitancia al cuadrado en función del voltaje que están representadas por las siguientes figuras.

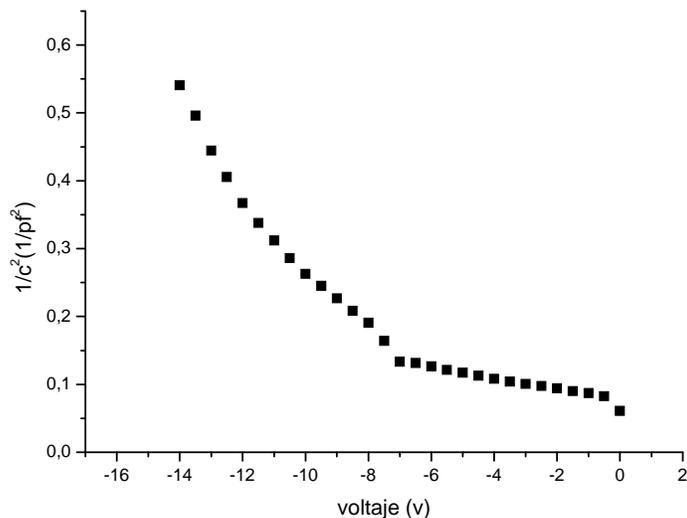


Figura 38. Curva característica del inverso de la capacitancia al cuadrado en función del voltaje para un dispositivo de doble inyección p+-n-n+ en polarización inversa.

De la figura 38 se eligió el tramo de recta comprendido entre los 4 a 7 voltios, para la cual se calculó, por medio de la ecuación de la recta, que la pendiente (m) de ésta es $8,33 \times 10^{21} (fC)^{-1}$. Sustituyendo este resultado en la ecuación 41, se obtiene que la concentración de oro (N_{Au}) en el sustrato de silicio tipo n es aproximadamente $5,90 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

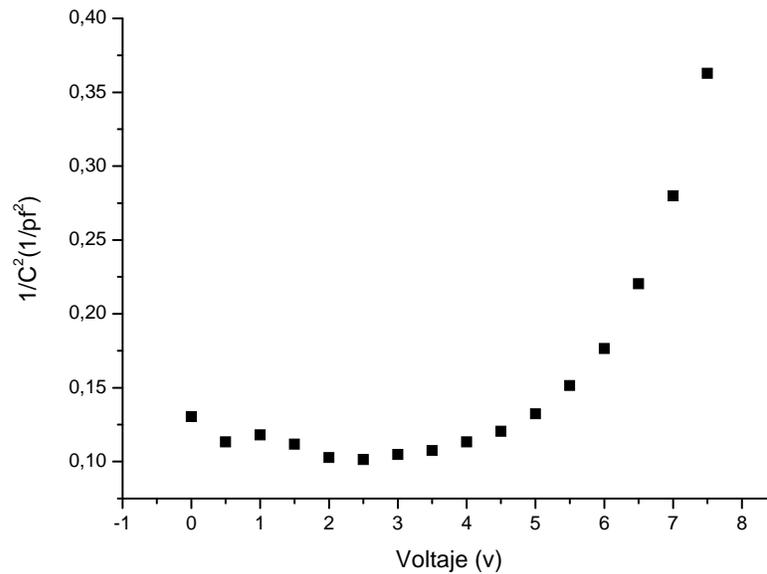


Figura 39. Curva característica del inverso de la capacitancia al cuadrado-voltaje para un dispositivo de doble inyección n⁺-n-n⁺.

De la figura 39 se tomó el tramo de recta comprendido desde los 2,5 a los 4 voltios, obteniendo que la pendiente de ésta es de $7,97 \times 10^{21} (\text{fC})^{-1}$. Sustituyendo este resultado en la ecuación 41, se tiene que la concentración de oro (N_{Au}) en este caso es aproximadamente $6,22 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

Se puede notar que en ambos casos las concentraciones de oro resultaron tener el mismo orden de magnitud (10^{16} cm^{-3}), esto supera a concentración de donadores (N_{D}) en el sustrato tipo n ($5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$), en dos órdenes de magnitud.

Con los resultados obtenidos en este trabajo se afirma la teoría, planteada en investigaciones anteriores [5], que cuando la concentración de trampas de oro compensa la concentración de donadores en el sustrato, el contacto n-n⁺ se comporta como una unión p-n.

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES

Se logró calcular de manera satisfactoria la densidad de oro en el sustrato de silicio tipo n y se determinó que la concentración de éste es mayor que la de los donadores en el sustrato.

Se determinó que el sustrato tipo n cuando está compensado con oro, cambia sus propiedades a tipo p.

Se demostró que la unión $n-n^+$ con silicio tipo n compensado con oro, posee características rectificadoras.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Albella, J. y Martínez, J. 1994. *Fundamentos de electrónica física y microelectrónica*. Editorial Addison-Wesley Iberoamericana. Wilmington, Delaware. EE.UU.
- [2]. Sandoval, F. 2001. El silicio y sus propiedades como material sensor. *Revista Mexicana de Física*. 47(2):107-115.
- [3]. Franco, J. 1989. Operación de uniones en la presencia de impurezas profundas. Trabajo para ascender a la categoría de Profesor Asociado. Departamento de física, Universidad de Oriente, Cumaná.
- [4]. Zetina, A. 2001. *Electrónica Básica*. Primera edición. Editorial LIMUSA. México D.F.
- [5]. Nicollian, E. y Brews, J. 1982. *MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology*. Bell Laboratories Murray Hill. New Jersey.
- [6]. Navon, D. 1975. *Electronic Materials and Devices*. Houghton Mifflin Company. Boston.

HOJA DE METADATOS

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso-1/5

Título	ESTUDIO DE LA UNIÓN $n-n^+$ EN SILICIO TIPO n COMPENSADO CON ORO
Subtítulo	

Autor(es)

Apellidos y Nombres	Código CVLAC / e-mail	
Carvajal Valor Robert Albenis	CVLAC	13835229
	e-mail	Rjrb09@hotmail.com
	e-mail	

Palabras o frases claves:

semiconductores
UNIÓN $n-n^+$
silicio

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso-2/5

Líneas y sublíneas de investigación

Área	Subárea
Licenciatura en Física	

Resumen (abstract):

En el presente trabajo se determinó la concentración de oro (N_{Au}) en el sustrato de silicio tipo n compensado con oro de los dispositivos de doble inyección p⁺-n-n⁺ y n⁺-n-n⁺, por medio de las curvas de corriente y capacitancia en función del voltaje construidas a partir de datos experimentales, de los cuales resultó que $N_{Au} = 5,9 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, lo que supera significativamente a la concentración de donadores en el sustrato ($5,0 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$). Además se realizó el estudio de las curvas antes mencionadas, de las que se determinó que la unión n-n⁺ en estos dispositivos, tiene un comportamiento rectificador, debido a que el sustrato tipo n cambia sus propiedades a tipo p.

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 3/5

Contribuidores:

Apellidos y Nombres	ROL / Código CVLAC / e-mail								
<p>FRANCO SARABIA JOSÉ RAFAEL</p>		CA		AS		TU	x	JU	
	CVLAC								
	e-mail	jf_sapito@hotmail.com							
<p>MARVAL VARGAS DELFIN ANTONIO</p>	ROL	CA	<input type="checkbox"/>	AS	<input type="checkbox"/>	TU	<input type="checkbox"/>	JU	<input checked="" type="checkbox"/>
	CVLAC								
	e-mail								
<p>PÉREZ HERRERA FRANCISCO ALFONSO</p>	ROL	CA	<input type="checkbox"/>	AS	<input type="checkbox"/>	TU	<input type="checkbox"/>	JU	<input checked="" type="checkbox"/>
	CVLAC								
	e-mail								

Fecha de discusión y aprobación:

Año Mes Día

2010	08	09
------	----	----

Lenguaje: SPA

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 4/5

Archivo(s):

Nombre de archivo	Tipo MIME
TESIS.RACV-DOC	APPLICATION/WORD

Alcance:

Espacial: Nacional (Opcional)

Temporal: Intemporal (Opcional)

Título o Grado asociado con el trabajo:

LICENCIATURA

Nivel Asociado con el Trabajo: LICENCIATURA EN FÍSICA

Área de Estudio:

SEMICONDUCTORES

Institución(es) que garantiza(n) el Título o grado:

UNIVERSIDAD DE ORIENTE

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 5/5

Derechos:

Yo, como autor principal de la tesis doy permiso a la difusión de la información Universidad de Oriente, reservándome los derechos de patente y comercio.



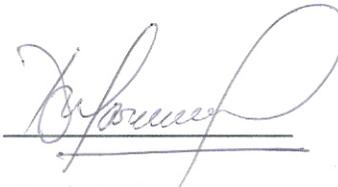
Robert Carvajal

AUTOR



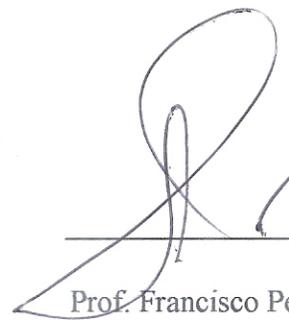
Prof. José Franco

ASESOR



Prof. Delfín Marval

JURADO 1



Prof. Francisco Pé

JURADO 2



DOCTOR EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN