



41
2y

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

DESARROLLO DE UN SISTEMA
AUTOMATICO PARA LA CARACTERIZACION
I-V, C-V DE DISPOSITIVOS
SEMICONDUCTORES

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
FISICO PRESENTA
JESUS EDUARDO LUGO ARCE

México D.F.

1991

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

INTRODUCCION	1
CAPITULO 1. SEMICONDUCTORES	
1.0 Introducción	4
1.1 Semiconductores	4
1.2 Movilidad, conductividad y densidad de portadores	10
1.3 Teoría de la unión p-n	12
1.4 Dispositivos semiconductores	22
CAPITULO 2. SISTEMA DE MEDICION	
2.0 Introducción	28
2.1 Descripción del sistema	28
2.2 Cámara y circuito de medición	30
2.3 Módulo I-V	31
2.4 Módulo C-V	33
CAPITULO 3. TECNICAS DE MEDICION	
3.0 Introducción	36
3.1 Técnicas corriente-voltaje	36
3.1.1 Determinación de la resistividad y conductividad	36
3.1.2 Determinación de la resistencia en serie y paralelo	38
3.1.3 Determinación de la corriente de saturación inversa I_0 y el factor de idealidad	39
3.1.4 Determinación de la altura de la barrera ϕ_0	40
3.1.5 Determinación de la dependencia con la iluminación de la corriente y voltaje en un fotodiodo	41
3.1.6 Comportamiento de la emisión de luz en un LED con el voltaje y determinación del voltaje de máxima electroluminiscencia en los LED	42
3.2 Técnicas capacitanci-voltaje	44

3.2.1	Determinación de la densidad de impurezas del lado de menor concentración en una unión p-n	44
3.2.2	Determinación de la altura de la barrera para una unión p-n	45
3.2.3	Determinación del perfil de las impurezas de menor concentración en una unión p-n	45
3.3	Técnicas combinadas	
3.3.1	Estimación de la movilidad	46

CAPITULO 4. ANALISIS DE RESULTADOS

4.1	Diodo comercial	47
4.1.1	Características I-V	47
4.1.2	Resistencia en serie y paralelo, R_s y R_p	47
4.1.3	Corriente de saturación inversa I_0	50
4.1.4	Factor de idealidad	52
4.1.5	Características I-V con la temperatura	52
4.1.6	Comportamiento de I_0 con la temperatura y medición de la altura de la barrera	53
4.1.7	Variación con la temperatura del factor de idealidad	56
4.2	LED rojo	56
4.2.1	Características I-V	56
4.2.2	Resistencia en serie y paralelo, R_s y R_p	59
4.2.3	Corriente inversa de saturación I_0	59
4.2.4	Factor de idealidad n	62
4.2.5	Comportamiento de la emisión de luz del LED rojo con el voltaje y determinación del voltaje de máxima electroluminiscencia	62

4.3 LED amarillo	64
4.3.1 Características I-V	64
4.3.2 Resistencia en serie y paralelo, R_s y R_p	64
4.3.3 Corriente de saturación inversa, I_0	64
4.3.4 Factor de idealidad n	67
4.3.5 Comportamiento de la emisión de luz del LED amarillo con el voltaje y determinación del voltaje de máxima electroluminiscencia	67
4.4 LED verde	67
4.4.1 Características I-V	67
4.4.2 Resistencia en serie y paralelo, R_s y R_p	69
4.4.3 Corriente inversa de saturación I_0	69
4.4.4 Factor de idealidad n	69
4.4.5 Comportamiento de la emisión de luz del LED verde con el voltaje y determinación del voltaje de máxima electroluminiscencia	69
4.5 Fotodiodo	72
4.5.1 Características I-V bajo condiciones de iluminación	72
4.5.2 Relación corriente-intensidad de luz	72
4.5.3 Relación voltaje-intensidad de luz	72
4.6 Diodo comercial	75
4.6.1 Características C-V	75
4.6.2 Altura de la barrera	75
4.6.3 Concentración de impurezas	75
4.7 LED rojo	79
4.7.1 Características C-V	79
4.7.2 Altura de la barrera	79
4.7.3 Concentración de impurezas	79
4.8 LED amarillo	83
4.8.1 Características C-V	83

4.8.2 Altura de la barrera	83
4.8.3 Concentración de impurezas	83
4.9 LED verde	87
4.9.1 Características C-V	87
4.9.2 Altura de la barrera	87
4.9.3 Concentración de impurezas	87
4.10 Degradación en los LED	91
4.11 Estimación de la movilidad y conductividad	91
CAPITULO 5. CONCLUSIONES	
5.1 Resumen de resultados y conclusiones	92
5.2 Sugerencias para trabajos a futuro	96
BIBLIOGRAFIA	97
APENDICE A	99
APENDICE B	100
APENDICE C	102

INTRODUCCION

La medición es el proceso de cuantificar nuestra experiencia del mundo exterior, es decir el conocimiento de los fenómenos naturales se deben en su mayoría a mediciones hechas en diversos experimentos que se han realizado en el transcurso de la historia de la ciencia, es debido a esto que el desarrollo de los equipos de medición en los laboratorios científicos ha sido enorme. Ahora bien, en un laboratorio de física de materiales es vital poseer un equipo de medición capaz de medir con la mayor precisión y rapidez posible, pues las mediciones obtenidas serán fundamentales para conocer las propiedades de los materiales, los cuales una vez conocidos es posible utilizarlos industrialmente (un ejemplo son los semiconductores), incrementando así el desarrollo tecnológico del mundo. Actualmente lo anterior se logra mediante la automatización de los equipos de medición utilizando la tecnología de computadoras, de tarjetas de adquisición de datos, etc.

Uno de los objetivos del presente trabajo es la automatización de una estación de medición I-V, C-V (corriente-Voltaje y capacitancia-voltaje) para lo cual se utilizó un electrometro Keithley 619, una fuente de voltaje Keithley 230, un medidor LCR HP4274a, los cuales se interconectaron mediante una interfaz IEEE-448, la cual es controlada mediante subrutinas realizadas en lenguaje BASIC. Para obtener mediciones precisas es necesario que los aparatos de medición sean síncronos durante cualquier experimento. Se construyó además un caja de mediciones, la cual fue diseñada para aislar lo mejor posible de ruido eléctrico externo a las mediciones que se realicen en su interior.

Un segundo objetivo del presente trabajo es la caracterización de dispositivos semiconductores cristalinos. La elección de caracterizar dispositivos cristalinos, se debe a que se tiene una teoría más estructurada y sólida en comparación con los materiales amorfos, policristalinos, etc., además las técnicas de medición de capacitancia-voltaje no han sido ampliamente desarrolladas en México aún en materiales cristalinos, por lo que los resultados

obtenidos mediante esta técnica pueden resultar más difíciles de interpretar en materiales no cristalinos o incluso en materiales cristalinos pero con configuración distinta a la p-n (por ejemplo las metal-semiconductor, uniones metal-aislante-semiconductor, p-i-n, etc.), es por eso que se optó por materiales cristalinos de silicio, arseniuro de Galio (AsGa) y de fosforo de Galio (PGa). Los dispositivos de unión p-n a caracterizar son: diodos comerciales de la serie 1N4001 de silicio (Motorola, 1987) diodos emisores de luz (LED) en color rojo serie 4650, verde serie 4950 y; amarillo serie 4550 (Solid state lamps, 1988) y por último un fotodiodo de configuración P-I-N.

Los parámetros a medir usando técnicas I-V para la caracterización de los dispositivos semiconductores se enmarcan dentro de la teoría de difusión, la cuál considera solo la incidencia de portadores de carga con cierta probabilidad de remontar una barrera de potencial. Debido a que los valores numéricos de las ecuaciones teóricas obtenidas usando la teoría de difusión no corresponden exactamente con los valores experimentales es necesario ampliar el modelo utilizando algunos parámetros empíricos tales como la resistencia en serie, la resistencia en paralelo y el factor de idealidad, utilizando este último modelo se midió la corriente de saturación inversa y los tres factores antes mencionados. Si se introduce a la temperatura como una nueva variable, es factible conocer también la altura de la barrera a cero volts en la unión. Es posible conocer también el voltaje de máxima electroluminiscencia para los diodos emisores de luz, esto se logra censando la cantidad de radiación que emiten los LED al variar el voltaje. Se realizó además un estudio gráfico con un microscopio óptico Olympus modelo AHMT sobre la degradación de los LED. Por último si se agrega al modelo antes mencionado un fuente de generación de corriente, entonces se tiene un modelo aproximado de un fotodiodo y donde dicha fuente de corriente representa la corriente que se genera si se le hace incidir luz. Si el fotodiodo es expuesto a la luz, el comportamiento de la corriente que pasa a través del fotodiodo puede predecirse con el modelo propuesto, a su vez el comportamiento del voltaje en la unión con la luz también se puede predecir con el modelo ya citado.

Los parámetros a medir utilizando técnicas de C-V están enmarcados en el modelo de la unión p-n abrupta, en el cual existe una transición abrupta entre la zona de deserción y la región cuasi libre. Resolviendo la ecuación de Poisson y suponiendo que todo el voltaje que se aplica a al material cae dentro de la unión se obtienen ecuaciones similares que rigen a un capacitor de placas planas paralelas. Utilizando el modelo anterior es posible obtener el valor de la altura de la barrera a cero volts , además si se supone que a temperatura ambiente las concentraciones de impurezas en ambas regiones de la unión están totalmente ionizadas y además que alguna de las concentraciones de impurezas en la unión es mucho mayor que la otra, entonces el valor de la concentración de impurezas en la región menos impurificada puede ser conocido. Sin embargo si el material a caracterizar no tiene una concentración de impurezas constante dentro de la unión existe un método para conocer el perfil de impurezas dentro de la unión conocido como capacitancia diferencial. Una vez conocidos los valores de la concentración de impurezas de la región menos impurificada y de la altura de la barrera a cero volts, entonces es posible obtener la longitud de la zona de deserción en la unión. Es preciso mencionar que en las ecuaciones del modelo de la unión abrupta es necesario conocer el área de la unión, debido a esto se utilizó un microscópio óptico para la obtención de fotografías en las cuales pudo ser medida el área de la unión.

La tesis está dividida en cinco capítulos, el primero trata acerca de la teoría de los semiconductores cristalinos, sus propiedades (conductividad, movilidad, etc.), la unión P-N y sus características I-V y C-V. El segundo capítulo se enfoca hacia la parte del equipo de medición, su planeación por bloques, la automatización mediante un lenguaje de programación y su construcción. El tercer capítulo contiene las técnicas de medición llevadas a cabo y la manera en que éstas fueron realizadas para los tres dispositivos semiconductores. En el cuarto capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos mediante la estación automatizada de mediciones. Por último en el quinto capítulo se presentan las conclusiones encontradas para el equipo de medición y los dispositivos semiconductores; así como algunas sugerencias para posteriores trabajos.

CAPITULO 1

SEMICONDUCTORES

1.0 INTRODUCCION

El descubrimiento de las propiedades de los materiales semiconductores ha originado que se realicen enormes esfuerzos por tratar de establecer una teoría que explique el por qué de esas propiedades, además también se ha estudiado el comportamiento de diversas uniones de materiales semiconductoras tales como la unión P-N, metal-semiconductor, etc., actualmente existe una teoría más o menos sólida para algunos materiales semiconductores cristalinos (teoría del enlace fuerte), sin embargo los problemas que todavía queda por estudiar para materiales semiconductores cristalinos y no cristalinos es muy amplio, así como sus posibles aplicaciones prácticas. En este primer capítulo se presenta de una manera sencilla la parte de la teoría que describe a los semiconductores cristalinos y algunas de sus propiedades.

1.1 SEMICONDUCTORES

El semiconductor ideal cristalino es un sólido que tiene una estructura de bandas de energía en la que la banda de estados electrónicos, completamente llena a la temperatura cero, se separa de otra que está totalmente vacía a la misma temperatura, por medio de una región angosta de energías prohibidas. Esta estructura de bandas se ilustra en la figuras 1.1a, 1.1b

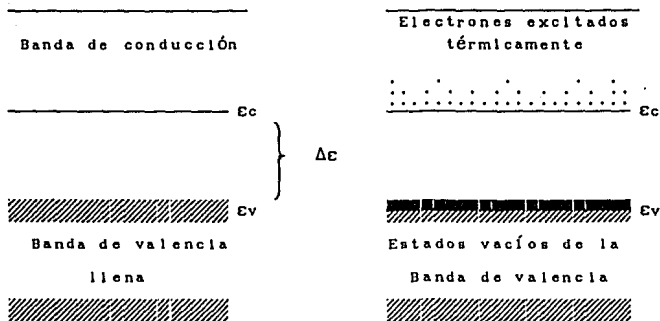


Figura 1.1 Bandas de conducción y valencia de un semiconductor (a) al cero absoluto, donde ΔE es la brecha de energía prohibida. (b) a la temperatura ambiente, mostrando electrones y huecos térmicamente excitados.

En el cero absoluto, el semiconductor es un aislador perfecto, debido a que no posee bandas parcialmente llenas, sin embargo si la temperatura aumenta, algunos electrones de la banda de valencia adquieren energía térmica para excitarse a través de la brecha de energía ΔE hasta llegar a la banda de conducción que hasta entonces estaba vacía. Los estados vacíos que quedan en la banda de valencia contribuyen también a la conductividad en forma de huecos cargados positivamente.

El germanio y el silicio son ejemplos de materiales semiconductores, en los cuales los electrones de la banda de valencia, son los que forman los enlaces covalentes de parejas de electrones tetraédricamente dispuestos entre los átomos. Al aumentar la temperatura ocurre que un electrón del enlace covalente se transporta a la banda de conducción, para convertirse en un electrón libre y queda disponible como portador de carga a fin de conducir una corriente a través del cristal. Al ser excitado, el

electrón deja un defecto en la estructura del enlace covalente del cristal. Este defecto es un hueco, el hueco puede desplazarse porque un electrón de un enlace covalente adyacente al hueco puede moverse con facilidad hacia el hueco, al completarse la pareja de enlace en el sitio original del hueco, se transfiere la ubicación del hueco al sitio de donde provino el electrón. Si colocamos un campo eléctrico (supongamos que va de derecha a izquierda), los electrones libres y los huecos producirán una corriente macroscópica que fluye por todo el cristal. En este caso, todos los electrones del cristal en ambas bandas están sometidos a la fuerza $-eE$ que actúa hacia la derecha. Los electrones libres se mueven hacia la derecha produciendo un flujo de corriente hacia la izquierda (debido a su carga negativa). Un electrón de algún enlace covalente adyacente a un hueco se puede desplazar hacia el hueco, y por tanto el hueco se desplazará a la izquierda al sitio de donde provino ese electrón, es decir el hueco se mueve a la izquierda como si fuera una partícula de carga positiva. De lo anterior se puede concluir que el flujo de corriente puede deberse tanto al movimiento de electrones libres como a la migración de electrones de valencia que se pueden considerar como migración de huecos positivos.

Un semiconductor en el que los pares electrón-hueco solamente se crean mediante excitación térmica mediante transiciones de electrones de la banda de valencia a la banda de conducción, se conoce como *semiconductor intrínseco*, por ende los electrones y huecos creados de esta manera se les conoce como *portadores intrínsecos de carga* y la conductividad como *conductividad intrínseca*. En un semiconductor de este tipo las concentraciones de electrones y huecos siempre deben ser las mismas, ya que por cada electrón excitado existe solo un hueco creado.

Los huecos y los electrones obedecen la estadística de Fermi-Dirac. El movimiento de los electrones y los huecos se puede aproximar al de una partícula libre (con los factores apropiados de la masa efectiva), esto es debido a que en el fondo de la banda de conducción y en el borde superior de la banda de valencia la relación entre ϵ y k es parabólica. Con la aproximación anterior se puede ahora escribir la función de densidad de estados (Mc-Kelvey, 1980) para ambas bandas como:

Para la banda de conducción será:

$$g_c(\epsilon)d\epsilon = \frac{8\pi(2)^{1/2} m_n^{*3/2} (\epsilon - \epsilon_c)^{1/2}}{h^3} d\epsilon, \quad (1.1)$$

y la densidad de estados de la banda de valencia como:

$$g_v(\epsilon)d\epsilon = \frac{8\pi(2)^{1/2} m_p^{*3/2} (\epsilon_v - \epsilon)^{1/2}}{h^3} d\epsilon, \quad (1.2)$$

en donde m_n^* es la masa efectiva de los electrones de la banda de conducción y m_p^* es la masa efectiva de los huecos de la banda de valencia.

La densidad de estados de la región prohibida $\epsilon_v < \epsilon < \epsilon_c$ es cero. Si m_p^* y m_n^* son iguales entonces el nivel de Fermi (en el nivel de Fermi se tiene que la probabilidad de ocupación de un estado cuántico es de 1/2) queda exactamente en la mitad de la región prohibida, si no son iguales entonces el nivel de Fermi se corre en forma ascendente o descendente, para igualar las integrales de población. Todo lo anterior se puede observar en las figuras 1.2a y 1.2b.

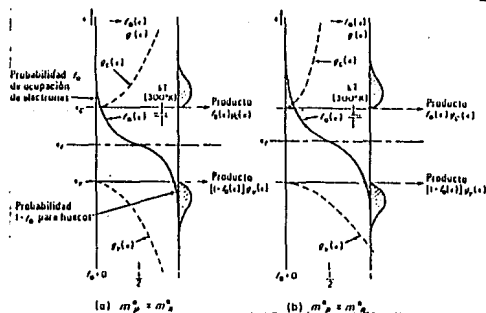


FIG. 1.2 Función de distribución, nivel de Fermi, densidad de estados y

población de electrones y huecos de un semiconductor intrínseco a) $m_p^* = m_n^*$
 b) $m_p^* > m_n^*$

Una manera adicional de producir portadores de carga en un semiconductor es la de introducir de manera sustitucional (siguiendo con el ejemplo del silicio o germanio) cantidades pequeñas de sustancias que tengan valencia cinco (tales como el arsénico, antimonio, etc.) en cristales de silicio o germanio. De los cinco electrones de valencia solo cuatro son compartidos con el cristal de silicio o germanio y el quinto se enlaza al átomo de impureza muy débilmente, y por medio de la agitación térmica de la red es factible arrancar dicho electrón desde muy bajas temperaturas, dando por resultado que a temperatura ambiente dicho átomo se encuentre ionizado. El átomo de impureza se convierte entonces en un ión positivo inmóvil (debido a los cuatro enlaces restantes). Estos cristales se conocen como semiconductores tipo n ya que la mayoría de portadores de carga son electrones. Los átomos del grupo V se les denomina como átomos donadores.

Si se utiliza ahora una sustancia que tenga valencia tres (Al, Ga, In, etc.) y la introducimos de manera sustitucional en el silicio o germanio entonces solo tres átomos estarán ligados, sobrando un enlace es decir se crea un hueco, el cuál puede emigrar si un electrón vecino ocupa esa posición (la probabilidad de que esto ocurra a temperatura ambiente es generalmente muy alta), entonces el ión formado tendrá carga negativa y permanecerá inmóvil. Los cristales que presentan el comportamiento anterior se les conoce como semiconductores tipo p. Los átomos del grupo III se les clasifica como átomos aceptores. Si en un material existieran impurezas de ambos tipos, la conductividad estará determinada por las impurezas que tengan una mayor concentración. Si el material es tipo n entonces el nivel de Fermi estará cerca de la banda de conducción, en cambio para uno tipo p lo estará cerca de la banda de valencia. En las figuras 1.3a y 1.3b se observan algunas propiedades de los semiconductores extrínsecos.

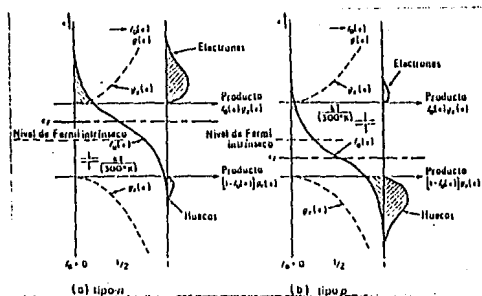


FIG. 1.3 Función de distribución, nivel de Fermi y poblaciones de electrones y huecos para a) un semiconductor con impurezas tipo n y b) un semiconductor con impurezas tipo p.

Para calcular las propiedades promedio de un conjunto de partículas necesitamos conocer la forma en que dichas partículas están distribuidas en promedio, en lo que respecta a la energía. Sea $f(E)$ la probabilidad de que un estado cuántico este ocupado, esta función es conocida como la *función de distribución* del sistema y depende de las probabilidades relacionadas con la distribución de las partículas del sistema entre los estados cuánticos disponibles. Sea $g(\epsilon)d\epsilon$ el número de estados cuánticos del sistema, cuya energía está dentro de un rango $d\epsilon$ alrededor de ϵ , entonces esta cantidad es conocida como la densidad de los estados (para un semiconductor en general vease las figuras 1.2a, 1.2b, 1.3a y 1.3b), la densidad de los de los estados depende solo de la forma en que los estados cuánticos mismos están situados en lo que respecta a la energía.

Ahondando un poco más acerca del concepto de la brecha de energía diremos que es la región comprendida (en un diagrama de bandas), entre la mínima energía para que se pueda crear un par electrón hueco, es decir entre $\epsilon_v < \epsilon < \epsilon_c$ (vease las figuras 1.1a,b).

1.2 DENSIDAD DE PORTADORES, MOVILIDAD y CONDUCTIVIDAD.

La densidad de portadores de carga en un semiconductor es igual a la cantidad de huecos o electrones por unidad de volumen que existen en cada una de las de las bandas de energía accesibles. En un semiconductor completamente puro y en equilibrio térmico, los huecos y los electrones pueden producirse mediante la excitación térmica. Por tanto la densidad de electrones libres en la banda de conducción en un semiconductor intrínseco (Mc-Kelvey, 1980) será:

$$n_0 = U_c \exp\left(-\frac{\epsilon_c - \epsilon_f}{kT}\right), \quad (1.3a)$$

donde ϵ_f es la energía de fermi y U_c tiene el valor:

$$U_c = \frac{2(2\pi m_n^* kT)^{3/2}}{h^3}, \quad (1.3b)$$

y para los huecos en la banda de valencia:

$$p_0 = U_v \exp\left(-\frac{\epsilon_f - \epsilon_v}{kT}\right), \quad (1.4a)$$

donde

$$U_v = \frac{2(2\pi m_p^* kT)^{3/2}}{h^3}. \quad (1.4b)$$

La movilidad se define como la velocidad de arrastre por unidad de campo eléctrico. La velocidad de arrastre es la velocidad promedio en dirección del campo eléctrico aplicado que poseen los portadores ya sean huecos o electrones.

La movilidad es un parámetro que depende fuertemente de las excitaciones de la red (fonones), y de los defectos de esta (impurezas, dislocaciones, etc.).

La movilidad está definida por:

$$\mu = \frac{v_{arr}}{E}, \quad (1.5)$$

donde v_{arr} es la velocidad de arrastre y E es el campo eléctrico.

La conductividad se define como el producto de la densidad de portadores por su carga y la movilidad. En un semiconductor intrínseco (si la movilidad permanece constante), la conductividad depende exponencialmente con la temperatura y con la brecha de energía, es decir para una brecha de energía dada si aumentamos la temperatura entonces la conductividad aumenta, a su vez al disminuir la temperatura la conductividad disminuye. Ahora bien, para distintos materiales con brechas de energía distintas pero a la misma temperatura, se tendrá que la conductividad disminuye conforme se aumenta el tamaño brecha, esto es lógico si pensamos en terminos de que se necesitara mayor energía térmica para tener conducción de electrones y huecos. Si el semiconductor es extrínseco entonces la conductividad a bajas temperaturas estará regida solamente por los átomos de impureza donadora o aceptora. Si se aumenta la temperatura de tal manera que los portadores formados debido a este incremento sobrepasan en número a los portadores generados por las impurezas, entonces la conductividad en esta región tendrá el mismo comportamiento como si el material fuera intrínseco.

La conductividad en un semiconductor se escribe (Sze, 1980) entonces como:

$$\sigma = e(\mu_n n + \mu_p p), \quad (1.6)$$

donde μ_n y n son la movilidad y la concentración respectivamente de los electrones y μ_p y p la movilidad y concentración de huecos.

1.3 TEORIA DE LA UNION P-N

La teoría cuántica y la mecánica estadística permite el desarrollo de una teoría para semiconductores extrínsecos, tipo n o tipo p, (los primeros con una concentración N_d de donadores de impurezas y los segundos con una concentración N_a de átomos receptoras), la cual trata de explicar sus propiedades físicas fundamentales y abrir el camino hacia sus aplicaciones. A continuación se describirá el comportamiento de muestras que contienen una región extrínseca tipo n y una región extrínseca tipo p separadas por una zona de transición relativamente angosta denominada unión p-n.

La transición entre las zonas tipo p y n puede ser abrupta, en cuyo caso se encuentra una región que tiene una concentración neta mas o menos constante de impurezas donadoras junto a otra que posee una concentración neta mas o menos constante de impurezas receptoras. Por otro lado, la unión puede ser graduada en cuyo caso N_d y N_a son funciones de la distancia a la unión en dirección de la normal, donde N_d decrece gradualmente empezando con un valor grande y N_a aumenta en la misma forma a partir de un valor pequeño, conforme se acerca la unión desde el lado tipo n; las dos cantidades se igualan en la unión y N_a sobrepasa a N_d en el extremo de la unión dentro de la región p. En el presente estudio el enfoque teórico se centra en el modelo de la unión abrupta.

Si se forma una unión abrupta p-n juntando una muestra uniforme tipo p con otra tipo n para formar un solo cristal, en el instante de formación existe una concentración uniforme n_{n0} de electrones libres móviles y p_{p0} de huecos libres móviles en el lado n, extendiéndose hasta la unión, y en el lado p, una concentración uniforme p_{p0} de huecos móviles y n_{p0} de electrones libres que se extiende también hasta la unión. en tanto que en ambos lados las densidades de electrones y huecos satisfacen la relación:

$$n_{n0} p_{n0} = p_{p0} n_{p0} = n_i^2. \quad (1.7)$$

Puesto que la concentración n_{n0} de electrones del lado n es mucho mayor que la concentración de electrones n_{p0} del lado p, en el instante de formación existe un gradiente enorme en la concentración de electrones en

la unión entre ambas regiones. La misma situación existe con respecto a la concentración de huecos en la misma unión. Los grandes gradientes iniciales establecen corrientes de difusión que hacen que los electrones de la región n y los huecos de la región p fluyan descendiendo por los gradientes de concentración respectivos hasta la región de conductividad de tipo opuesto y dejando a la región cercana a la unión, vacía de portadores mayoritarios. No obstante, este flujo de difusión inicial no puede continuar indefinidamente, debido a que en las regiones cercanas a la unión hay deficiencia de portadores mayoritarios, las cargas de los iones fijos donadores y receptores cercanos a la unión ya no están balanceadas por las cargas de los portadores libres móviles que estaban ahí inicialmente, de modo que se establece un campo eléctrico. La dirección de este campo eléctrico es tal que se opone al flujo de los electrones que salen de la región n y al flujo de los huecos que salen de la región p, y la magnitud del campo se desarrolla hasta el punto en que su efecto contrarresta exactamente la tendencia de los portadores mayoritarios a difundirse, descendiendo por la "pendiente" de concentración hacia la región de conductividad opuesta. Entonces se establece una condición de equilibrio dinámico en la que la región cercana a la unión queda vacía de portadores mayoritarios, además debido a que el material se encuentra en equilibrio térmico la energía de Fermi ϵ_f es la misma para todo el sistema lo que provoca que la diferencia de potenciales se manifieste como un "potencial de contacto interno" ϕ_0 el cual compensa a los gradientes de concentración de portadores en cada lado.

El valor del potencial de equilibrio se determina fácilmente a partir de las expresiones para la densidad de electrones y de huecos en equilibrio a ambos lados de la unión (Mc-Kelvey, 1980):

$$n_{n0} = U_c \exp\left(-\frac{\epsilon_{cn} - \epsilon_f}{k T}\right), \quad (1.8)$$

$$n_{p0} = U_c \exp\left(-\frac{\epsilon_{pn} - \epsilon_f}{k T}\right), \quad (1.9)$$

$$e\phi_0 = kT \ln \frac{n_{n0}}{n_{p0}}, \quad (1.10)$$

donde U_c es una constante dada en la ecuación 1.3b.

Si todos los donadores y receptores de las regiones n y p están ionizados, como lo estan, salvo que la temperatura sea muy baja, y si las dos regiones son fuertemente intrínsecas podemos decir que $n_{n0} \cong N_d$ y $p_{p0} \cong N_a$ por lo que usando 1.7 tenemos:

$$\phi_0 = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_d N_a}{n_i^2} \right). \quad (1.11)$$

La expresión anterior está evidentemente limitada a situaciones en que las estadísticas de Boltzmann se pueden utilizar para describir la distribución de equilibrio de los portadores.

Hasta aquí solamente se ha descrito cualitativamente y en forma simplificada las características de la unión en equilibrio, sin embargo las propiedades de mayor interés se presentan cuando la sometemos a un voltaje externo V variando las condiciones de equilibrio.

Para entender lo que sucede en el material es necesario reconocer que los efectos producidos por el voltaje externo deben de presentarse principalmente en la región de la unión, debido a la ausencia de portadores de carga hace que la resistividad aumente con respecto a la de las otras regiones. El único caso en el que lo anterior no se cumple es cuando se aplica un potencial en polarización directa (el positivo a la región p) muy grande con respecto a ϕ_0 . Por lo anterior se puede distinguir que el resultado a la aplicación del voltaje V es el ensanchamiento de la zona de deserción o la reducción de la altura de la barrera de potencial según se polarize inversa o directamente y si la caída de potencial en las regiones p y n fuera de la de la unión es despreciable podemos decir que la nueva barrera de potencial quedará dada por:

$$V' = (\phi_0 - V). \quad (1.12)$$

En el estado de equilibrio existe un cierto número de electrones en el lado n, que tienen suficiente energía para saltar la barrera de potencial hacia la región p, llamemos j_{nr} a dicho flujo de electrones. Sin embargo de acuerdo con el principio de balance detallado, en estado de equilibrio, cualquier proceso microscópico de transporte y su inversa deben proceder a la misma velocidad, esto implica que no debe existir un flujo neto de corriente. El inverso del flujo j_{nr} es la corriente provocada por la generación de pares electrón-hueco en la región p, a esta corriente de electrones que se difunde hacia la región n la llamaremos j_{ng} . En estado de equilibrio, la suma de los flujos j_{nr} y j_{ng} debe ser cero. Para los huecos ocurre algo similar, es decir existe un flujo j_{pr} de huecos de la región p a la región n y un flujo inverso j_{pg} que se forma debido a la generación de pares electrón-hueco en la región n y en el equilibrio la suma de ambos flujos debe ser igual a cero. Suponiendo que la estadística de Maxwell-Boltzmann es válida se pueden relacionar los flujos de huecos y electrones mediante (Mc-Kelvey,1980) como:

$$J_{pr} = J_{pg} \exp \left(\frac{e V'}{k T} \right), \quad (1.13)$$

$$J_{nr} = J_{ng} \exp \left(\frac{e V'}{k T} \right), \quad (1.14)$$

Utilizando el conjunto de ecuaciones 1.13 y 1.14 es posible calcular la densidad de corriente total dada por (Mc-Kelvey,1980):

$$I = e(j_p - j_n) = I_0 \left(\exp \left(\frac{e V}{k T} \right) - 1 \right), \quad (1.15)$$

donde j_p y j_n representan los flujos totales de huecos y electrones dentro de la unión.

I_0 se le conoce como corriente inversa de saturación y depende de parámetros del material así como de la temperatura. El valor que toma I_0 en esta teoría es:

$$I_0 = E \exp \left(\frac{-e \phi_0}{k T} \right), \quad (1.16)$$

donde E es un factor de proporcionalidad.

Una ilustración de los flujos de huecos y electrones, así como el comportamiento corriente-voltaje en una unión p-n, se puede observar en las figuras 1.4 y 1.5.

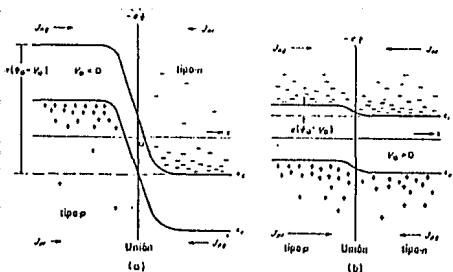


FIG. 1.4 Diagrama de potencial de una unión p-n a) con polarización inversa, b) con polarización directa.

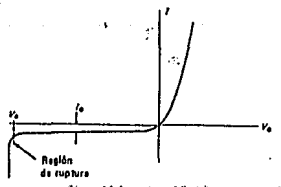


FIG. 1.5 Relación corriente-voltaje de una unión p-n

La teoría utilizada anteriormente para obtener el comportamiento corriente-voltaje en una unión p-n, se conoce como teoría de

difusión.

Continuando con éste análisis es posible encontrar las características C-V de la una unión p-n, para lo cuál observemos la figura 1.6.

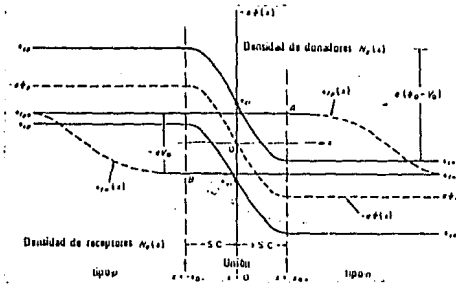


FIG. 1.6 Diagrama que ilustra los potenciales en las bandas de energía y los niveles casi-Fermi en presencia de un voltaje aplicado en una unión p-n

La situación representada es la de una unión con potencial interno ϕ_0 y potencial externo V negativo. En esta situación se tienen flujos de corrientes eléctricas lo que nos aleja del equilibrio térmico por lo que nos impide definir un único nivel de Fermi, sin embargo es posible afirmar que lejos de la unión las condiciones de equilibrio prevalecen y por tanto vale la distribución de Fermi para los electrones relacionandolos con los niveles de Fermi ϵ_{fn0} y ϵ_{fp0} los cuales deben diferir en eV . Cerca de la unión el problema se complica pues las dos distribuciones distintas para electrones y para huecos provoca la existencia de dos niveles efectivos de Fermi uno para cada población en función de la distancia, ambas funciones deben tender a los valores de equilibrio antes citados al alejarse de la unión y para facilitar los calculos se supone que lo hacen para una distancia despreciable con respecto a la dimensión de la barrera por lo que podemos considerar a las funciones como escalon.

Para resolver el problema analíticamente necesitamos hallar la forma del potencial $V(x)$ y los valores de la frontera de la zona libre de portadores x_{0+} y x_{0-} . Como la unión forma una capa dipolar eléctrica podemos utilizar las ecuaciones del electromagnetismo y en particular la que necesitamos es la ecuación de Poisson:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = - \frac{\rho(x)}{\epsilon_s}, \quad (1.17)$$

donde ϵ_s es la constante dieléctrica del semiconductor.

La ecuación diferencial a resolver será entonces :

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = - \frac{e}{\epsilon_s} \left(p(x) - n(x) + N_d(x) - N_a(x) \right), \quad (1.18)$$

donde $N_d(x)$ y $N_a(x)$ son las concentraciones de impurezas donadoras yceptoras a la distancia x , $p(x)$ y $n(x)$ son las concentraciones intrínsecas de huecos y electrones a la distancia x y su valor esta dado en la aproximación de Maxwell-Boltzmann por:

$$n(x) = U_c \exp \left(- \frac{\epsilon_c(x) - \epsilon_{fn}}{k T} \right), \quad (1.19)$$

$$p(x) = U_c \exp \left(- \frac{\epsilon_{fp} - \epsilon_v(x)}{k T} \right). \quad (1.20)$$

De igual forma podemos relacionar ϵ_c y ϵ_v con $V(x)$ por medio de:

$$\epsilon_c(x) = -eV(x) + \epsilon_{c1}, \quad (1.21a)$$

$$\epsilon_v(x) = -eV(x) + \epsilon_{v1}, \quad (1.21b)$$

y sustituyendo en la ecuación 1.18, el conjunto de ecuaciones anterior, se obtiene una ecuación diferencial para la unión. La solución a esta ecuación no es simple y solo en algunos casos particulares es analítica, por lo que su solución requiere de más aproximaciones para el modelo.

La aproximación hecha en el modelo de unión abrupta (Sze,1980), consiste en suponer que la densidad de carga en la zona libre de portadores es prácticamente debida solo a la concentración de impurezas donadoras o receptoras, según el lado de la unión, y fuera de ésta la carga es neutra, de tal manera que $\rho(x)$ se puede describir por:

$$\rho(x) = \begin{cases} e N_d & -x_{0-} < x < 0 \\ -e N_a & x_{0+} > x > 0 \end{cases} ,$$

donde N_d y N_a son las concentraciones constantes de átomos donadores y aceptores.

La validez de la situación propuesta estriba en el hecho de que en la mayoría de las uniones abruptas p-n que tienen interés práctico se satisface la condición $e(\phi_0 - V) \gg kT$ lo que garantiza que la densidad de carga llegue rápidamente a un valor constante $-eN_a$ conforme se penetra a la región de carga espacial desde la región p y un valor constante eN_d conforme se penetra a la región de carga espacial desde el lado n.

Separando las tres regiones distintas del potencial podemos plantear la ecuación diferencial de la siguiente forma:

$$\frac{d^2V(x)_+}{dx^2} = -\frac{eN_d}{\epsilon_s} , \quad 0 < x < x_{0+} \quad (1.23a)$$

$$\frac{d^2V(x)_-}{dx^2} = \frac{eN_a}{\epsilon_s} , \quad -x_{0-} < x < 0 \quad (1.23b)$$

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} \pm = 0 , \quad \text{fuera de la zona} \quad (1.23c)$$

donde x_{0+} y $-x_{0-}$ representa la anchura de la zona de deserción en la región n y en la región p respectivamente.

Las ecuaciones anteriores se pueden resolver de manera muy simple si se imponen las condiciones de frontera (Mc-kelvey, 1980) siguientes:

$$\begin{aligned} V_+(x) &= \text{const.} , \quad x > x_{0+} \\ V_-(x) &= \text{const.} , \quad x < -x_{0-} \\ E(0) &= E_0 = \text{const.} , \quad x = 0 \end{aligned} \quad (1.24)$$

y utilizando el hecho de que el potencial de contacto interno es:

$$V_+(x_{0+}) - V_-(-x_{0-}) = \phi_0 - V, \quad (1.25)$$

y entonces las anchuras de las regiones de carga espacial serán:

$$x_{0+} = \left(\frac{\epsilon_s (\phi_0 - V)}{e} \left[\frac{N_a}{N_d (N_d + N_a)} \right] \right)^{1/2}, \quad (1.26a)$$

$$x_{0-} = \left(\frac{\epsilon_s (\phi_0 - V)}{e} \left[\frac{N_d}{N_a (N_d + N_a)} \right] \right)^{1/2}. \quad (1.26b)$$

En la figura 1.7 se observan los gráficos de la densidad de carga, potencial eléctrico y el campo eléctrico para el modelo de una unión abrupta.

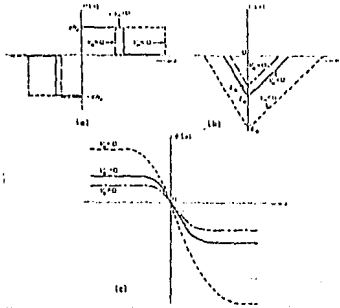


FIG. 1.7 Esquema de a) densidad de carga, b) el campo eléctrico y c) el potencial en las cercanías de una unión abrupta p-n en presencia de varios voltajes aplicados.

Utilizando ahora el principio de conservación de carga se debe cumplir que:

$$N_d x_{0+} = N_a x_{0-} \quad (1.27)$$

Utilizando la ecuación anterior, la carga por unidad de área será:

$$Q = e N_d x_{0+} \quad (1.28)$$

y de aquí se puede calcular la capacidad por unidad de área, la cual tiene un valor (Mc-kelvey, 1980) de:

$$C = \left| \frac{\partial Q}{\partial(\phi_0 - V)} \right| = \left(\frac{\epsilon_s e}{(\phi_0 - V)} \frac{N_d N_a}{N_a + N_d} \right)^{1/2} \quad (1.29)$$

Si la ecuación 1.29 se deriva C^{-2} con respecto al voltaje de polarización entonces se obtiene la capacidad diferencial para una unión p-n, con la cual se puede obtener el perfil de la densidad de portadores a la longitud de la zona de deserción, si es que la diferencia de impurificación es grande (Sze, 1980), es decir:

$$-\frac{d(C^{-2})}{dV} = \frac{2}{e \epsilon_0} \left(\frac{N_d + N_a}{N_d N_a} \right) \quad (1.30a)$$

$$N_j = -\frac{2}{e \epsilon_0 d(C^{-2})/dV} \quad (1.30b)$$

1.4 DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES

a) Diodo rectificador

Una de las más simples aplicaciones de las uniones p-n es la fabricación de dispositivos capaces de proveer corriente directa si se les aplica una fuente de voltaje alterna, estos dispositivos se conocen como diodos rectificadores. Las propiedades de transporte en los diodos son en esencia las mismas que se describieron para las uniones p-n es decir debido a que la corriente de saturación inversa es muy pequeña comparada con la corriente que fluye cuando se aplica un voltaje de polarización directo.

Debido a que en la práctica un diodo no satisface la ecuación (1.15) (Sah C.T., 1957) se deben considerar tres parámetros importantes, el factor de idealidad n del diodo, la resistencia en serie R_s y la resistencia en paralelo R_p . El factor de idealidad es un parámetro que indica que tan ideal puede considerarse un diodo y que da una idea del mecanismo de transporte de carga dominante en la unión, por lo general n es un número mayor a la unidad (teóricamente oscila entre uno y dos) (Grove A.S., 1967). La resistencia en serie (Sanchez, 1979) se debe a la resistencia que presentan los contactos que se colocan en el diodo, los alambres en el diodo, así también la resistencia intrínseca del semiconductor contribuye con la R_s . La resistencia en paralelo (Sanchez, 1979) tiene su origen debido a las pérdidas superficiales a lo largo de los bordes del diodo y a los defectos del material. Debido a lo anterior las propiedades rectificadoras de un diodo son mejores si el valor de R_s tiende a cero y el valor de R_p tiende a infinito.

Un circuito eléctrico equivalente de un diodo no ideal, así como su solución se presenta en el apéndice B, por lo tanto el comportamiento I-V de un diodo no ideal será:

$$I = \frac{I_0 \left(\exp \left(\frac{e (V - I R_s)}{n k T} \right) - 1 \right) + \frac{V}{R_p}}{1 + \frac{R_s}{R_p}}, \quad (1.31)$$

b) Fotodiodos

Dado que un fotodiodo funciona debido al efecto fotovoltaico, se describirá cualitativamente dicho fenómeno.

El efecto fotovoltaico se presenta al iluminar una unión p-n debido a la interacción de los fotones con los electrones en el cristal y consiste en la aparición de un voltaje que puede ser medido directamente.

Si la energía del foton incidente es suficiente para que al ser absorbido, exista la formación de pares electrón-hueco; estos pares se manifiestan de manera distinta en la región p y en la n, pues en la primera aparece un exceso de electrones, que son portadores minoritarios y para los que la barrera es una ayuda para pasar del otro lado de la unión, lo mismo sucede en el lado n pero con los portadores positivos en exceso; lo anterior se manifiesta como una corriente neta dentro del semiconductor, si el circuito está abierto existe una diferencia de potencial que no se compensa en la unión con los electrodos por lo que se puede medir, así mismo si el circuito se cierra habrá un paso de corriente que se mantendrá mientras la luz incida sobre la unión.

El fotodiodo además de presentar las propiedades de transporte eléctrico de un diodo, es capaz de producir una corriente eléctrica si se le ilumina. El fotodiodo tiene una zona de deserción con un campo eléctrico intenso, el cual sirve para separar los pares electrón-hueco (Sze, 1980). Estos dispositivos se caracterizan por tener una respuesta rápida si se les ilumina, para lograr esto la zona de deserción debe mantenerse lo más delgada posible. El fotodiodo puede operarse en modo fotovoltaico, es decir sin necesidad de aplicar ningún voltaje de polarización. Un fotodiodo solamente responde a un pequeño rango de longitudes de onda conocida como respuesta espectral. Un fotodiodo puede ser fabricado con uniones p-n,

metal-semiconductor, etc. Al igual que el diodo, el fotodiodo se puede representar en un circuito eléctrico si se coloca ahora una fuente de corriente (ver apéndice B), en este caso el comportamiento I-V de un fotodiodo será:

$$I = \frac{I_0 \left(\exp \left(\frac{e (V - I R_s)}{n k T} \right) - 1 \right) + \frac{V}{R_p}}{1 + \frac{R_s}{R_p}} - I_g, \quad (1.32)$$

donde I_g es la corriente producida debido a la iluminación del fotodiodo y es independiente del voltaje de polarización.

Sin embargo, debido a que un fotodiodo puede utilizarse como detector en mediciones de precisión es importante considerar la capacidad en la zona de deserción, esto se debe a que la respuesta en un condensador depende exponencialmente con el negativo del inverso de la capacidad (Resnick, 1980), es decir si la capacidad toma un valor pequeño (para una resistencia constante) entonces la respuesta del fotodiodo es muy rápida, de esta manera los fotodiodos se utilizan en un rango de voltajes inversos en donde la capacidad toma valores muy pequeños. En la mayoría de fotodiodos la relación entre el voltaje y la intensidad de luz incidente es logarítmica, sin embargo en la práctica cuando se utiliza un fotodiodo como detector en alguna medición es deseable que la relación entre el voltaje y la intensidad de luz sea lineal (ver figura (1.8)), con este propósito se agrega una resistencia de carga R_c en paralelo con el fotodiodo, donde el valor de esta resistencia está dado por la siguiente relación empírica

$$R_c = \frac{V_{ca}}{10 I_{cc}}, \quad (1.33)$$

donde V_{ca} es el voltaje en la curva I-V correspondiente a una corriente igual a cero (equivalente a tener el circuito abierto), e I_{cc} es la corriente correspondiente en la curva I-V a un voltaje cero (equivalente a tener un corto circuito).

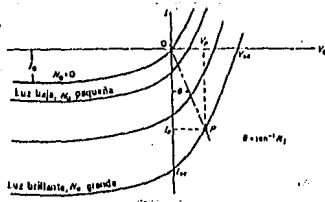


FIG. 1.8 Relación corriente-voltaje de un dispositivo fotovoltaico p-n en diferentes intensidades de iluminación, indicando también una línea de carga

c) Diodos emisores de luz (LED)

El LED (Sze,1980) es un dispositivo que convierte energía eléctrica en radiación electromagnética. El fenómeno asociado con este dispositivo es la electroluminiscencia y consiste en la generación de luz por una corriente eléctrica que pase a través del material debido a la aplicación de un campo eléctrico. La luz electroluminiscente difiere de la luz incandescente (radiación térmica), ya que la primera emite en un rango muy reducido de longitudes de onda en el espectro electromagnético. El efecto electroluminiscente es debido a cierto tipo de transiciones energéticas conocidas como radiativas (procesos en los cuales solo intervienen electrones y fotones). Las transiciones energéticas básicas que ocurren en un semiconductor se observan en la figura 1.9.

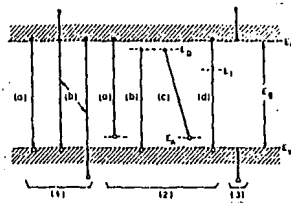


FIG. 1.9 Transiciones básicas que ocurren en un semiconductor

Estas transiciones pueden clasificarse como sigue. La primera clasificación son las transiciones dentro de la banda: a) es la emisión intrínseca, que corresponde a valores energéticos cercanos a los de la brecha de energía, es decir depende si la transición es directa o indirecta, b) emisión de electrones de alta energía. La segunda clasificación son las transiciones debidas a impurezas ; a) transición de la banda conducción a un nivel de impurezas aceptoras, b) De un nivel de impureza donadora a la banda de valencia, c) De un nivel de impureza donadora a un nivel de impureza aceptor, d) De un nivel de atrapamiento a la banda de valencia. La tercera clasificación se refiere a todas las transiciones que ocurren fuera de la brecha de energía.

No todas las transiciones pueden ocurrir en el mismo material bajo las mismas condiciones y además no todas las transiciones son radiativas. Es por eso que el material con el que está construido un LED es aquel en el cuál las transiciones radiativas predominan sobre las transiciones no radiativas.

El fenómeno de la electroluminiscencia puede obtenerse por varias vías, tales como la excitación intrínseca, la excitación por avalancha en una unión p-n o barrera metal-semiconductor, la excitación por tunelaje y la excitación debida a la inyección de portadores minoritarios a través de la unión.

La electroluminiscencia por inyección es el más importante método de excitación . Cuando un voltaje directo es aplicado a una unión p-n, la inyección de portadores minoritarios a través de la unión pueden alcanzar una eficiente recombinación radiativa, y entonces la energía eléctrica puede convertirse en energía luminosa.

Los diodos emisores de luz son uniones p-n de semiconductores que bajo condiciones adecuadas de voltaje directo pueden emitir radiación electromagnética en las regiones del ultravioleta, visible y en el infrarrojo. En la fabricación de los LED es muy importante considerar los materiales que presentan una brecha directa ya que en ellos la eficiencia cuántica (el número de fotones creados por cada par electrón-hueco que se recombinen), es mayor que un semiconductor de brecha indirecta. Generalmente , los LED (rojo) de brecha directa por lo general son fabricados de GaAsP sobre sustratos de GaAs, y los LED de brecha indirecta

(naranja, amarillo y verde), son fabricados de GaAsP sobre sustratos de GaP.

Al igual que un diodo comercial, el LED presenta propiedades I-V, C-V similares, es decir presentan también los parámetros n , R_n y R_p , ϕ_0 , además los LED presentan un voltaje de máxima eficiencia (el voltaje al cuál el LED emite la mayor cantidad de radiación), los valores de estos voltajes no se reportan en la literatura, sin embargo se encuentran reportados los valores de los voltajes óptimos de operación, los cuales deberán tener un valor cercano al valor de máxima electroluminiscencia, estos valores son (Solid state lamps, 1978) 2.2 volts para LED rojos y amarillos respectivamente y 2.4 volts para LED verdes.

CAPITULO 2

SISTEMA DE MEDICION

2.0 INTRODUCCION

Para obtener información acerca de las características de un material es necesario experimentar con él, es decir se tiene que perturbar al material de tal manera que el experimentador sea capaz de cuantificar su respuesta y entre más precisa sea la medición, la calidad de la información obtenida en el material será más confiable. En épocas pasadas las mediciones eran llevadas a cabo manualmente, lo que ocasionaba un aumento en el error de medición, así como también una tardanza mayor en la duración de un experimento. Actualmente utilizando la tecnología de computadoras (en la cual los semiconductores juegan un papel muy importante), es posible disminuir el error de medición y el tiempo de duración de los experimentos, esto se ha logrado mediante la automatización de los equipos de medición en los laboratorios. En el presente capítulo se presentará una estación automática de mediciones corriente-voltaje y capacitancia-voltaje.

2.1 DESCRIPCION DEL SISTEMA

El sistema de medición está compuesto de los siguientes subsistemas, los cuales se enumeran a continuación:

- 1) Módulo I-V.
- 2) Módulo C-V.
- 3) Computadora.
- 4) Interfases IEEE-448.
- 5) Cámara de mediciones.

Ahora bien, si se desea un sistema automático de medición, tanto la computadora como los dispositivos de medición (electrómetros, fuentes de voltaje, etc.) a utilizar en las mediciones, deben contener en su interior una interfase que gobierne un protocolo de comunicación entre ellos. La

interfaz usada en la configuración de este sistema, es la IEEE-448. Las interfases IEEE-448 del módulo I-V, del módulo C-V y de la computadora se conectan en paralelo formando un BUS de señales digitales (es decir la comunicación entre esos dispositivos es digital), a su vez el módulo C-V, el módulo I-V forman un BUS de señales analógicas (ver figura 2.1).

El módulo I-V se utiliza para realizar medidas de corriente v.s. voltaje y el módulo C-V realiza medidas de capacidad v.s voltaje. La interfase se usa para automatizar las mediciones, y esto se logra mediante el uso de subrutinas en lenguaje basic (ver apéndice A), las cuales sirven para la comunicación entre la computadora, el módulo I-V o el módulo C-V. Dentro de la cámara de medición se encuentra la parte donde se colocan las muestras de material, así como un par de electrodos..

Las conexiones entre los diversos subsistemas se realizan mediante el uso de cables coaxiales y triaxiales (Morrison, 1977), los cuales aíslan lo mejor posible del ruido eléctrico externo a cualquier señal que sea mandada por un circuito que contenga este tipo de cables (el aislamiento magnético es difícil de conseguir y en la práctica depende mucho del diseño del circuito eléctrico). A su vez la cámara de medición es de un material metálico, con el propósito de aislar a los electrodos del ruido eléctrico (cámara de Faraday).

El circuito general del sistema se muestra en la figura 2.1

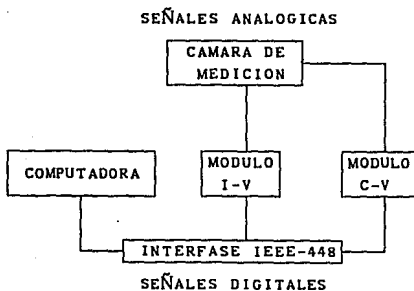


fig. 2.1 Circuito general del sistema.

2.2 CAMARA Y CIRCUITO DE MEDICION

La cámara de medición está compuesta, por una caja metálica, dentro de ella se localizan dos electrodos, y fuera de ella (en la coraza) se encuentra una serie de seis terminales de entrada/salida y un interruptor eléctrico. El material a caracterizar es colocado dentro de la cámara de medición y le son colocados dos electrodos, los cuales recogerán la respuesta del material (corriente o capacidad) para una cierta perturbación (voltaje). De las seis terminales que existen en la cámara, dos de ellas se conectan al módulo I-V y las cuatro restantes al módulo C-V. Mediante un interruptor eléctrico es factible ensamblar la cámara de medición con el módulo I-V o con el módulo C-V.

El circuito dentro de la caja de medición se representa en la figura 2.2 .

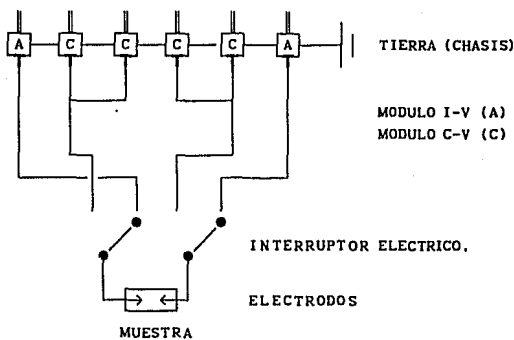


fig. 2.2 Circuito eléctrico de la cámara de medición.

2.3 MODULO I-V

El módulo I-V consta de un electrómetro Keithley 619 y una fuente de voltaje cd Keithley 230, ambos contienen a la interfase IEEE-448.

El electrómetro tiene las siguientes especificaciones (Keithley 619, 1983) :

Rango de voltaje mínimo: $200\text{mV} \pm (0.01\% + 25 \text{ cuentas})$

Rango de voltaje máximo: $200 \text{ V} \pm (0.02\% + 10 \text{ cuentas})$

Voltaje de entrada: menos de 1mV

Resistencia de entrada : mayor o igual a $20 \text{ T}\Omega$

Rango de corriente mínima: $2\text{nA} \pm (0.35\% + 65)$

Rango de corriente máxima: $2 \text{ A} \pm (0.15\% + 25)$

Despligue de cinco dígitos y medio

La fuente de poder Keithley 230 tiene las siguientes especificaciones (Keithley 220-230, 1982):

Rango de voltaje mínimo: $\pm 100\text{mV} \pm (0.075\% + 300\mu\text{V})$

Rango de voltaje máximo: $\pm 101 \text{ V} \pm (0.05\% + 50 \text{ mV})$

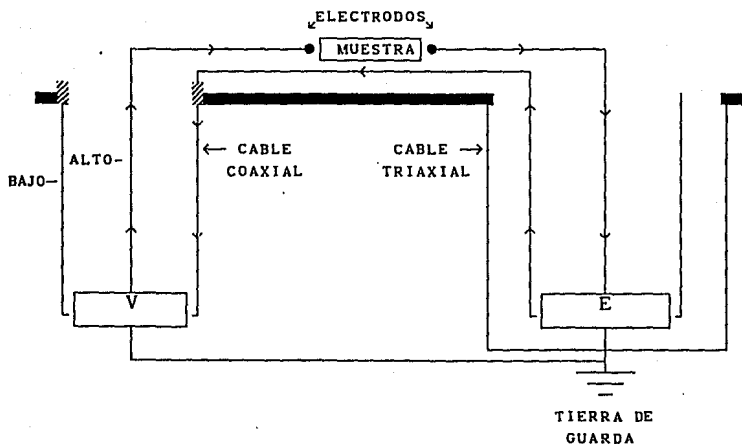
Ruido: 5mV p-p , 0.1 Hz a 300kHz

Mediante una serie de subrutinas en lenguaje basic, la microcomputadora es programada, estas subrutinas se encargan de la comunicación entre la microcomputadora y cualquier otro dispositivo (máximo 15 dispositivos) que este conectado a la interfase (electrómetro y la fuente de poder). Las subrutinas piden al usuario el rango de voltajes a los cuales se va llevar a cabo la medición y el tiempo de aplicación del voltaje entre cada medición como respuesta el usuario obtiene el despliegue de sus mediciones en la pantalla (voltaje aplicado y el valor correspondiente de la corriente medida), así como los gráficos de $I \text{ v.s } V$ y además la opción de poder guardar todos los datos obtenidos en un archivo para su posterior procesamiento.

Una vez colocada la muestra en la cámara de medición, se le aplica todo el rango de valores de voltaje previamente escogido (en forma de escalera ascendente). La caída de potencial que ocurre en la muestra provoca una corriente, la cual se transporta por el cable "alto" hasta llegar al electrómetro en donde se regresa por el cable "bajo", el

eléctmetro mediante el uso del cable triaxial se encuentra protegido de cualquier señal eléctrica externa, es decir corrientes parásitas inducidas en la coraza de la cámara de medición son transportadas a través del conductor mas externo del cable triaxial hasta la tierra de guarda. Una vez obtenido el valor de la corriente medida, se efectua una conversión Analógica-Digital dentro del instrumento y la interfase se encarga de mandar la información hacia la computadora.

El circuito eléctrico del módulo I-V se observa en la figura 2.3 mostrada a continuación.



- V FUENTE DE VOLTAJE C.D. KEITHLEY 230.
- E ELECTROMETRO KEITHLEY 619.
- CORAZA METALICA.
- ▨ AISLANTE DEL CABLE ALTO EN LA FUENTE DE VOLTAJE C.D. DE LA CORAZA METALICA.
- ↑ CAMINO SEGUIDO POR LA CORRIENTE.

fig. 2.3 Circuito eléctrico del módulo I-V

2.4 MODULO C-V

El módulo C-V consta de un medidor LCR hp4274A, una fuente de voltaje cd y además utiliza una fuente de voltaje alterno (ambas fuentes están incluidas en el medidor LCR), el medidor LCR contiene una interfase IEEE-448.

El medidor LCR HP4274A tiene las siguientes especificaciones (HP 4274A, 1982):

parámetros de medición: C, L, R, |Z|.

frecuencias de medición: 100Hz, 120Hz, 200Hz, 400Hz, 1kHz, 2kHz, 4kHz, 10kHz, 20kHz, 40kHz, 40kHz y 100kHz \pm 0.01%.

Voltaje de polarización externo: dos voltajes de polarización inversa, \pm 35 V y \pm 200V d. c. con una incertidumbre del 5%.

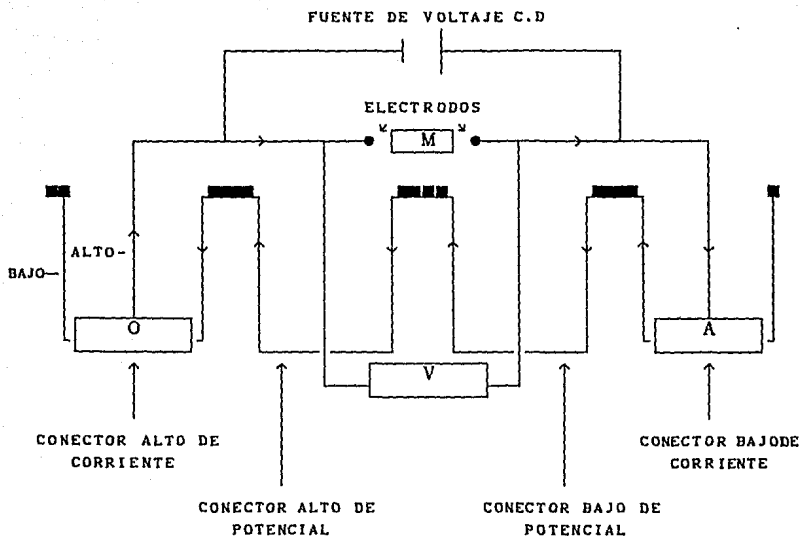
Voltaje alterno que va desde 0.001 V a 5 V.

El medidor LCR es automatizado mediante la interfase y esta es controlada por la microcomputadora utilizando subrutinas en lenguaje BASIC. Un programa hecho en BASIC pide al usuario el rango de voltajes que desea utilizar para la medición, el paso entre cada medición a realizar, el multiplicador de la amplitud de la señal alterna (la amplitud es la única variable que no se puede controlar desde la microcomputadora) y la frecuencia de la señal alterna. Con estos datos el usuario obtiene desplegados en la pantalla una serie de mediciones de capacidad con su correspondiente valor de voltaje inverso, posteriormente se obtienen los gráficos de C v.s V y de C^{-2} v.s V, además se tiene la opción de poder archivar los datos generados en la medición, para su posterior procesamiento.

Una vez colocada la muestra en la cámara de medición, se le aplica un voltaje alterno mediante un oscilador, los cambios del voltaje con el tiempo producen un transporte de carga. Los cambios del voltaje son medidos internamente por el medidor LCR mediante un voltmetro, el cual se encuentra colocado en paralelo con la muestra. La corriente es medida internamente mediante un amperímetro entonces el medidor LCR realiza división de ambas mediciones y despliega el valor de la capacidad. A su vez

el medidor LCR envía un voltaje de polarización a la muestra, mediante una fuente de voltaje cd que se encuentra en paralelo con la muestra.

Ahora bién el circuito de medición para C-V presenta cuatro terminales coaxiales, dos de ellas se conocen como alto y bajo de corriente y las dos restantes como alto y bajo de potencial. La idea de usar este tipo de arreglo junto con los cables coaxiales, se debe al hecho de tratar de blindar lo mejor posible las señales de medición de ruido eléctrico externo. En las terminales de corriente alta y baja están conectados el oscilador y el medidor de corriente, a su vez en las terminales de potencial alto y bajo se conectan el vóltmetro y la fuente de voltaje cd. En la figura 2.4 se muestra circuito C-V .



- O FUENTE DE VOLTAJE ALTERNO.
- V MEDIDOR DE VOLTAJE.
- A MEDIDOR DE CORRIENTE.
- CORAZA METALICA.
- ↑ CAMINO SEGUIDO POR LA CORRIENTE.
- M MUESTRA.

fig. 2.4 Circuito eléctrico del módulo C-V

CAPITULO 3

TECNICAS DE MEDICION

3.0 INTRODUCCION.

En todo trabajo científico es necesario tener cierta metodología, de tal manera que esta nos proporcione un seguimiento ordenado y sistemático de un cualquier fenómeno natural que se encuentre bajo estudio. Caso particular es el de tratar de caracterizar un material o un dispositivo semiconductor, ya que se logra tener una mejor información de estos si las técnicas de medición son sistemáticas. En el presente capítulo se muestran una serie de técnicas de medición para la caracterización eléctrica de dispositivos semiconductores de unión P-N, así como también el proceso experimental para la realización de cada una de estas técnicas.

3.1 TECNICAS CORRIENTE-VOLTAJE

3.1.1 Resistividad, conductividad.

Si se aplica una diferencia de potencial a dos materiales distintos, lo más probable es que la respuesta a la perturbación sea muy distinta para cada material. La característica del material responsable del efecto es la resistencia eléctrica, la cuál se define (Resnick, 1980) como:

$$R = \frac{V}{I}, \quad (3.1)$$

donde V es el voltaje aplicado e I es la corriente eléctrica.

La resistividad eléctrica ρ es una propiedad física asociada con la resistencia eléctrica, pero a diferencia de esta la resistividad es una propiedad inherente a cada material y se define para materiales isotrópicos (Reitz, 1983) como:

$$E = \rho(E) J, \quad (3.2)$$

donde E es el campo eléctrico y J es la densidad de corriente.

Si $\rho(E)$ es independiente de E se dice que el material es óhmico, es decir son materiales que obedecen la ley de ohm.

Existen varios métodos para medir la resistividad, sin embargo el más común es el de utilizar la configuración de dos placas planas paralelas (Harry, 1979) el cuál representa la técnica básica, la cual consiste en aplicar una diferencia de potencial entre dos contactos fijos (los cuales tienen una separación L entre ellos) y mediante un ampérmetro se mide el valor de la corriente que pasa a través de una muestra de material. Para una muestra uniforme y despreciando los efectos de punta, la resistividad está dada (Harry, 1979) por:

$$\rho(V) = \left(\frac{A}{l} \right) \left(\frac{V}{L} \right), \quad (3.3)$$

donde V es el voltaje aplicado e I es la corriente medida.

Una vez conocido el valor de la resistividad es factible obtener el valor de la conductividad por σ si se utiliza la relación (Reitz, 1983):

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (3.4)$$

Un parámetro importante en las mediciones I-V es la resistencia dinámica R_d y que se define (Sanchez, 1979) como:

$$R_d = \left| \frac{\partial V}{\partial I} \right|. \quad (3.5)$$

Mediante la medición de R_d es posible saber si un contacto es óhmico o rectificante, es decir si R_d es constante para toda diferencia de potencial que se aplique a la muestra entonces el contacto es óhmico, en cambio si R_d disminuye exponencialmente para un cierto rango de polarización directa (a temperatura constante) entonces el contacto sera rectificante.

3.1.2 Determinación de la resistencia en serie y paralelo

En la sección 1.4 se habló acerca de las propiedades de una unión p-n en ella se vió que la forma más general de visualizar en un circuito eléctrico dicha unión es colocar a un diodo junto con dos resistencias, una en serie y otra en paralelo. El circuito eléctrico se muestra en el apéndice B.

Si se resuelve el circuito eléctrico (apéndice B), se encuentra que la corriente que fluye a través de la unión p-n está dada por la ecuación 1.31.

Para casi cualquier diodo $R_p \gg R_s$ además si suponemos (Sanchez,1979) que $V - IR_s \gg nkT$ (de tal manera que la exponencial tome valores mucho mayores que la unidad) y si se aplica la función logaritmo a la ecuación resultante queda:

$$\ln I = \ln I_0 + \left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT} \right). \quad (3.6)$$

Si la ecuación 3.9 se resuelve para V y se obtiene la resistencia dinámica, resulta:

$$R_d = R_s + \left(\frac{nkT}{eI} \right). \quad (3.7)$$

Por tanto si se grafica R_d vs. I^{-1} (a una temperatura constante) se obtiene una línea recta, cuya ordenada al origen es la resistencia en serie.

Si se supone ahora que R_p es mucho mayor que R_s y que $V - IR_s \ll nkT$, para polarización inversa, entonces la ecuación 1.31 se transforma en:

$$I = I_0 + \left(\frac{V}{R_p} \right). \quad (3.8)$$

Si se grafica la ecuación 3.8 se tiene que el inverso de la pendiente representa la resistencia en paralelo.

El procedimiento para realizar la medición fue el siguiente: se colocó un dispositivo semiconductor dentro de la cámara de medición (diodo comercial o los LED), se realizaron cuatro corridas experimentales corriente-voltaje, cada corrida consta de 90 mediciones en un rango de -2 V a 0.7 V, en pasos de 3 centésimas de volt, para los diodos comerciales y de 80 mediciones en un rango de -2 V a 2 V, en pasos de 5 centésimas de volt, para los LED. A cada una de estas corridas experimentales se le aplicó la teoría antes mencionada para la obtención de R_s y R_p para después promediar y dar un valor promedio de ambos parámetros, el procesamiento de los datos se realizó en el paquete cuatro pro.

3.1.3) Medición de la corriente de saturación inversa I_0 y del factor de idealidad.

Si se supone que la unión p-n se comporta como un diodo, es decir su dinámica está determinada por las ecuaciones 1.31 y 1.16, entonces es posible medir la corriente inversa de saturación de la siguiente manera: de i) se sabe que por lo general el valor de R_s es muy pequeño (del orden de ohms) y además las corrientes que se generan en un diodo son del orden de miliamperes, por tanto el producto IR_s es del orden de milivolts y por ende se puede hacer la aproximación $V \gg IR_s$, ya que los voltajes de polarización son del orden de volts. Teniendo lo anterior en mente se puede utilizar la ecuación 3.6 y entonces se tiene que:

$$\ln I = \ln I_0 + \left(\frac{eV}{nkT} \right). \quad (3.9)$$

Y si se grafica $\ln I$ vs. V (a temperatura constante), se obtiene una línea recta de cuya pendiente se puede calcular n y si se extrapola hacia el eje $\ln I$, se obtiene el valor de la ordenada al origen y que corresponde a $\ln I_0$, de donde es factible obtener aproximadamente el valor de I_0 .

La ecuación 3.8 da entrada a otro método para medir I_0 para voltajes de polarización inversa, ya que si se grafica I vs. V , la ordenada al origen corresponde al valor de I_0 .

El procedimiento experimental a seguir fué el mismo que en el punto anterior, pero ahora aplicando a cada una de las corridas experimentales las ecuaciones 3.8 y 3.9.

3.1.4 Determinación de la altura de la barrera ϕ_0

Si en el procedimiento que se sigue en i) se puede variar la temperatura, entonces se tendrán un serie de valores de $\ln I_0$ para cada temperatura. Aplicando la función logaritmo a la ecuación 1.16 (Sanchez, 1979) se obtiene:

$$\ln I_0 = \ln E - \left(\frac{e\phi_0}{kT} \right). \quad (3.10)$$

Y si se grafica $\ln I_0$ v.s. T^{-1} , se obtiene una línea recta cuya pendiente multiplicada por k y dividida por e , debe dar el valor de la altura de la barrera ϕ_0 .

Para la obtención de la altura de la barrera ϕ_0 se obtuvo una serie de cuatro corridas experimentales para diez temperaturas diferentes, para cada temperatura se obtuvo un valor promedio de la corriente de saturación inversa, a los cuales se le aplicó la ecuación 3.10. Para aumentar la temperatura se utilizó una pistola de aire caliente, la cual se colocó a diferentes distancias de la cámara de medición (se tomó la precaución de concentrar lo mejor posible el chorro de aire caliente en la cámara mediante el uso de tubos cilíndricos), con la finalidad de obtener distintos valores de temperaturas. Para la medición de la temperatura se utilizó un termopar, el cual se conectó mediante una tarjeta de adquisición de datos a la computadora (se realizó un programa para la adquisición de datos de temperatura), en la cuál se despliega una gráfica con los valores tomados de temperatura conforme transcurre el tiempo, para poder realizar una corrida experimental I-V, se esperó hasta que la gráfica de la temperatura fuera constante en el tiempo.

3.1.5 Determinación de la dependencia con la iluminación de la corriente y el voltaje en un fotodiodo.

Si en la ecuación 1.32 se supone que $R_p \gg R_s$, además si se iguala el voltaje a cero (equivalente a tener cortocircuito) entonces la relación de la corriente con la luz será:

$$I = - I_g, \quad (3.11)$$

y dado que I_g depende solo de la intensidad de luz que incide sobre el fotodiodo, entonces de 3.11 se puede concluir que la corriente en el fotodiodo bajo las suposiciones hechas anteriormente, es directamente proporcional a la intensidad de luz. Y se grafica I vs. I_g se obtiene una recta cuya pendiente nos dará la constante de calibración del fotodiodo.

Si se supone que $R_p \gg R_s$, además si se iguala la corriente a cero (equivalente a tener el circuito abierto) y si se pide la restricción $eV \gg nkT$ (de esta manera se puede despreciar el término unidad), entonces la relación del voltaje con la luz será:

$$V = \frac{n k T}{e} \ln \left(\frac{I_g}{I_0} + 1 \right), \quad (3.12)$$

y dado que I_g depende solo de la luz incidente en el fotodiodo, entonces de 3.12 se puede concluir que la relación entre el voltaje en el fotodiodo (con las suposiciones hechas anteriormente) es logarítmica. Si se grafica V vs. $\ln (I_g + I_0)$, se obtiene una recta cuya pendiente sera la constante de calibración logarítmica del fotodiodo.

Para la realización del punto anterior fué necesario acondicionar la cámara de medición para que al fotodiodo le fuera posible recibir luz blanca, para esto a la cámara de medición se le realizó una abertura en su parte superior. Para variar la intensidad de radiación se utilizó un juego de diez filtros cuadrados oriel de densidad neutra en el visible de dos pulgadas de lado y de 1/16 a 1/8 de pulgada de anchos, estos filtros reducen la intensidad de luz visible en el rango porcentual de 79.5% a .01% de la radiación incidente. Se usó además un portafiltros móvil, con capacidad para cinco filtros, este portafiltros se colocó encima de la cámara de medición y mediante una lengüeta movable se seleccionó el filtro deseado para cada medición. Cada medición consta de 40 datos, en un intervalo que va desde -1 V a 1 V en pasos de 5 centésimas de volt.

Si se utiliza la relación empírica 1.33 es posible conocer la resistencia R_c necesaria para linealizar la relación entre el voltaje y la intensidad de luz, es decir si se toman curvas I-V de un fotodiodo a niveles distintos de iluminación se obtiene una familia de curvas tal como se muestra en la figura 1.10 entonces tomando la curva, a la cual se iluminó con una mayor intensidad de luz, se traza desde el origen de coordenadas una recta hasta la intersección con la curva I-V, entonces se toman los valores de corriente y voltaje interceptados que corresponden a los valores I_{cc} y V_{ac} y estos se sustituyen en la ecuación 1.33.

3.1.6 Comportamiento de la emisión de luz en un LED con el voltaje y determinación del voltaje de máxima electroluminiscencia en un LED.

Si se detectan los cambios de radiación provenientes de un LED debidos a que el voltaje de polarización esta cambiando, es posible entonces caracterizar el comportamiento de la emisión de luz de un LED en función del voltaje, esto se logra mediante el uso de un fotodiodo como detector, es decir el fotodiodo es capaz de captar la luz emitida por el LED,

entonces en el fotodiodo aparece una corriente que es proporcional a la intensidad de la luz captada, midiendo dicha corriente cada vez que cambie el voltaje se obtiene una serie de datos que al graficarlos deberán representar el comportamiento de la luz emitida por el LED en función del voltaje.

Una vez obtenidas dichas gráficas, es posible obtener el valor del voltaje al cuál la emisión de luz es máxima ya que solamente bastará con buscar en las gráficas los máximos de emisión de luz y ver a que valor de voltaje corresponden, el valor interceptado será el voltaje de máxima electroluminiscencia.

Para realizar las mediciones anteriores fué necesario, modificar el circuito eléctrico de la cámara de medición, de tal manera que el fotodiodo quedó conectado solo al electrómetro y el LED a la fuente de voltaje solamente, esta configuración se le conoce como de optoinsolador. Las corridas experimentales constan de 85 datos distribuidos en un intervalo que va de 0.8 V a 6 V con una separación de 8 centésimas de volt.

3.2 TECNICAS CAPACIDAD-VOLTAJE

3.2.1 Determinación de la densidad de impurezas del lado de menor concentración en una unión p-n.

En la sección 1.5 se obtuvo la expresión matemática para la capacidad por unidad de área para una unión p-n, dicha expresión presenta una singularidad cuando el voltaje aplicado es igual al potencial de contacto interno, es decir la capacitancia tiende a infinito, sin embargo experimentos y simulaciones por computadora (Van Den Biesen, 1985) muestran que en dicho valor existe un máximo, a pesar de lo anterior se puede seguir usando la teoría expuesta en 1.3 siempre y cuando el rango de voltajes no se aproxime al valor del potencial interno de contacto. Dicho lo anterior se tendrá que la ecuación 1.29 rige el caso más general, sin embargo en la mayoría de los casos alguna de las dos concentraciones de impurezas (donadoras o aceptoras), es mucho mayor que la otra, suponiendo lo anterior y resolviendo para el voltaje en la ecuación 1.29 se tiene:

$$V = \phi_0 - \left(\frac{\epsilon_0 e N_j}{2 C^2} \right), \quad (3.13)$$

donde el subíndice j se refiere a la densidad de impurezas del lado menos impurificado.

Si se grafica V u.s. C^{-2} , se obtiene una línea recta cuya pendiente es proporcional a N_j . Si se multiplica el valor de la pendiente por 2 y se divide entre ϵ_0 y e , entonces se obtiene el valor de N_j .

El procedimiento experimental es similar al caso I-V, es decir se colocó cada uno de los dispositivos semiconductores en la cámara de medición. Se realizaron dos corridas experimentales de 60 datos cada una, en un intervalo que va desde -4 V a 2 V en pasos de una décima de volt para los diodos comerciales y una corrida experimental de 50 datos, para un intervalo que va desde -2 V a 3 V en pasos de una décima de volt, en los

diodos emisores de luz. Los datos obtenidos se procesaron de acuerdo con 3.13 en el paquete quatro pro.

3.2.2 Determinación de la altura de la barrera para una unión p-n

Si se utiliza la ecuación 3.13 y se grafica V vs. C^{-2} , el valor de la ordenada al origen será el de la altura de la barrera en la unión.

En este punto se utilizan las mismas corridas experimentales anteriores para tratar de determinar la altura de la barrera.

3.2.3 Determinación del perfil de las impurezas de menor concentración en una unión p-n

Utilizando la ecuación 1.30 y suponiendo que alguna de las dos concentraciones de impurezas es mucho mayor que la otra, es posible obtener información acerca del perfil de impurezas de menor concentración es decir si se realiza un gráfico de las mediciones de $(\partial C^{-2}/\partial V)$ vs. V y se obtiene una línea recta constante entonces el perfil de impurezas de menor concentración corresponde al de una unión abrupta, donde el valor de la constante es proporcional al valor de la concentración de impurezas del lado menos impurificado. Si el gráfico no es una línea horizontal, nos representará directamente la distribución de impurezas para varios voltajes.

Para la realización de este punto se utilizó también el conjunto de corridas experimentales mencionadas en 3.2.1 y el proceso de los datos también se llevó a cabo en el paquete cuatro pro.

3.3 TECNICAS COMBINADAS

3.3.1 Estimación de la movilidad

Si en el semiconductor se tiene que una concentración de impurezas es mayor que otra, entonces la movilidad puede ser calculada mediante el uso de la ecuación 1.6, en la cual si se resuelve para la movilidad μ_j (donde el subíndice j se refiere al tipo de impureza de concentración mayor en material), es decir:

$$\mu_j = \frac{\sigma}{e N_j} , \quad (3.14)$$

donde N_j es la densidad de átomos donadores o aceptores.

Para la determinación de la movilidad mediante el uso de la ecuación 3.15, se supone que el material es altamente extrínseco (p ó n) y además que todos los átomos de impureza están totalmente ionizados. Por tanto si se determinan los parámetros de conductividad y concentración de portadores, entonces es factible conocer μ_j .

CAPITULO 4

INTERPRETACION DE RESULTADOS

4.1 Diodo comercial.

4.1.1 características I-V

En la figura 4.1 y 4.2 se puede observar el comportamiento I-V en un diodo comercial, en ella se grafican tres mediciones I-V y la ecuación teórica I-V de un diodo comercial. Las características I-V de las tres gráficas experimentales concuerdan muy bien con la gráfica de la ecuación teórica, es decir el diodo comercial presenta el comportamiento rectificante que predice la teoría de difusión ya que para voltajes mayores que cero la corriente que pasa a través del diodo se incrementa con el voltaje aplicado, esto se puede ver más claramente en la figura 4.2 donde se tiene que el orden de magnitud de la corriente es de 10^{-10} amperes para voltajes inversos y para voltajes directos la corriente se va incrementando desde 10^{-10} a 10^{-2} amperes. Debido a limitaciones en el medidor de corriente no fue posible llegar a la parte I-V lineal de la región directa ya que dicho medidor se saturaba para un voltaje de 0.7 volts aproximadamente.

Debido a que en las gráficas 4.1 y 4.2 los valores de las curvas experimentales I-V se aproximan entre sí muy bien, se puede decir entonces que las mediciones son reproducibles y por tanto el equipo de medición es confiable.

4.1.2 Resistencias en serie y paralelo, R_s y R_p .

Para encontrar R_s en el diodo comercial se utilizó la gráfica 4.3, donde se muestra la relación que existe entre la resistencia dinámica y el inverso de la corriente, el criterio que se tomó para el cálculo de la R_s fue el de escoger el rango en el cual el ajuste a una recta mediante mínimos cuadrados diera una ordenada al origen menor que el último valor de la resistencia dinámica que se tuviera, el criterio anterior surgió debido a que existe un limitador en el medidor de corriente (20 mA) y esto no permitió que en las mediciones se llegara a la región donde la R_d es

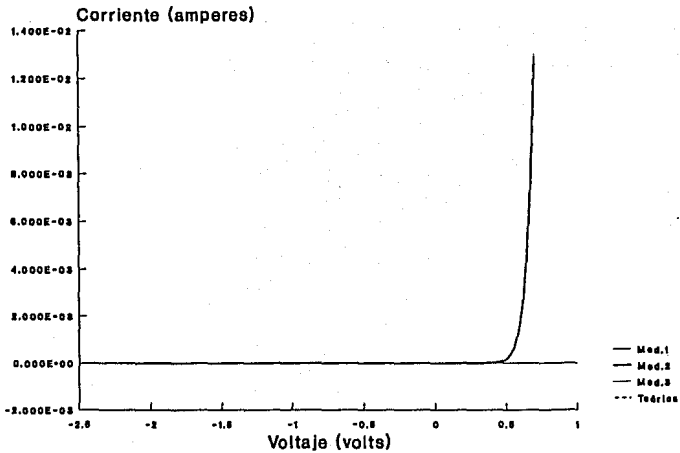


FIG. 4.1 Características I-V en un diodo comercial.

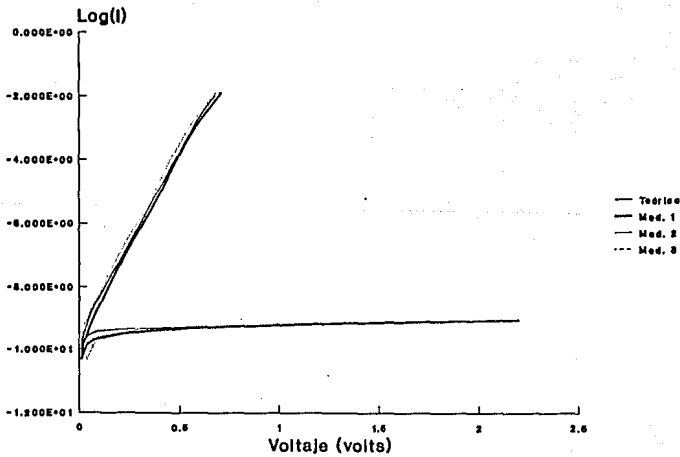


FIG. 4.2 Características I-V en un diodo comercial.

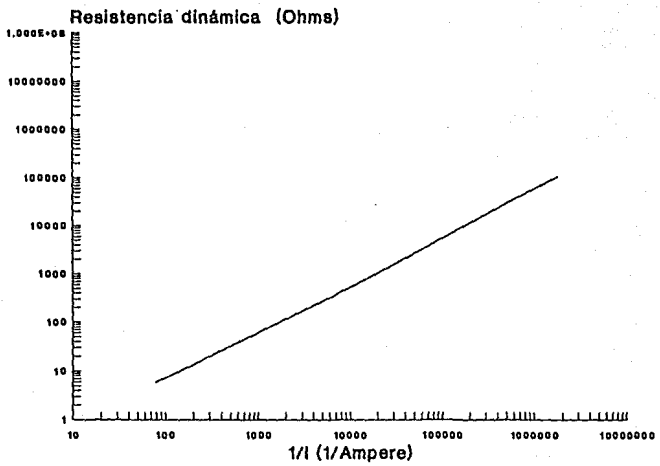


FIG. 4.3 Relacion entre Rd y el Inverso de la corriente en un diodo comercial.

una constante, es decir la región I-V lineal para un diodo comercial. El valor que se obtuvo para R_p fue de $3.84 \pm 0.23 \Omega$.

Para el cálculo de R_p se utilizó la gráfica 4.4, donde se muestra el comportamiento de la corriente en el diodo comercial para voltajes de polarización inversa, en esta gráfica se puede definir un rango lineal que va desde -2.2 V a -1 V aproximadamente, si se ajusta este rango a una línea recta se obtiene un valor para la R_p de $4.186 \times 10^9 \pm 1113 \Omega$.

En la gráfica 4.4 se observa una mayor dispersión de los valores experimentales que en las gráficas 4.1 y 4.2, esto se debe a que se tienen corrientes del orden de 10^{-10} amperes y el límite inferior para medir corriente en el electrómetro es del orden de 10^{-13} amperes, por lo que las mediciones se vuelven más imprecisas, sin embargo la dispersión entre los puntos no va más allá del 25 %.

4.1.3 Corriente de saturación inversa I_0 .

Utilizando el ajuste lineal que se realizó en la gráfica 4.4, la ordenada al origen debe corresponder al valor de la corriente de saturación inversa I_0 , para la cual se obtuvo un valor de $3.7 \times 10^{-10} \pm 1.68 \times 10^{-11}$ amperes.

La gráfica 4.5 muestra el comportamiento del logaritmo natural de la corriente con valores de voltaje de polarización directos, para esta gráfica se definió un intervalo de ajuste entre 0.2 V y 0.5 V , el criterio para escoger dicho intervalo se basó en el hecho de que en la gráfica 4.5 la curva $\ln(I)$ v.s V presenta dos regiones (Grove, 1967), la primera región que aproximadamente va de 0 V a 0.4 V en donde la corriente de difusión es la dominante y la segunda que va de 0.4 V a 0.7 V donde la corriente de generación es la dominante, debido a lo anterior se optó por tomar un intervalo en el cual estuvieran incluidas ambas regiones. Una vez realizado el ajuste en esa región, el valor de la ordenada al origen corresponde al valor del logaritmo de la corriente de saturación inversa, para el cual se obtuvo un valor de -21.97 ± 0.05 y de aquí se obtuvo un valor para I_0 de $2.86 \times 10^{10} \pm 1.40 \times 10^{11}$ amperes. Si se comparan ambos valores de I_0 se tiene un 23% de discrepancia en ambas medidas, esto se debió principalmente al rango escogido para realizar el ajuste en la parte directa ya que en la parte inversa el rango de ajuste fue definido con mayor facilidad.

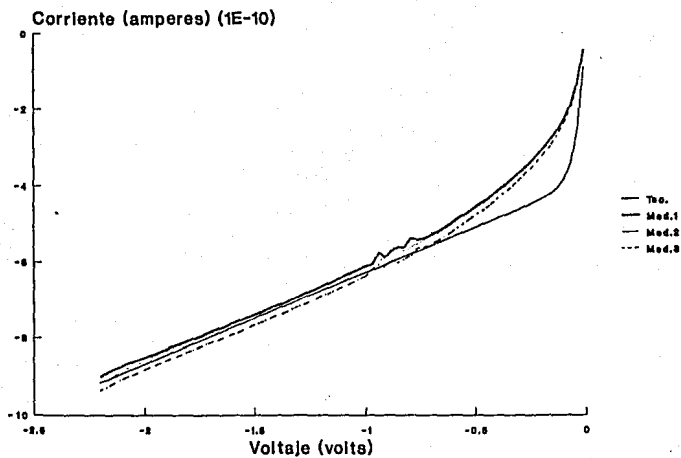


FIG. 4.4 Características I-V en la región inversa en un diodo comercial.

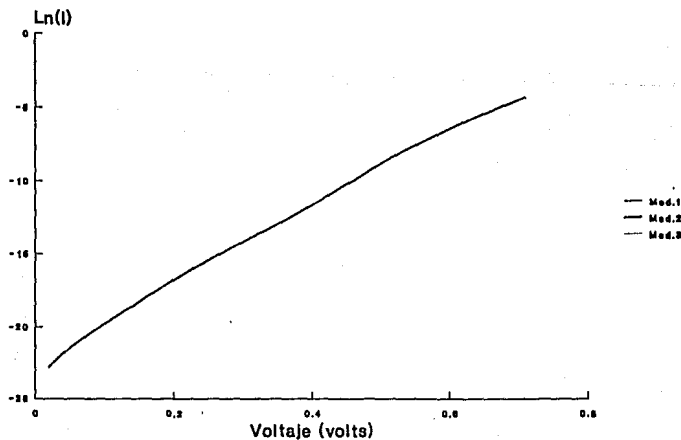


FIG. 4.5 Características I-V en la región directa de voltaje en un diodo comercial.

4.1.4 Factor de idealidad n

El factor de idealidad en el diodo comercial fue obtenido mediante la gráfica 4.5, donde la pendiente de la recta ajustada es proporcional al valor de n, el valor obtenido para este fue de 1.485 ± 0.003 , este valor se encuentra entre la unidad y el valor de dos, es decir este resultado no es más que el reflejo de que en el diodo existen varios mecanismos de corriente, es decir (Grove, 1967) si n tiene un valor de uno la corriente por difusión es la dominante, si embargo si n es igual a dos la corriente por generación es la dominante y si n oscila entre un número entre uno y dos ambos tipos de corriente son importantes.

4.1.5 Características I-V con la temperatura.

Las características I-V con la temperatura en un diodo comercial se muestran en la gráfica 4.6. En la gráfica 4.6 se muestra la variación de las curvas I-V con la temperatura para voltajes inversos y directos, este comportamiento se puede explicar en base a las propiedades de rectificación del diodo, es decir dado que I_0 depende exponencialmente con el inverso negativo de la temperatura y de algunos parámetros del material, si se aumenta la temperatura entonces I_0 deberá incrementarse en magnitud, que es precisamente lo que se observa en la figura 4.6 y 4.7 para un serie de cinco diferentes temperaturas. El orden de magnitud de los cambios en la corriente de saturación inversa debido a las variaciones de temperatura van desde $52 \times 10^{-8} \pm 1 \times 10^{-9}$ Ampere hasta el valor de $3.7 \times 10^{-10} \pm 1.7 \times 10^{-11}$ Ampere con un rango de temperatura que va desde 27°C hasta 114°C y las incertidumbres asociadas a la temperatura son de 1°C . En la gráfica 4.6 se observa que a medida que aumenta la temperatura se necesita menor voltaje para que la corriente comience a incrementarse, esto se debe a que al incremento de la temperatura los portadores de carga adquieren mayor energía y debido a esta energía extra los portadores de carga pueden remontar con mayor facilidad la altura de la barrera. En la gráfica 4.6 se muestran también los cambios de voltaje para los cuales la corriente comienza a incrementarse, este cambio va desde $0 \pm .05$ V hasta -0.27 ± 0.01 V a temperatura ambiente de $27^\circ \pm 1^\circ\text{C}$ hasta $114^\circ \pm 1^\circ\text{C}$, considerando que la temperatura del diodo es la misma que la del aire.

4.1.6 Comportamiento de I_0 con la temperatura y medición de la altura de la barrera.

El comportamiento de I_0 con la temperatura se muestra en la gráfica 4.7 y 4.8, donde se observa la variación del logaritmo natural de la corriente de saturación inversa con el inverso de la temperatura, la gráfica 4.7 corresponde a los valores de I_0 medidos para voltajes directos y la gráfica 4.8 corresponde a voltajes inversos. Tanto en la gráfica 4.7 como en la gráfica 4.8, los valores del logaritmo natural de I_0 presentan la misma variación con el inverso de la temperatura, esta variación es lineal y decreciente en ambos casos, es decir a medida que la temperatura disminuye el logaritmo natural de la corriente de saturación inversa disminuye, de lo anterior se puede concluir que la relación entre I_0 y el inverso negativo de la temperatura es exponencial.

En las gráficas 4.7 y 4.8 se realizó un ajuste para los diez puntos de temperatura ahí presentados, obteniéndose las siguientes relaciones:

$$\ln I_0 = \frac{(-8784.31 \pm 2.65)}{T} + (7.15 \pm 0.23)$$

para voltajes directos.

$$\ln I_0 = \frac{(-8500.00 \pm 4.41)}{T} - (6.33 \pm 0.37)$$

para voltajes inversos.

Para el cálculo de altura de la barrera se utilizó el modelo de la teoría de difusión (el cual fué explicado en el capítulo uno), es decir según este modelo la pendiente de las rectas anteriores deben ser proporcionales a la altura de la barrera de la unión. El valor que se obtuvo para la altura de la barrera fue de $0.758 \pm 2.28 \times 10^{-4}$ eV para voltajes directos y de $0.733 \pm 3.81 \times 10^{-4}$ eV para voltajes inversos. La variación de estos valores es solo del 3% , esta discrepancia se debe al criterio que se tomó para definir el rango lineal para la obtención de I_0 en la gráfica 4.5. A pesar de esta discrepancia ambos valores caen en el rango esperado ya que la altura de la barrera debe ser menor que el ancho de banda que en silicio tiene un valor de 1.1 eV.

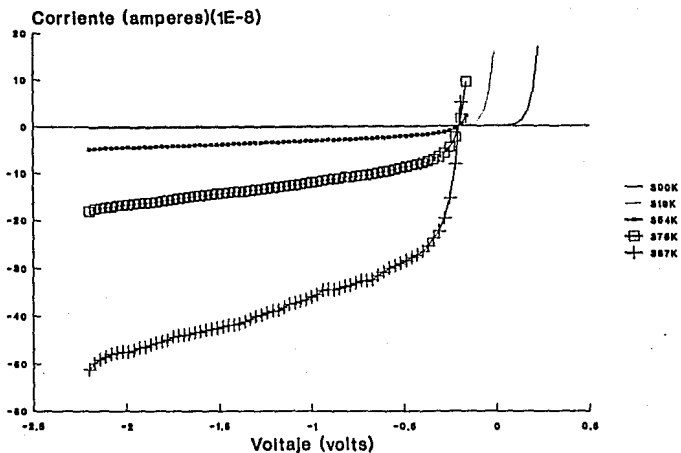


FIG. 4.6 Características I-V con la temperatura, en un diodo comercial.

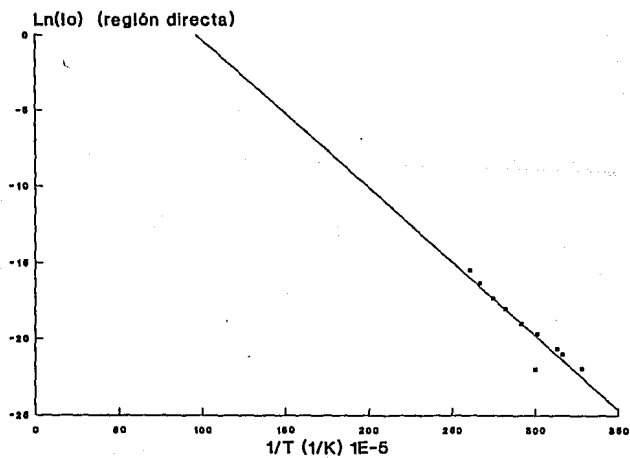


FIG. 4.7 Variación de Ln(I₀) v.s 1/T, en un diodo comercial.

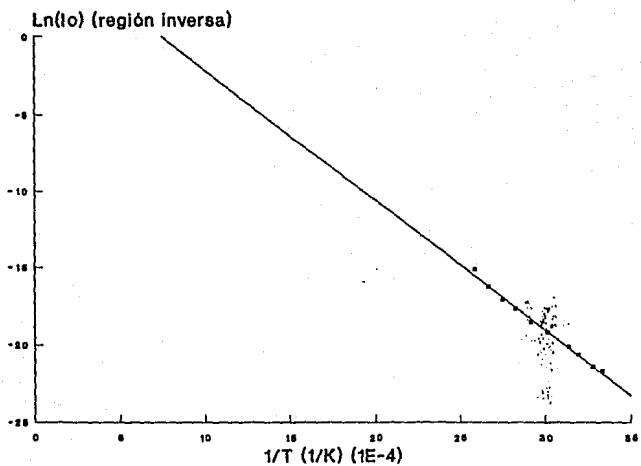


FIG. 4.8 Variación de $\ln(t_0)$ v.s $1/T$,
en un diodo comercial.

4.1.7 Variación con la temperatura del factor de idealidad.

En la figura 4.9 se muestra el comportamiento del factor de idealidad con la temperatura, dicho comportamiento muestra dos etapas, una en la que el valor de n disminuye conforme aumenta la temperatura y en la segunda n aumenta conforme aumenta la temperatura. Dado que el factor de idealidad es un factor de ajuste, su valor depende solo del intervalo en el cual se realice la regresión lineal y no de la temperatura. Probablemente la razón de que el comportamiento del factor de idealidad haya sido el mostrado en la figura 4.9 se debe principalmente a que a medida que se aumentó la temperatura fué cada vez más difícil definir los rangos de ajuste y además que el control de la temperatura no fué óptimo (usar una pistola de aire caliente como reservorio no es lo más adecuado para este experimento). A pesar de lo anterior las discrepancias en los valores de n no van más allá del 9 %.

4.2 LED ROJO

4.2.1 Características I-V

En la gráfica 4.10 se observan las características I-V para cuatro mediciones experimentales, el comportamiento que estas presentan es el esperado por la teoría, es decir existe una rectificación para voltajes directos, sin embargo la curva teórica que se presenta no se ajusta totalmente a los valores de las mediciones, esto probablemente se debe al intervalo de ajuste tomado para el cálculo de I_0 y n , ya que el valor de la corriente depende fuertemente del término exponencial, en donde aparece la n , si se observa ahora la gráfica 4.11 en donde se muestra la relación del logaritmo natural del valor absoluto de la corriente con el valor absoluto del voltaje para las cuatro mediciones y la curva teórica, y de ella se puede concluir que las mediciones son reproducibles, es de hacer notar que para el led el voltaje para el cuál la corriente comienza a incrementarse es aproximadamente a 0.90 ± 0.05 volts, esto se debe a que las corrientes que pasan en led son del mismo orden de magnitud que las corrientes que puede medir el electrómetro y por tanto este presenta problemas en la medición, debido a lo anterior tampoco fue posible

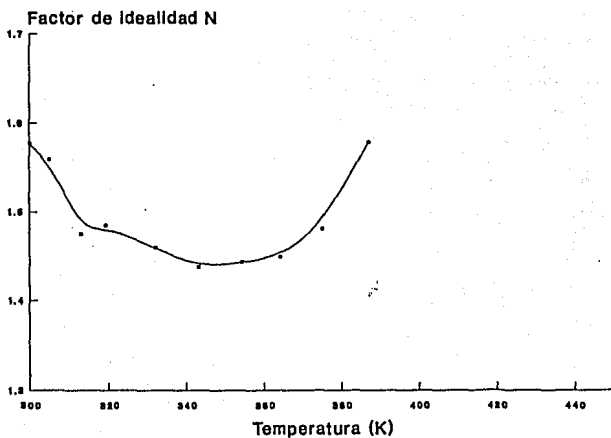


FIG. 4.9 Variación del factor de Idealidad n con la temperatura, en un diodo comercial.

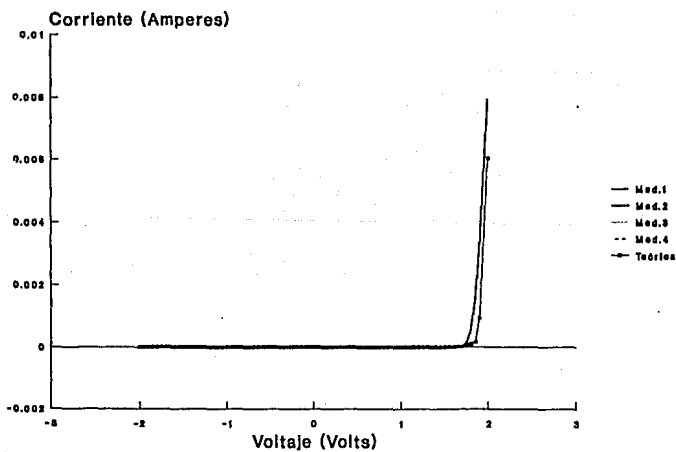


FIG. 4.10 Características I-V en un LED rojo.

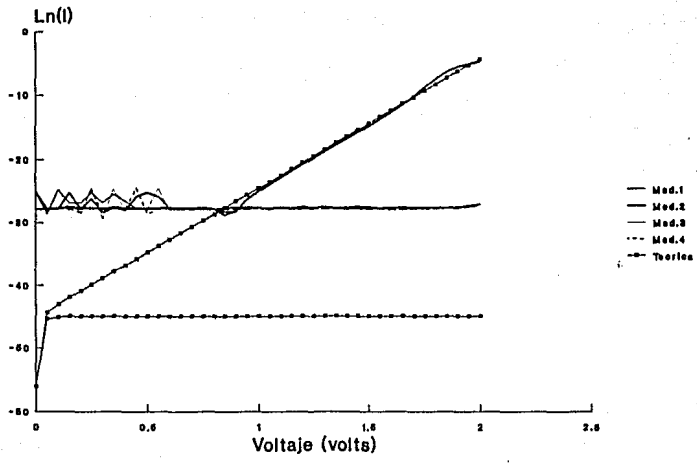


FIG. 4.11 Características I-V en un LED rojo.

obtener el valor de la corriente de saturación inversa utilizando voltajes inversos, así como también el valor de la resistencia en paralelo.

4.2.2 Resistencia en serie y paralelo, R_s y R_p .

Para la obtención de R_s se utilizó la gráfica 4.12, donde se observa la relación entre la resistencia dinámica y el inverso de la corriente, el criterio utilizado para encontrar R_s fue similar al dado para el diodo comercial, es decir se escogió un intervalo, el cual ajustado a una línea recta, la ordenada al origen (la cuál representa a R_s en la teoría) tuviese una magnitud menor al último valor de la resistencia dinámica, este criterio fue utilizado debido a que no fue factible llegar a la región donde R_s es una constante, y esto se debió a el limitador de corriente en el electrómetro. El valor encontrado para R_s utilizando el criterio antes mencionado fue de $17.41 \pm 0.63 \Omega$.

Debido a problemas de medición no fue posible obtener el valor de R_p , ya que las corrientes mínimas que puede medir son del orden de 10^{-13} Amperes y dado que en el led se utiliza como encapsulador de la unión un material muy resistivo y debido a esto las corrientes que pasan en el LED son mucho menores que 10^{-13} Amperes para un rango de voltajes que va desde la parte inversa hasta aproximadamente 0.9 ± 0.05 Volts en la parte derecha.

4.2.3 Corriente inversa de saturación I_0

La magnitud de la corriente de saturación inversa, fue obtenida indirectamente, utilizando la gráfica 14.13, donde se muestra la variación de el logaritmo del valor absoluto de la corriente con el valor absoluto del voltaje para la parte derecha. A diferencia del diodo comercial, el led presenta una región lineal más definida, es decir que probablemente la corriente de difusión domine sobre la corriente de generación o viceversa. Si se realiza un ajuste por mínimos cuadrados a la región lineal (de 0.95 ± 0.05 Volts a 1.65 ± 0.08 Volts aproximadamente), se obtiene un valor para la corriente de saturación inversa de $8.96 \times 10^{-21} \pm 2.3 \times 10^{-22}$.

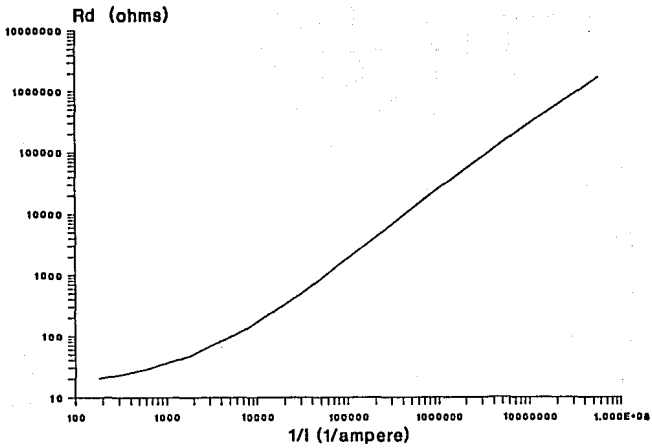


FIG. 14.12 Variación de R_d v.s $1/I$, en un LED rojo, para el cálculo de R_s .

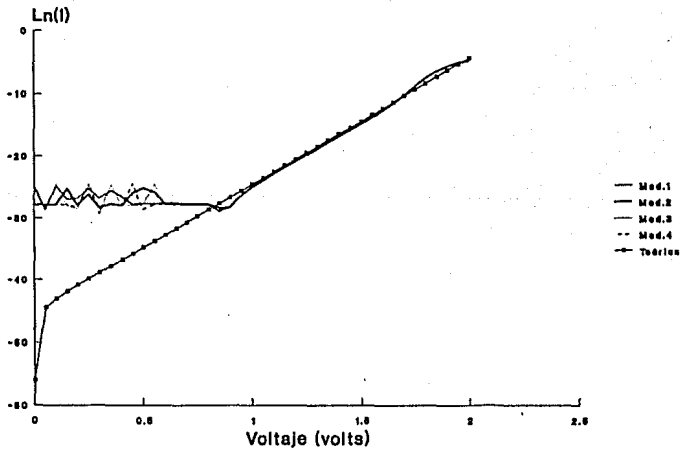


FIG. 4.13 Características I-V en un LED rojo, en la región directa.

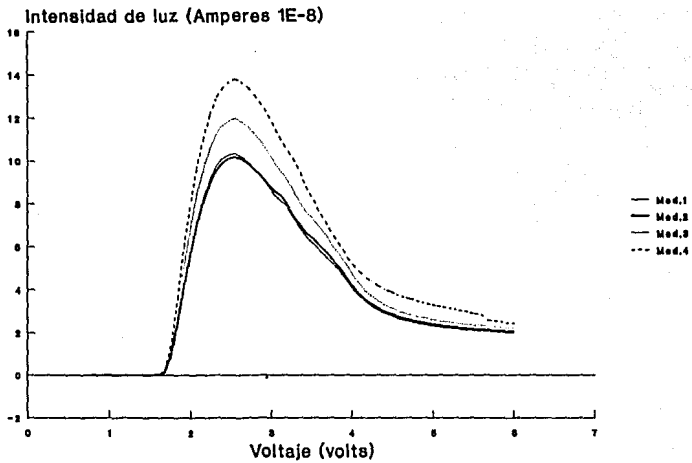


FIG. 4.14 Variación de la luz emitida por el LED rojo con el voltaje aplicado.

4.2.4 Factor de idealidad n

El factor de idealidad para el led rojo fue obtenido utilizando también la figura 4.13, pero en el ajuste de la región lineal se utiliza el valor de la pendiente encontrada, el valor del factor de idealidad será entonces 1.84 ± 0.057 . El valor anterior se aproxima más al valor numérico de dos y por tanto se puede concluir que probablemente la corriente de generación sea la dominante y por ende las propiedades de rectificación del LED no son buenas, debido a que comparado con el diodo comercial se necesita mayor energía en el LED para tener la misma densidad de corriente.

4.2.5 Comportamiento de la emisión de luz del LED rojo con el voltaje y determinación del Voltaje de máxima electroluminiscencia.

En la gráfica 4.14 se observan las características electroluminiscentes del LED rojo, en ella se puede ver que a medida que aumenta el voltaje, la emisión de luz también aumenta hasta un valor máximo, para después comenzar a disminuir, esta disminución probablemente se deba a que a partir del máximo, la probabilidad de captura de los portadores de carga por los centros de recombinación disminuye, esto es así debido a que la sección eficaz de dispersión varía inversamente con la energía de los portadores de carga que inciden sobre los centros de recombinación (Goldstein H.,1988). El valor del voltaje en el cual el LED rojo presenta la máxima electroluminiscencia, fue de 2.5 ± 0.125 volts, el cual es un valor confiable ya que el voltaje de operación es de 2.2 volts. El hecho de que las cuatro mediciones experimentales realizadas no se encuentren traslapadas se debió probablemente a que los LED poseen un voltaje de máxima operación de 3 volts (Solid state lamps, 1978) y si en una medición se rebasa este valor, lo más probable es que el LED rojo comience a degradarse. Como puede verse en la figura 4.14, este voltaje fue rebasado en la primera medición, lo que provocó un degradamiento del LED rojo, el cuál en la segunda medición tuvo una emisión de luz con menor intensidad con respecto a la primera medición, esto mismo pasó con las subsecuentes mediciones. Sin embargo la máxima intensidad de luz siempre se dió para el mismo valor de voltaje.

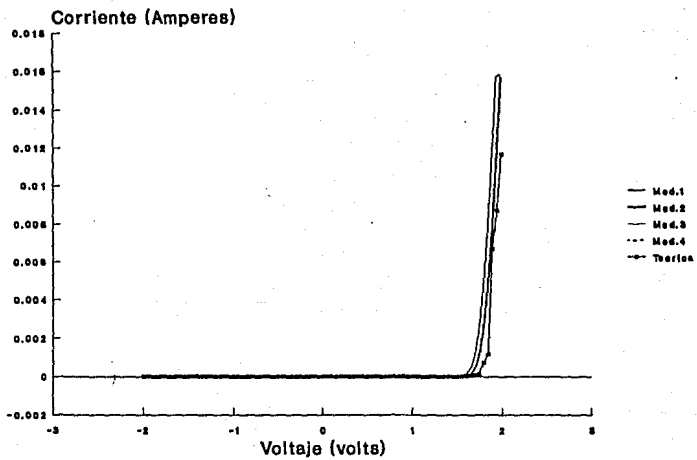


FIG. 4.15 Características I-V en un LED amarillo.

4.3 LED AMARILLO

4.3.1 Características I-V

Las características I-V para el Led amarillo se observan en las figuras 4.15 y 4.16, en donde se puede ver que el comportamiento de este dispositivo es el esperado por la teoría (rectificador), lo anterior se corrobora con la quinta curva en las figuras 4.15 y 4.16, la cual muestra los valores teóricos obtenidos de corriente para el mismo rango de voltajes. Sin embargo a pesar de tener el mismo comportamiento cualitativo, la curva teórica encontrada cuantitativamente no es la misma, esto se debe probablemente al rango de voltajes escogido para el cálculo de el factor de idealidad, de la corriente de saturación inversa y del cálculo de la resistencia en serie. En la figura 4.16 se puede observar el orden de magnitud de la corriente que pasa a través del LED, también es factible ver el voltaje para el cuál la corriente comienza a incrementarse de manera considerable y que corresponde a 0.8 ± 0.04 Volts, el hecho de que no se observe la rectificación para el rango de cero al valor dado anteriormente se debe al efecto de la resistencia en paralelo.

4.3.2 Resistencia en serie y paralelo, R_s y R_p .

Para el cálculo de la resistencia en serie se utilizó la figura 4.17, donde se muestra graficada la resistencia dinámica contra el inverso de la corriente, el criterio utilizado para la determinación de R_s fue el mismo que se empleó anteriormente con el led rojo, el valor encontrado de esta manera para la resistencia en serie fue de 10.02 ± 0.38 volts. Debido a que el electrómetro solo puede medir corrientes mayores o iguales a 10^{-13} Amperes, no fué posible obtener el valor de R_p , sin embargo esto sugiere que el valor de R_p debe ser grande.

4.3.3 Corriente de saturación inversa, I_0 .

Con al ayuda de la gráfica 4.18 fue posible obtener indirectamente el valor de la corriente de saturación inversa, el criterio utilizado fue el mismo que se empleó para el LED rojo, el valor obtenido así para I_0 fue de $7.01 \times 10^{-20} \pm 12 \times 10^{-21}$ Amperes.

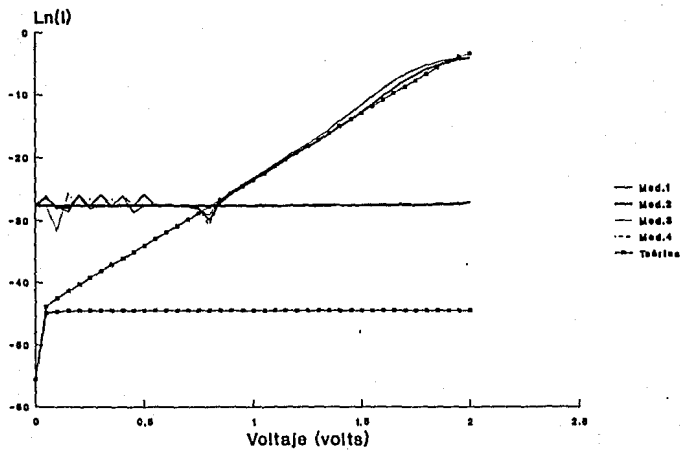


FIG. 4.16 Características I-V en un LED amarillo.

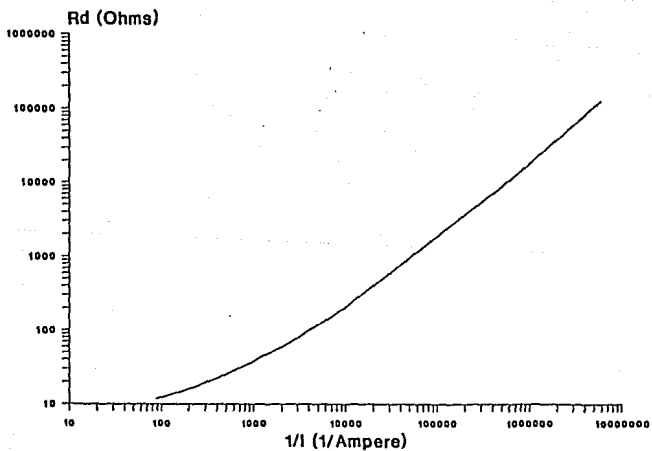


FIG. 4.17 Variación de R_d v.s $1/I$, en un LED amarillo.

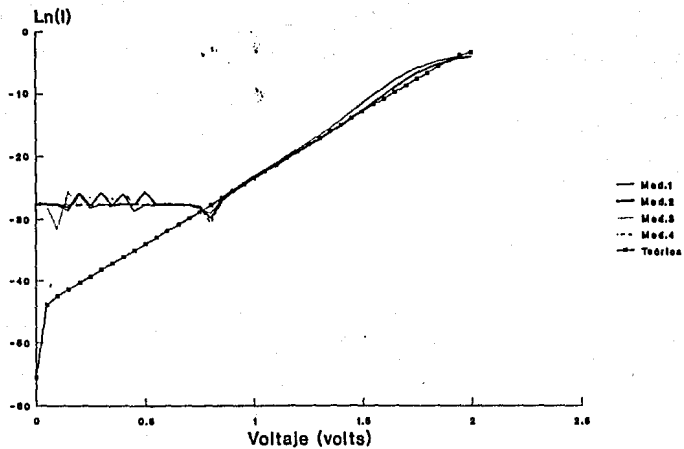


FIG. 4.18 Características I-V en la región directa en un LED amarillo.

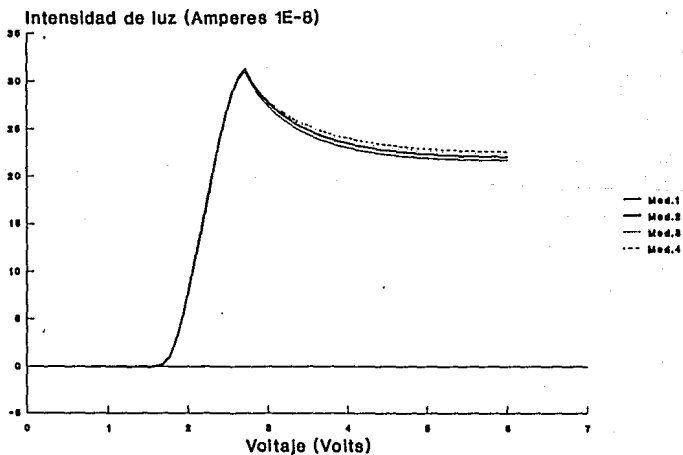


FIG. 4.19 Variación de la luz emitida en un LED amarillo con el voltaje aplicado.

4.3.4 Factor de idealidad n.

Utilizando la figura 4.18 y el mismo criterio para el LED rojo, se obtuvo el valor del factor de idealidad, el cual fue de 1.87 ± 0.047 . Esto refleja que los mecanismos de transporte de carga son debidos probablemente a las corrientes de difusión y de recombinación

4.3.5 Comportamiento de la emisión de luz del LED amarillo con el voltaje y determinación del voltaje de máxima electroluminiscencia.

En la figura 4.19 se observa el comportamiento de la luz emitida por el LED amarillo con el voltaje, dicho comportamiento es análogo al observado en el LED rojo. EL valor encontrado para el voltaje de máxima electroluminiscencia fue de 2.5 ± 0.125 volts. De esta gráfica se puede decir también que la degradación del material para el led amarillo fué menor que para el LED rojo, esto probablemente se debe a que el LED rojo posee un ancho de banda menor que el LED amarillo y esto implicará que para cierto valor de voltaje por el LED rojo pasará mayor corriente que en LED amarillo.

4.4 LED VERDE

4.4.1 Características I-V

Las características I-V para el Led verde se observan en las figuras 4.20 y 4.21, en donde se puede ver que el comportamiento de este dispositivo es rectificante, lo anterior se demuestra con la quinta curva en ambas figuras, la cual muestra los valores teóricos obtenidos de corriente para el mismo rango de voltajes. Sin embargo a pesar de tener el mismo comportamiento cualitativo, la curva teórica encontrada presenta el mismo problema que los LED amarillo y rojo, la razón de esto probablemente se debe también al rango de voltajes escogido para el cálculo de el factor de idealidad, de la corriente de saturación inversa y del cálculo de la resistencia en serie. En la figura 4.21 se puede observar el orden de magnitud de la corriente que pasa a través del LED, así también es factible conocer el voltaje para el cuál la corriente comienza a incrementarse y que corresponde a 0.8 ± 0.04 Volts, el hecho de que no se observe la

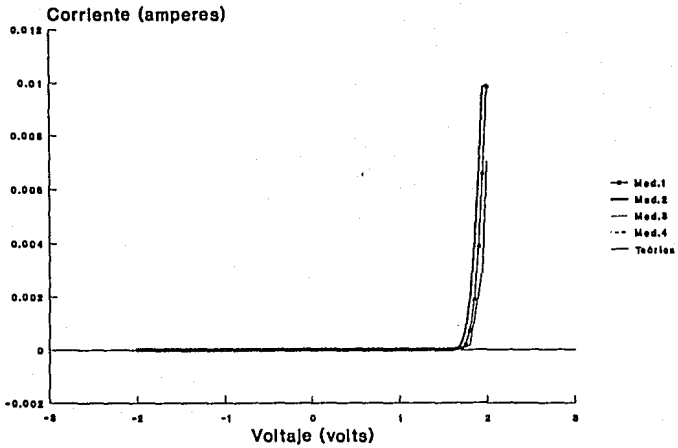


FIG. 4.20 Características I-V en un LED verde.

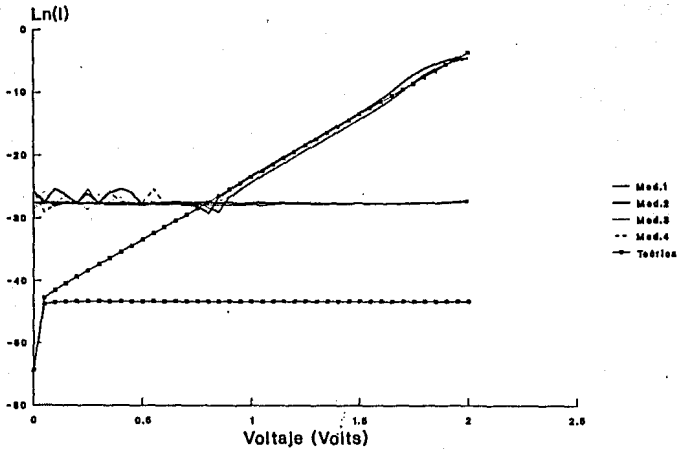


FIG. 4.21 Características I-V en un LED verde.

rectificación para el rango de cero al valor dado anteriormente se debe también al efecto de la resistencia en paralelo.

4.4.2 Resistencia en serie y paralelo, R_s y R_p .

Para el cálculo de la resistencia en serie se utilizó la figura 4.22, donde se muestra graficada la resistencia dinámica contra el inverso de la corriente, el criterio utilizado para la determinación de R_s fue el mismo que se empleó anteriormente para los LED amarillo y rojo, el valor encontrado de esta manera para la resistencia en serie fue de $9.63 \pm 0.28 \Omega$. El valor de la resistencia en paralelo R_p tampoco fue factible determinarlo debido a la limitante anteriormente mencionada.

4.4.3 Corriente de saturación inversa, I_0 .

Con al ayuda de la gráfica 4.23 fue posible obtener indirectamente el valor de la corriente de saturación inversa, el criterio utilizado fue el mismo que se empleó para los anteriores LED, el valor obtenido así para I_0 fue de $7.78 \times 10^{-20} \pm 1.32 \times 10^{-21}$ Amperes.

4.4.4 Factor de idealidad n.

Utilizando la figura 4.23 y el mismo criterio para los LED amarillo y rojo se obtuvo el valor del factor de idealidad, el cual fue de 1.96 ± 0.59 . Este valor refleja que los mecanismos de transporte de carga son debidos probablemente a las corrientes de difusión y de recombinación de igual forma que en los dos casos anteriores.

4.4.5 Comportamiento de la emisión de luz del LED verde con el voltaje y determinación del voltaje de máxima electroluminiscencia.

El comportamiento de la emisión de luz con el voltaje es semejante al observado en los LED rojo y amarillo, esto se puede ver en la figura 4.24. El valor obtenido para el voltaje de máxima electroluminiscencia, fue de 2.8 ± 0.14 volts, el cual es confiable ya que el voltaje de operación es de 2.4 volts. La degradación en el LED verde fue semejante a la mostrada por el LED amarillo.

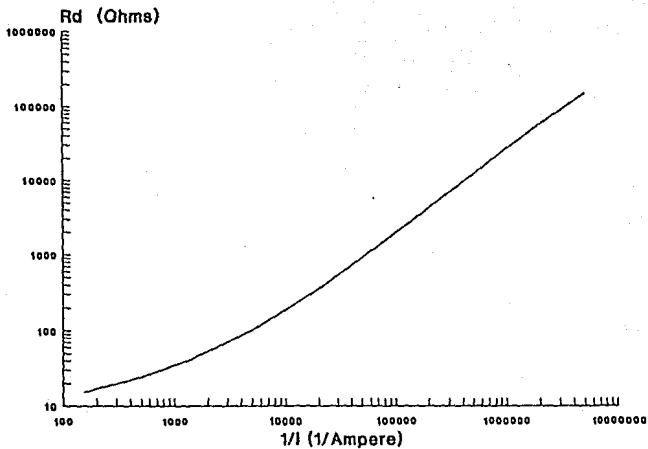


FIG 4.22 Variación de R_d v.s $1/I$, en un LED verde.

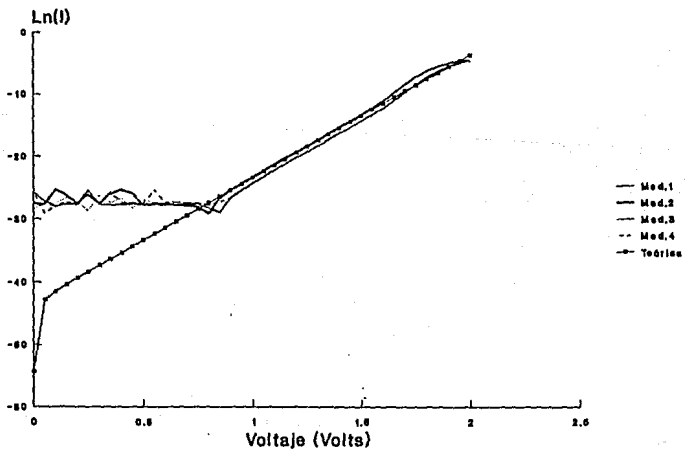


FIG. 4.23 Características I-V en la región directa, en un LED verde.

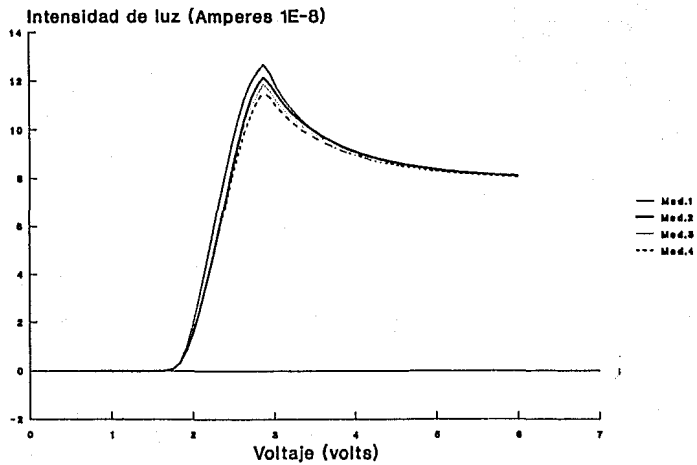


FIG. 4.24 Variación de la luz emitida por un LED verde con el voltaje aplicado

4.5 Fotodiodo

4.5.1 Características I-V bajo condiciones de iluminación.

La figura 4.25 muestra el comportamiento corriente-voltaje bajo condiciones de iluminación para un fotodiodo, en dicha figura se puede observar que ha medida que aumenta la iluminación la corriente de corto circuito aumenta, esto es debido al efecto fotovoltaico es decir debido a la incidencia de luz se producen más portadores de carga, los cuales macroscópicamente representan una corriente extra generada. Siguiendo con la figura 4.25, existe una caída de voltaje que se puede observar en la curva en la cual se iluminó al fotodiodo en un 100%, esta caída probablemente se deba al calentamiento que sufre el fotodiodo, es decir al incrementarse la temperatura, se incrementa el número de portadores de carga (y por tanto la corriente), necesitando por tanto de una energía menor para lograr dicho incremento. Las magnitudes de las corrientes de corto circuito van desde $1.68 \times 10^{-6} \pm 8.4 \times 10^{-7}$ Amperes hasta $4.54 \times 10^{-7} \pm 2.3 \times 10^{-8}$ Amperes. El valor de R_c encontrado fue de $1984 \pm 4 \times 10^{-6} \Omega$.

4.5.2 Relación corriente-intensidad de luz.

En la figura 4.26 se observa la gráfica del logaritmo de la corriente de corto circuito contra el logaritmo de la intensidad de luz incidente en el fotodiodo, la relación encontrada es lineal, lo cual concuerda con la teoría establecida en el capítulo tercero; la ecuación de la recta encontrada es:

$$I = (1.31 \pm 0.03) I_e^{(1.06 \pm 0.04)}$$

donde la constante de calibración tiene un valor de 1.31 ± 0.03

4.5.3 Relación voltaje-intensidad de luz.

En la figura 4.27 se observa la relación entre el voltaje de circuito abierto y la intensidad de luz, en ella se puede observar que la variación del voltaje de circuito abierto con la intensidad de luz es logarítmica en correspondencia con la teoría, sin embargo para la determinación de los voltajes de circuito abierto fue necesario interpolar entre dos valores de voltaje (en dicho intervalo se encontraba el valor de cero para la corriente), lo anterior tuvo que ser así debido a que en el experimento se controla el voltaje y se mide corriente y no a la inversa.

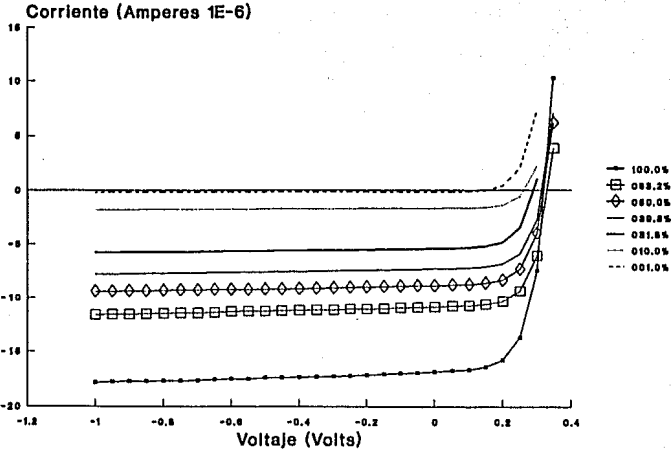


FIG. 4.25 Variación de las características I-V con la luz, en un fotodiodo.

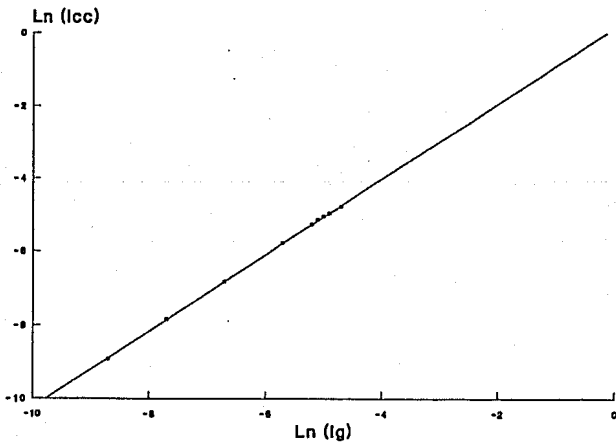


FIG. 4.26 Variación de la corriente de corto circuito con la luz incidente, en un fotodiodo.

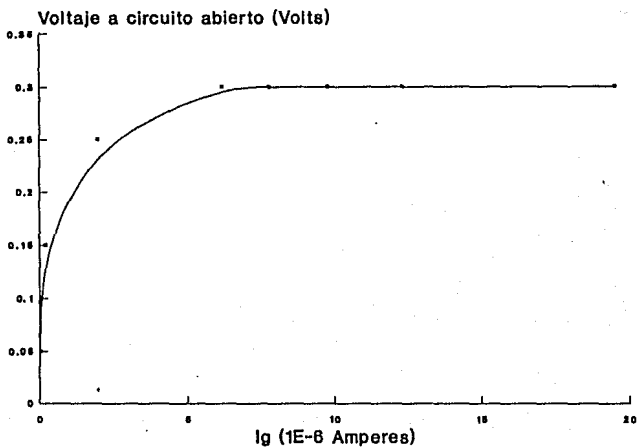


FIG. 4.27 Variación del voltaje a circuito abierto con la luz incidente, en un fotodiodo.

4.6 Diodo comercial

4.6.1 Características C-V

En la gráfica 4.28 es posible observar las características C-V en un diodo comercial, en ella se observan dos curvas, una de las curvas representa una medición realizada utilizando la cámara de medición y la otra utilizando la terminal proporcionada por el fabricante, de esta figura se puede decir que el sistema de medición C-V junto con la cámara de medición es confiable. El comportamiento cualitativo de la capacitancia en el diodo comercial con el voltaje, es el esperado por la teoría, ya que la teoría nos dice que a mayor voltaje de polarización inversa la capacitancia debe ser menor.

4.6.2 Altura de la barrera

En la figura 4.29 se puede observar la gráfica de C^{-2} v.s. V, en ella se ve que la relación entre ambas variables no es una línea recta tal como lo predice la teoría C-V para una unión abrupta, esto se debe a que la pendiente de la curva está cambiando con el voltaje y eso es debido a que la concentración de impurezas en la unión no es constante, sin embargo en la figura 4.30 se observa la variación de ϕ_0 con el voltaje, donde para el rango de -0.45 V a -0.3 V se puede estimar el valor de la altura de la barrera ya que ahí la concentración de impurezas es aproximadamente constante, el valor calculado para ϕ_0 es 0.585 ± 0.004 eV.

4.6.3 Concentración de impurezas

Como se mencionó anteriormente la pendiente de curva de la figura 4.29 cambia con el voltaje, es decir que la concentración de impurezas no tiene un valor constante para todo voltaje, esto es más claro de ver si se utiliza el método de la capacitancia diferencial, el cual se muestra en la figura 4.31, donde se observa que a medida que aumenta el voltaje de polarización inverso la capacitancia diferencial disminuye, lo que implica que la densidad de impurezas aumenta, esto último se puede observar en la figura 4.32, donde el promedio de la concentración de impurezas del lado menos impurificado es de $3.5 \times 10^{14} \pm 1.31 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Para obtener el perfil de la concentración de impurezas es necesario estimar el valor del área del diodo comercial, esto se hizo en el apéndice C.

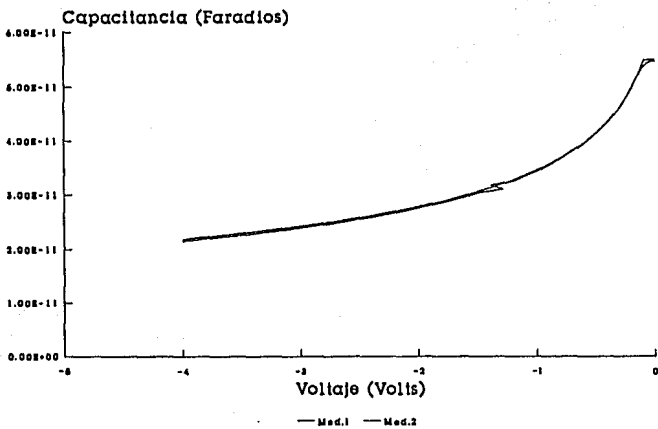


FIG. 4.28 características C-V en un diodo comercial.

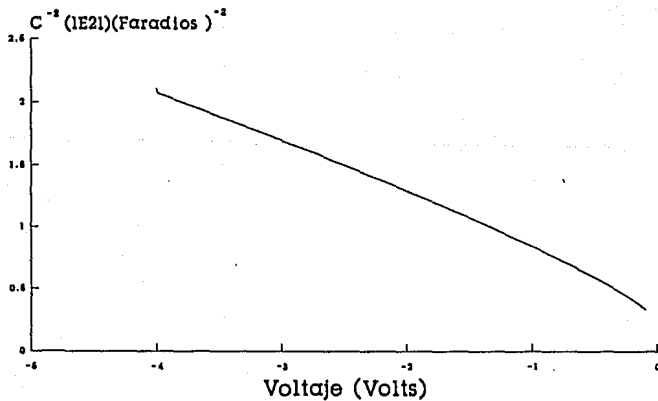


FIG. 4.29 C^{-2} v.s voltaje, en un diodo comercial.

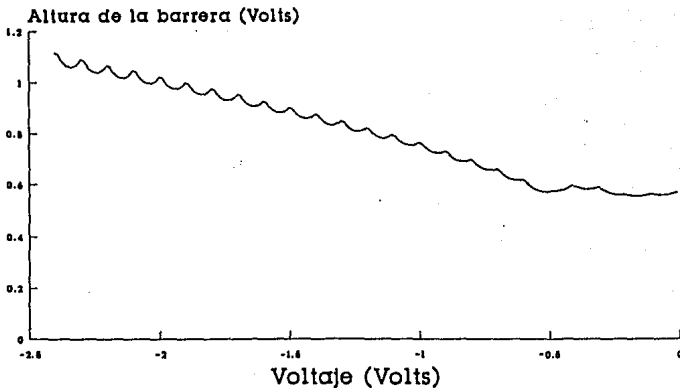


FIG. 4.30 Altura de la barrera de potencial en función del voltaje, en un diodo comercial.

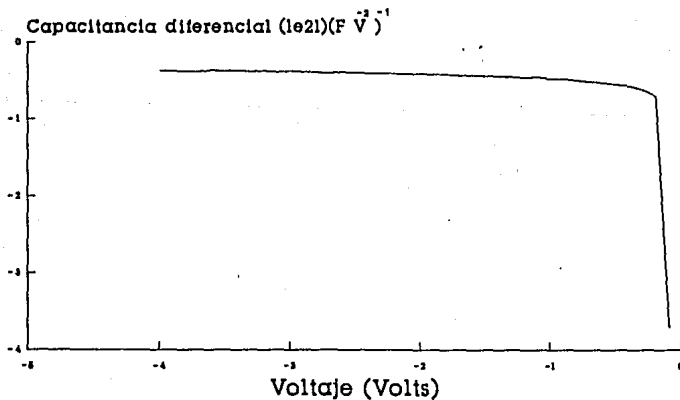


FIG. 4.31 Capacitancia diferencial en función del voltaje, en un diodo comercial.

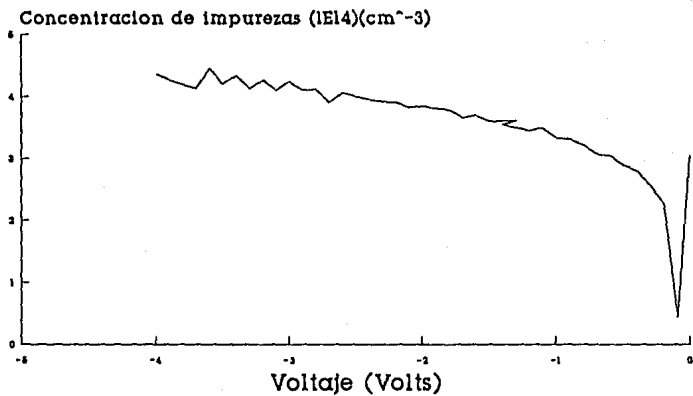


FIG. 4.32 Concentración de impurezas en función del voltaje, en un diodo comercial.

4.7 LED Rojo

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

4.7.1 Características C-V

En la gráfica 4.33 es posible observar las características C-V en el LED rojo , en ella se observan una curva donde el comportamiento cualitativo de la capacitancia en el LED con el voltaje, es el esperado por la teoría, ya que la teoría nos dice que a mayor voltaje de polarización inversa la capacitancia debe ser menor y eso se puede ver en ambas curvas de la figura 4.33. Al igual que con el diodo comercial el área fué obtenida mediante fotografías logradas de la unión utilizando el microscopio óptico (apéndice C), es de notarse que la capacitancia para los LED es menor que en el caso del diodo comercial.

4.7.2 Altura de la barrera

En la figura 4.34 se puede observar la gráfica de C^{-2} v.s. V, en ella se ve que la relación entre ambas variables no es una línea recta tal como lo predice la teoría C-V para una unión abrupta, esto se debe a que la pendiente de la curva está cambiando con el voltaje y eso es debido a que la concentración de impurezas en la unión no está distribuida de manera constante, además en la figura 4.35 se ve claramente que no existe rango alguno de voltaje en el cual la altura de la barrera sea constante con el voltaje.

4.7.3 Concentración de impurezas

Como se mencionó anteriormente la pendiente de curva de la figura 4.33 cambia con el voltaje, es decir que la densidad de impurezas no tiene un valor constante para todo voltaje, esto es más claro de ver si se utiliza el método de la capacitancia diferencial, el cual se muestra en la figura 4.36, donde se observa que a medida que aumenta el voltaje de polarización inverso la capacitancia diferencial disminuye, es decir los cambios de la capacidad con el voltaje van siendo cada vez menores, lo que implica que la densidad de impurezas aumenta, esto último se puede observar en la figura 4.37, donde el promedio de las impurezas de menor concentración es $4.89 \times 10^{14} \pm 9.79 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$.

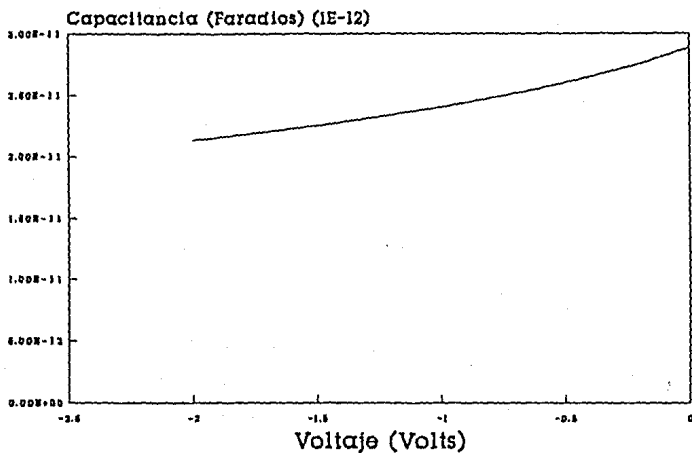


FIG. 4.33 Características C-V en un LED rojo.

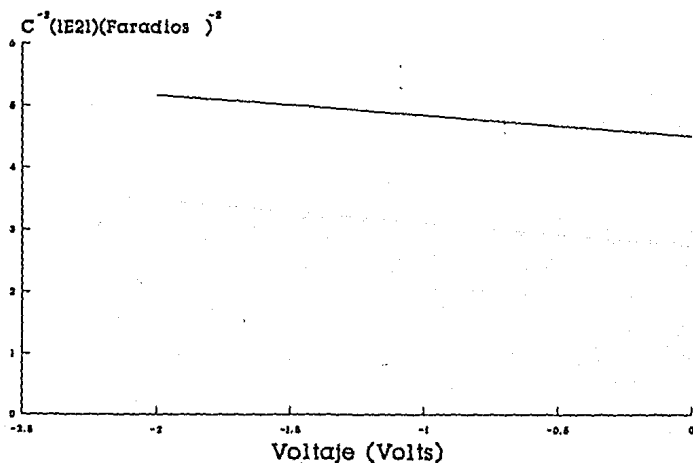


FIG. 4.34 C^{-2} vs voltaje, en un LED rojo.

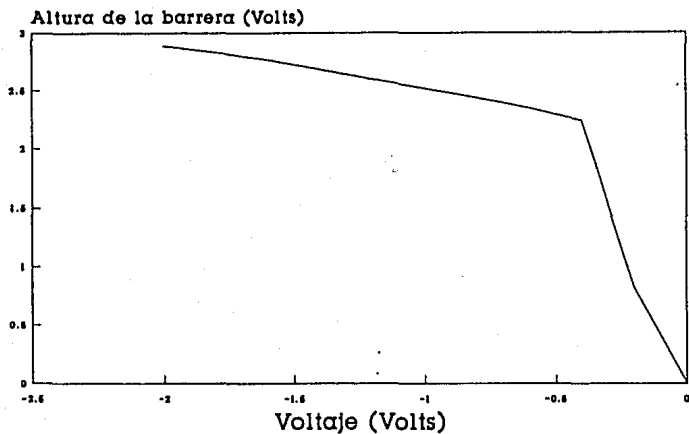


FIG. 4.35 Altura de la barrera de potencial en función del voltaje, en un LED rojo.

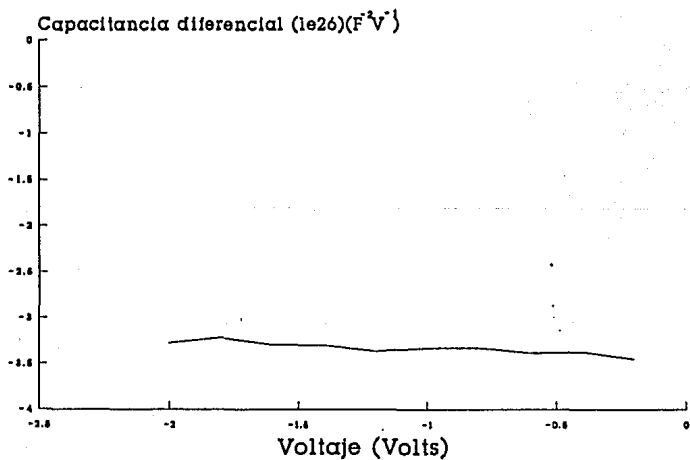


FIG. 4.36 Capacitancia diferencial en función del voltaje, en un LED rojo.

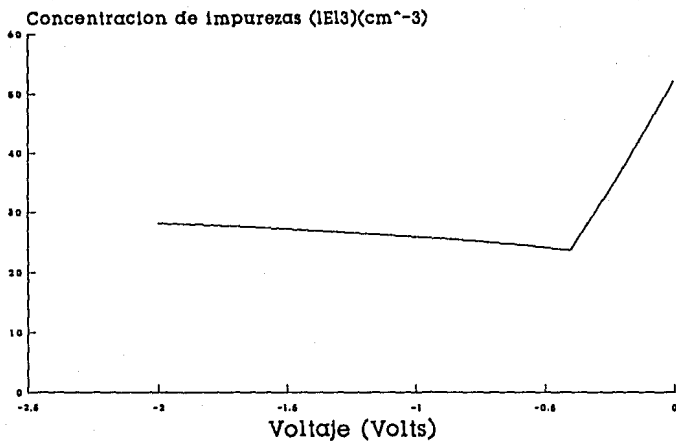


FIG. 4.37 Concentración de impurezas en función del voltaje, en un LED rojo.

4.8 LED Amarillo

4.8.1 Características C-V

En la gráfica 4.38 es posible observar las características C-V en el LED amarillo, en ella se observa una curva donde el comportamiento cualitativo de la capacitancia en el LED con el voltaje, es el esperado por la teoría, ya que la teoría nos dice que a mayor voltaje de polarización inversa la capacitancia debe ser menor y eso se puede ver en ambas curvas de la figura 4.38. Suponiendo que el área es la misma para cualquier tipo de LED, se usó el mismo valor obtenido que para el LED rojo.

4.8.2 Altura de la barrera

En la figura 4.39 se puede observar la gráfica de C^{-2} v.s. V, en ella se ve que la relación entre ambas variables no es una línea recta tal como lo predice la teoría C-V para una unión abrupta, esto se debe a que la pendiente de la curva está cambiando con el voltaje y eso es debido a que la concentración de impurezas en la unión no está distribuida de manera constante, tampoco es posible definir algún intervalo en donde la altura de la barrera sea constante con el voltaje y entonces poder aplicar la teoría, esto se puede corroborar si se observa la figura 4.40.

4.8.3 Concentración de impurezas

Como se mencionó anteriormente la pendiente de curva de la figura 4.39 cambia con el voltaje, es decir que la densidad de impurezas no tiene un valor constante para todo voltaje, esto es más claro de ver si se utiliza el método de la capacitancia diferencial, el cual se muestra en la figura 4.41, donde se observa que a medida que aumenta el voltaje de polarización inverso la capacitancia diferencial disminuye, es decir los cambios de la capacidad con el voltaje van siendo cada vez menores, lo que implica que la densidad de impurezas aumenta, esto último se puede observar en la figura 4.42, donde el promedio de la concentración de impurezas del lado menos impurificado es $3.51 \times 10^{13} \pm 5.97 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.

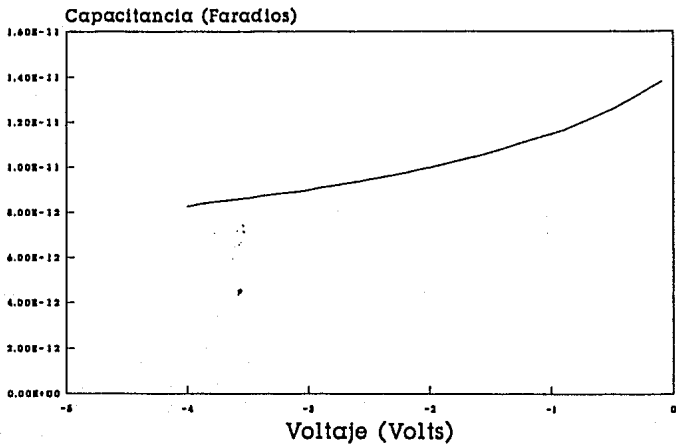


FIG. 4.38 Características C-V en un LED amarillo.

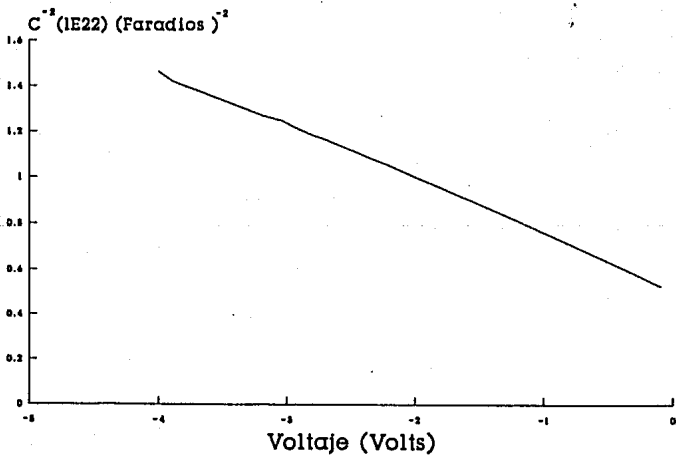


FIG. 4.39 C^{-2} vs voltaje, en un LED amarillo.

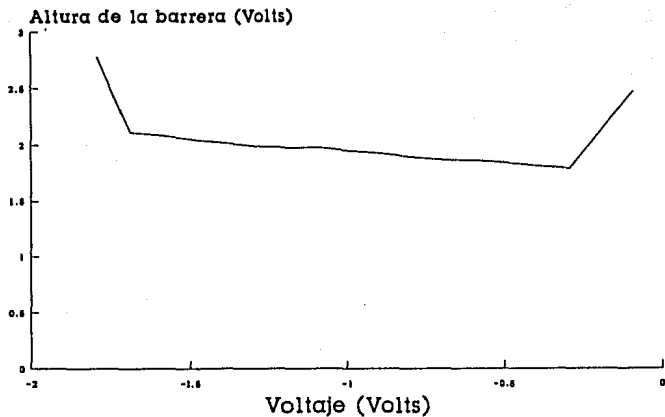


FIG. 4.40 Altura de la barrera de potencial en función del voltaje, en un LED amarillo.

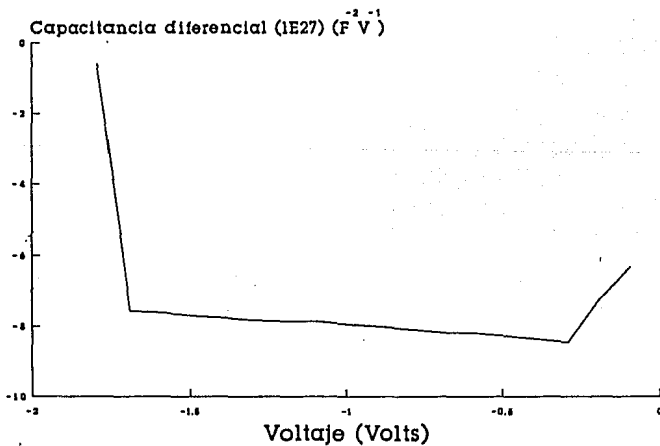


FIG. 4.41 Capacitancia diferencial en función del voltaje, en un LED amarillo.

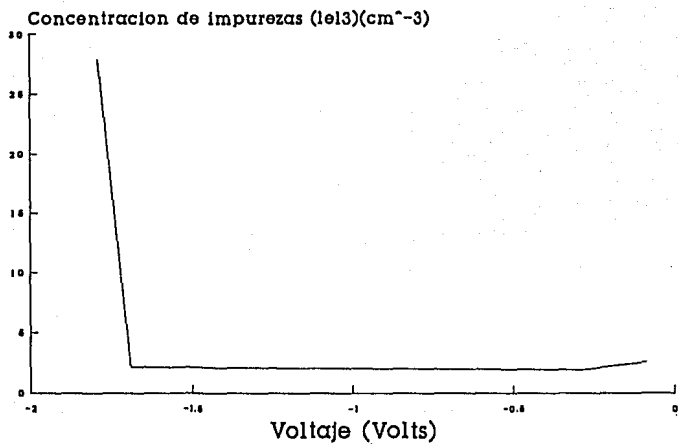


FIG. 4.42 Concentración de impurezas en función del voltaje, en un LED amarillo.

4.9 LED Verde

4.9.1 Características C-V

El LED verde presenta las mismas características cualitativas que los LED rojo y amarillo, esto se puede apreciar en la figura 4.43, para el cálculo del área se supone que mismo valor que en los casos anteriores.

4.9.2 Altura de la barrera

En la figura 4.44 se puede observar la gráfica de C^{-2} v.s. V , en ella se ve que la relación entre ambas variables no es una línea recta tal como lo predice la teoría C-V para una unión abrupta, esto se debe a que la pendiente de la curva está cambiando con el voltaje y eso es debido a que la concentración de impurezas en la unión no está distribuida de manera constante, además en la figura 4.45 se puede apreciar que no es posible definir un rango de voltajes para el cual altura de la barrera sea aproximadamente constante.

4.9.3 Concentración de impurezas

Como se mencionó anteriormente la pendiente de curva de la figura 4.44 cambia con el voltaje, es decir que la densidad de impurezas no tiene un valor constante para todo voltaje, esto es más claro de ver si se utiliza el método de la capacitancia diferencial, el cual se muestra en la figura 4.45, donde se observa que a medida que aumenta el voltaje de polarización inverso la capacitancia diferencial disminuye, es decir los cambios de la capacidad con el voltaje van siendo cada vez menores, lo que implica que la densidad de impurezas aumenta, esto último se puede observar en la figura 4.46, donde el promedio de la concentración de impurezas del lado menos impurificado es $2.56 \times 10^{14} \pm 1.76 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.

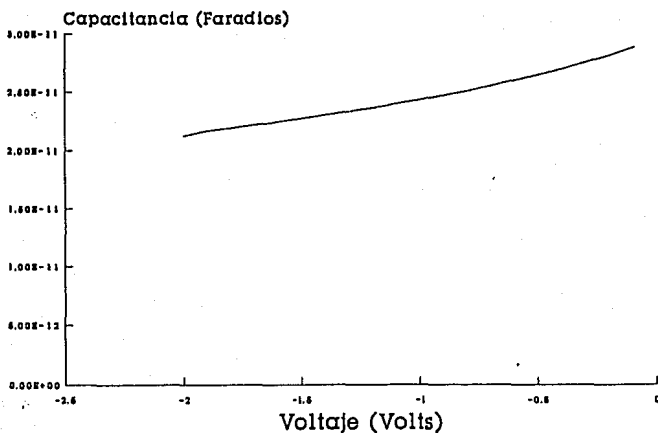


FIG. 4.43 Características C-V en un LED verde.

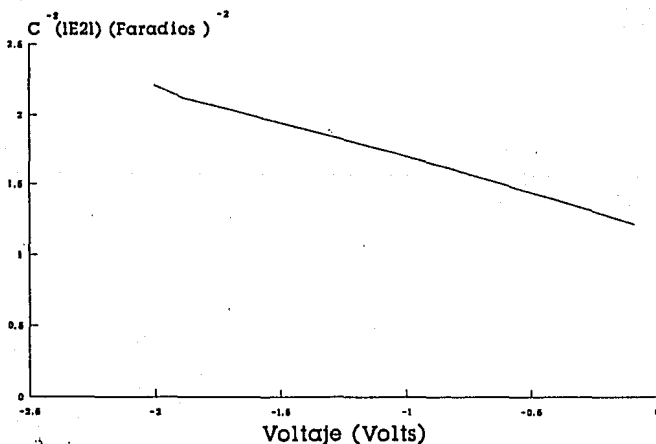


FIG. 4.44 C^{-2} vs voltaje, en un LED verde.

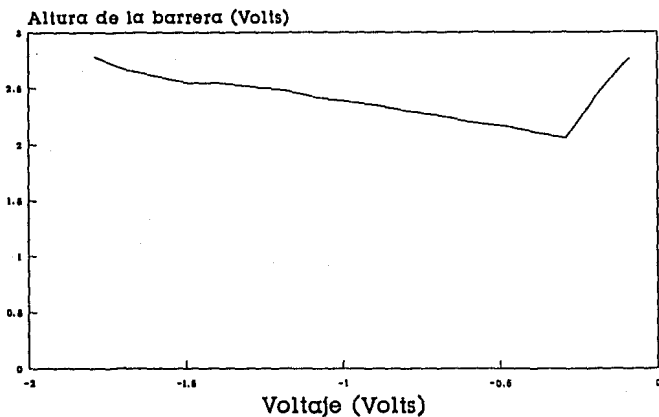


FIG. 4.45 Altura de la barrera de potencial en función del voltaje, en un LED verde.

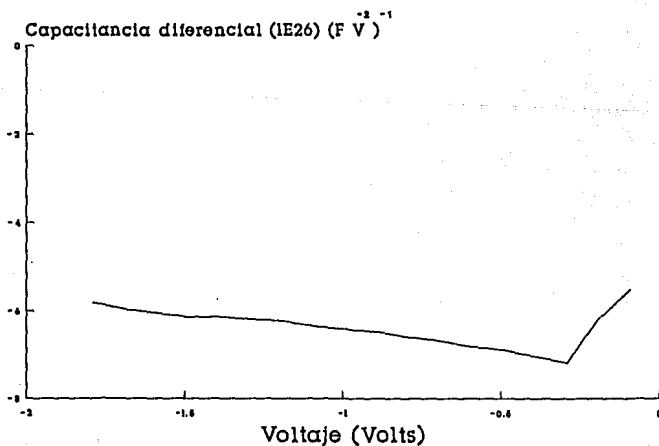


FIG. 4.46 Capacitancia diferencial en función del voltaje, en un LED verde.

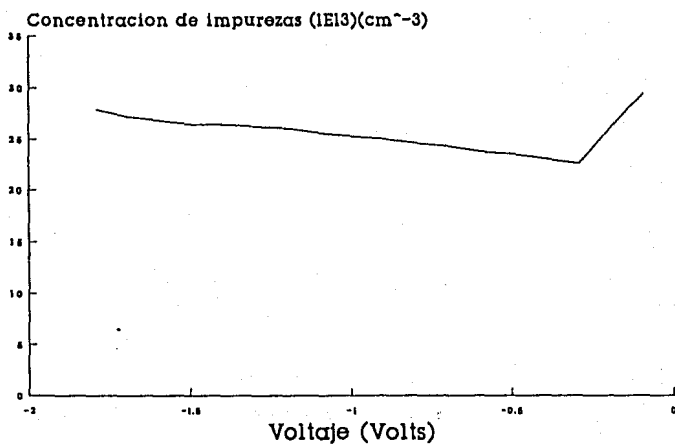


FIG. 4.47 Concentración de impurezas en función del voltaje, en un LED verde.

4.10 Degradación en los LED

Debido al comportamiento que se muestra en las gráficas de la electroluminiscencia en los LED (4.14, 4.19 y 4.24), se decidió estudiar un poco la degradación de los LED conforme aumenta el voltaje, para realizar lo anterior, se utilizó el microscopio óptico y se tomó una serie de transparencias en la cual se muestra el proceso de degradación con el voltaje de un LED amarillo hasta el momento en que este deja de emitir.

4.11 Estimación de la movilidad y conductividad

Para la estimación de la conductividad no fue posible utilizar la teoría presentada en 3.1, esto se debió a que la región lineal de los dispositivos semiconductores no se alcanzó debido al limitador de corriente en el electrómetro, sin embargo la conductividad pudo ser estimada solamente en el diodo comercial utilizando una gráfica de resistividad *v.s* concentración de impurezas (Sze, 1980), es decir dado el valor de la concentración de impurezas (encontrado mediante técnicas C-V), se encontró el valor de la conductividad, este valor es en el diodo comercial de $1/30 (\Omega\text{cm})^{-1}$ si el lado menos impurificado es tipo p y $1/10 (\Omega\text{cm})^{-1}$ si es tipo n.

Se procedió de dos maneras distintas para la estimación de la movilidad en el diodo comercial, la primera consistió en utilizar una gráfica de la movilidad *v.s* la concentración de impurezas (Casey, 1978), en la segunda se utilizó la teoría presentada en 1.2 (ecuación 1.6), en donde se usó el valor promedio encontrado para la concentración de impurezas y el valor de la conductividad antes estimado. Los valores que se obtuvieron con el primer método fueron: $480 (\text{cm}^2/\text{V s})$ si el lado menos impurificado es tipo p y $1500 (\text{cm}^2/\text{V s})$ si es n. Para el segundo método fueron $595.2 \pm 60 (\text{cm}^2/\text{V s})$ si el lado menos impurificado es tipo p y de $1785.7 \pm 300 (\text{cm}^2/\text{V s})$ si es tipo n. Estos valores presenta una desviación del 24% y 19% respectivamente, estas discrepancias probablemente se deben a que se utilizó un valor promedio para la concentración de impurezas.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES

5.1 RESUMEN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Sistema de medición.

Dada la versatilidad que se logra al realizar mediciones, los sistemas automáticos de medición deben ser implementados en todos los laboratorios de investigación. Lo anterior se apoya en el hecho de que en el presente trabajo se realizaron corridas experimentales de hasta 900 datos, dichas mediciones tardarían demasiado realizadas manualmente y además el error en la toma de medidas es mayor; el sistema de medición presentado en este trabajo es capaz solamente de adquirir datos I-V y C-V, después los datos fueron procesados en el paquete quatro-pro, sin embargo esto no es lo adecuado ya que el proceso en este tipo de software es lento y tedioso en comparación con un software desarrollado con algún lenguaje de programación, (Campos, 1986) el sistema utilizó como lenguaje de programación al BASIC, el cual no resultó satisfactorio debido a que dicho lenguaje no es estructurado, y por ende a medida que un programa de automatización tienda a ampliarse, el trabajo de programación se hace muy complicado.

Es importante notar el hecho de que de un concepto sencillo, tal como el que rige a las cámaras de Faraday es posible construir cámaras de medición que blinden lo mejor posible de ruido externo a las mediciones que sean realizadas dentro de ella, además para la conexiones entre la cámara de medición y los aparatos de medida es imprescindible el uso de cables coaxiales y triaxiales ya que estos cancelan el campo magnético autogenerado por los cables por donde pasa la corriente, además el cable triaxial incluye un tercer conector que se utiliza como tierra física.

Resistencia en serie, paralelo y factor de idealidad

El modelo presentado en el presente trabajo para encontrar la resistencia en serie, paralelo y el factor de idealidad para cualquier dispositivo semiconductor de unión p-n, es muy sencillo y sin embargo ajusta muy bien los valores teóricos con los experimentales, estos tres parámetros empíricos contienen la información microscópica de los fenómenos de transporte de carga que ocurren dentro del material, es decir la resistencia en serie nos da información acerca de la resistencia intrínseca del material, así como también acerca de la resistencia de los contactos, la resistencia en paralelo representa el efecto que tienen los defectos de la red cristalina (impurezas, dislocaciones, etc) y además los efectos causados debido al encapsulamiento plástico de la unión p-n, el factor de idealidad refleja el tipo de mecanismo de transporte más probable que ocurre en la unión, es decir indica si la corriente dominante es la producida por portadores de carga en la unión o fuera de ella.

El valor encontrado de la resistencia en serie para los dispositivos semiconductores mencionados en el capítulo cuatro, es del orden de ohms y debido a problemas en el limitador de la corriente en el electrómetro solo fue posible conocer una cota máxima de su valor.

La resistencia en paralelo solo fué posible obtenerla en el caso del diodo comercial, la cuál tiene un valor del orden de 10^9 ohms, para los diodos emisores de luz no fué factible obtener su valor debido a que la corriente demandada por la resistencia en paralelo no pudo ser medida por el electrómetro.

El factor de idealidad si fué posible medirlo para el diodo comercial y los LED, como se vió en el capítulo cuatro su valor oscila entre uno y dos tal como lo predice la teoría, sin embargo el valor de n para los LED es más próximo a dos y en cambio para los diodos comerciales es más próximo a uno.

Corriente de saturación inversa

La determinación de la corriente de saturación inversa mediante el método indirecto de voltajes de polarización directos, da el mismo orden de magnitud que el método directo (voltajes inversos), para el diodo comercial el orden de magnitud de esta corriente es 10^{-10} amperes y de 10^{-20} amperes para los LED.

La variación encontrada de la corriente de saturación inversa con la temperatura fué del tipo exponencial, tal como lo predice la teoría de difusión.

Altura de la barrera de la unión

La altura de la barrera de la unión fué obtenida utilizando la técnica I-V y la técnica C-V para el diodo comercial de silicio, la técnica C-V no funcionó en los LED debido a que no es posible definir un rango lineal en ninguno de estos dispositivos analizados, esto se debe a que dicha técnica solo es aplicable si la concentración de impurezas es constante con respecto a la distancia. Con la técnica I-V se obtuvo el valor de la altura de la barrera utilizando voltajes inversos y voltajes directos, este valor discrepa en no más del 3%, lo cual vuelve a poner de manifiesto la buena concordancia entre los métodos I-V con voltajes directos e inversos. Para esta técnica de medición de la altura de la barrera se debe tener un buen control sobre la temperatura. El valor encontrado para el diodo comercial con técnicas C-V discrepa en no más del 23% con los valores de ϕ_0 encontrados mediante técnicas I-V.

Concentración de impurezas

El método de la capacitancia diferencial descrito en el capítulo tercero, es un método general (no depende del modelo de unión utilizado) que permite encontrar el perfil de la concentración de impurezas que se encuentra dentro de la unión; de los perfiles encontrados en el presente trabajo ninguno correspondió a la unión abrupta, se puede decir entonces que el modo de realizar las uniones p-n en los dispositivos semiconductores presentados en este trabajo es por difusión, lo cual es cierto para el diodo comercial de silicio (Motorola, 1988). Los valores de estas concentraciones son del orden de 10^{13} y 10^{14} por centímetro cúbico.

Determinación del área de los dispositivos semiconductores

La teoría C-V para una unión p-n, requiere del conocimiento del área transversal del dispositivo, para lograr este fin se utilizó un microscopio óptico, el cual resultó muy útil para la determinación de este parámetro. La estimación del área fué buena debido a que las dimensiones internas de los dispositivos son muy claras en las fotografías (ver apéndice C).

Estimación de la conductividad y de la movilidad

Se estimó el valor de la conductividad solo en el diodo comercial, ya que en los LED no se encontró información en la literatura para poder dar el valor de la conductividad dado un valor promedio de la concentración de impurezas.

Solo fue posible estimar la movilidad solo para el diodo comercial, ya que tampoco se encontró información del comportamiento de la movilidad con la concentración de impurezas en los LED. Las discrepancias entre los valores encontrados para la movilidad, los dos métodos propuestos sugieren que probablemente la movilidad encontrada es de los huecos y por tanto la región menos impurificada del diodo comercial presenta una conductividad tipo p.

Características I-V bajo condiciones de iluminación

Dadas las características que presentó el fotodiodo bajo condiciones de iluminación, se puede concluir que el modelo mostrado en el capítulo tercero es suficiente para describir dichas características, ya que la relación de la corriente generada con la luz es directamente proporcional a la corriente de corto circuito y la relación entre la corriente generada con la luz es logarítmica con el voltaje de circuito abierto. También se encontró el valor de la constante lineal de calibración del fotodiodo, la cual tiene un valor de 1.031 ± 0.03 . El valor encontrado para R_o no pudo ser comparado ya que no existe referencia alguna de su valor en las especificaciones del fotodiodo.

Comportamiento de la emisión de luz de los LED con el voltaje y determinación del voltaje de máxima electroluminiscencia.

La emisión de luz de los LED con el voltaje es semejante para los tres tipos de LED presentados, es decir a medida que aumenta el voltaje, la emisión de luz también aumenta hasta llegar a un valor máximo, después la emisión de luz comienza a disminuir conforme aumenta el voltaje. El voltaje estimado para la máxima electroluminiscencia en un LED, es próximo al valor dado por el fabricante para el voltaje óptimo de operación, por lo que los valores encontrados son confiables. Se observó además que los LED se comienzan a degradar si se opera a voltajes mayores de 3 volts y se degrada totalmente paravoltajes mayores de 6 volts aproximadamente, lo anterior se basa en el estudio fotográfico que se realizó con la ayuda de un microscopio óptico en el cual se observó los cambios apreciables en el material.

5.2 SUGERENCIAS PARA TRABAJOS A FUTURO

Los estudios a futuro inmediato relacionados con este trabajo son:

- a) Automatización del mismo equipo de medición utilizando algún lenguaje estructurado (Pascal, C, etc.)
- b) Realización de un programa integral, el cual sea capaz de procesar datos, desplegar gráficas, de tal manera que el usuario pueda obtener los resultados de su medición en poco tiempo.
- c) Caracterización de estructuras metal-semiconductor, utilizando materiales policristalinos que se han desarrollado en el LES IIM-UNAM, tales como el sulfuro de cadmio, sulfuro de cobre, etc.
- d) Caracterización de estructuras metal-aislante-semiconductor, utilizando también los materiales mencionados en c).

BIBLIOGRAFIA

Campos J., E. Sansores , A. Sanchez, P.K.Nair , S.López, "Sistemas de adquisición y procesamiento de datos para la caracterización optoelectrónica de materiales usados en energía solar", Memorias de la décima reunión nacional de energía solar en Guanajuato, Gto., 27-30, (1986).

Casey H.C., Jr., and M.B Panish, "Heterostructure lasers", Academic, New York, (1978).

Goldstein H., "Mecánica clásica". Reverte, (1988).

Grove Andrew S., "Physics and technology of semiconductor devices". John Wiley and Sons, (1967).

Harry K. Charles, Jr, Richard J. King and Arie P. Ariotedjo, "Measurements techniques in thin film polycrystalline materials and devices (solar cells). Solar Cells, 1, 327-346, Junio (1979).

HP 4274A, "Multi-frequency LCR Meter Operating Manual", Manual técnico, Marzo (1982).

Keithley 220-230, "Programming Manual", Manual técnico, (1982).

Keithley 619, "Electrometer/Multimeter Instruction Manual", Manual técnico, Agosto (1983).

Mc-Kelvey J.P., "Física del estado sólido y de los semiconductores". Limusa, (1980).

Morrison Ralph, "Grounding and Shielding Techniques in Instrumentation". John Wiley and Sons, (1977).

Motorola, "Rectifiers and zener diodes data book", Motorola inc., (1988)

Reitz J.R., F.J. Milford, R.W. Christy, "Fundamentos de la teoría electromagnética", Addison-Wesley, (1983).

Resnick R., D. Halliday, "Fundamentos de física", C.E.C.S.A, (1980).

Sah C.T, R.N. Noyce, W.Shockley, "Carrier generation and recombination in P-N junctions and P-N junction characteristics., Proceedings of the IRE, 45, 1228-1243, (1957).

Sanchez J. A., "Celdas solares de $Cu-Cu_2O$ de barrera Schottky, de pared anterior, Tesis profesional (licenciatura), UNAM, Enero (1979).

Solid State Lamps, "Optoelectronics designer's catalog", Catálogo HP, (1978).

Sze S.M., "Physics of the semiconductors devices", John Wiley and Sons, (1981).

Van Den Biesen J.J.H., "P-N junction capacitances part I: the depletion capacitance", Philips J. Research, 40, 88-102, (1985)

APENDICE A

PROGRAMACION

Para llevar a cabo la automatización es necesario utilizar programas en algún lenguaje de computadora, en la presente tesis se utilizó el lenguaje BASIC, debido a que las subrutinas disponibles en el laboratorio, para el control de la interfaz de comunicación IEEE-488 pueden ser llamadas por dicho lenguaje. En este apéndice se muestra un programa, el cual se encarga de automatizar las mediciones corriente-voltaje y capacitancia-voltaje.

```

-0  OPTION BASE 1
0   ' Copyright Hewlett-Packard 1984, 1985
0   '
0   ' Set up program for MS-DOS HP-IB I/O Library
0   ' For use independent of the PC instrument bus system
0   '
0   DEF SEG
-0  CLEAR ,&HFEE0
0   I=&HFEE0
00  '
10  ' PCIB.DIR$ represents the directory where the library files
20  ' are located
30  ' PCIB is an environment variable which should be set from MS-DOS
40  ' i.e. A:> SET PCIB=A:\LIB
50  '
60  ' If there is insufficient environment space a direct assignment
70  ' can be made here, i.e
80  ' PCIB.DIR$ = "C:\JC"
90  ' Using the environment variable is the preferred method
00  '
10  ' PCIB.DIR$ = ENVIRON$("PCIB")
20  I$ = PCIB.DIR$ + "\PCIBILC.BLD"
30  BLOAD I$,&HFEE0
40  CALL I(PCIB.DIR$, I$, J%)
50  PCIB.SEG = I%
60  IF J%=0 THEN GOTO 330
70  PRINT "Unable to load.";
80  PRINT " (Error #";J%;")"
90  STOP
00  '
10  ' Define entry points for setup routines
20  '
30  DEF SEG = PCIB.SEG
40  O.S = 5
50  C.S = 10
60  I.V = 15
70  I.C = 20
80  L.P = 25
90  LD.FILE = 30
00  GET.MEM = 35
10  L.S = 40
20  PANELS = 45
30  '
40  ' Establish error variables and ON ERROR branching
50  '
60  DEF.ERR = 50
70  PCIB.ERR$ = STRING$(64,32)
80  PCIB.NAME$ = STRING$(16,32)
90  CALL DEF.ERR(PCIB.ERR,PCIB.ERR$,PCIB.NAME$,PCIB.GLBERR)
00  PCIB.BASERR = 255
10  ON ERROR GOTO 830
20  '
30  J=-1
40  I$=PCIB.DIR$+"\HPIB.SYN"
50  CALL O.S(I$)

```

```

60 IF PCIB.ERR<>0 THEN ERROR PCIB.BASERR
70
-80 ' Determine entry points for HP-IB Library routines
90
00 I=0
-10 CALL I.V(I,IOABORT,IOCLEAR,IOCONTROL,IOENTER)
20 IF PCIB.ERR<>0 THEN ERROR PCIB.BASERR
30 CALL I.V(I,IOENTERA,IOENTERS,IOEOI,IOEOL)
40 IF PCIB.ERR<>0 THEN ERROR PCIB.BASERR
50 CALL I.V(I,IOGETTERM,IOLLOCKOUT,IOLLOCAL,IOMATCH)
60 IF PCIB.ERR<>0 THEN ERROR PCIB.BASERR
70 CALL I.V(I,IOOUTPUT,IOOUTPUTA,IOOUTPUTS,IOPPOLL)
-80 IF PCIB.ERR<>0 THEN ERROR PCIB.BASERR
90 CALL I.V(I,IOPPOLLC,IOPPOLLU,IOREMOTE,IORESET)
00 IF PCIB.ERR<>0 THEN ERROR PCIB.BASERR
10 CALL I.V(I,IOSEND,IOSPOLL,IOSTATUS,IOTIMEOUT)
-20 IF PCIB.ERR<>0 THEN ERROR PCIB.BASERR
30 CALL I.V(I,IOTRIGGER,J,J,J)
40 IF PCIB.ERR<>0 THEN ERROR PCIB.BASERR
-50 CALL C.S
60 I$=PCIB.DIR$+"\HPIB.PLD"
70 CALL L.P(I$)
-80 IF PCIB.ERR<>0 THEN ERROR PCIB.BASERR
90 GOTO 960
00
10 ' Error handling routine
20
30 IF ERR=PCIB.BASERR THEN GOTO 860
40 PRINT "BASIC error #";ERR;" occurred in line ";ERL
50 STOP
60 TMPERR = PCIB.ERR
70 IF TMPERR = 0 THEN TMPERR = PCIB.GLBERR
80 PRINT "PC Instrument error #";TMPERR;" detected at line ";ERL
90 PRINT "Error: ";PCIB.ERR$
00 STOP
10
20 ' COMMON declarations are needed if your program is going to chain
30 ' to other programs. When chaining, be sure to call DEF.ERR as
40 ' well upon entering the chained-to program
50
60 COMMON PCIB.DIR$,PCIB.SEG
70 COMMON LD.FILE,GET.MEM,PANELS,DEF.ERR
80 COMMON PCIB.BASERR,PCIB.ERR,PCIB.ERR$,PCIB.NAME$,PCIB.GLBERR
-90 COMMON IOABORT,IOCLEAR,IOCONTROL,IOENTER,IOENTERA,IOENTERS,IOEOI,IOEOL,IOGE
TERM,IOLLOCKOUT,IOLLOCAL,IOMATCH,IOOUTPUT,IOOUTPUTA,IOOUTPUTS,IOPPOLL,IOPPOLLC,I
PPOLLU,IOREMOTE,IORESET,IOSEND,IOSPOLL,IOSTATUS,IOTIMEOUT,IOTRIGGER
000
-010 FALSE = 0
020 TRUE = NOT FALSE
030 NOERR = 0
-040 EUNKNOWN = 1000011
050 ESEL = 1000021
060 ERANGE = 1000031
070 ETIME = 1000041
-080 ECTRL = 1000051
090 EPASS = 1000061
100 ENUM = 1000071
110 EADDR = 1000081
-120 COMMON FALSE, TRUE, NOERR, EUNKNOWN, ESEL, ERANGE, ETIME, ECTRL, EPASS, EN
M, EADDR

```

```

130 DIM R(20),E(20),C(200),D(200),P(200),I(200),V(200),PS(200),CODIG$(200),LP(2
0),VI(200),VII(200)
140 CLS:KEY OFF
150 '***** PROGRAMA ESTELAR *****
160 PRINT TAB(32) "MEDICIONES":PRINT
170 PRINT TAB(24)"1) CAPACIDAD V.S VOLTAJE"
180 PRINT TAB(24)"2) CORRIENTE V.S VOLTAJE"
190 PRINT TAB(24)"3) SALIDA DEL PROGRAMA"
200 INPUT"OPCION";A
210 IF A<>1 AND A<>2 AND A<>3 THEN 1200
220     IF A=1 THEN 1250
230     IF A=2 THEN 3200
240     IF A=3 THEN 4720
250 '*****C-V*****
260 '***** PARAMETROS *****'
270 LALO=0
280 KEY OFF
290 CLS:PRINT"los pasos permitidos entre cada medicion seran:"
300 PRINT"numeros enteros mayores o iguales a la unidad."
310 PRINT"numeros de la forma 0.n (con n entero),para el rango de -35 a 0 volt
, donde estos voltajes pueden tener la forma ab.n"
320 PRINT"numeros de la forma 0.nm (con n entero),para el rango de -9 a 0 volt
, donde estos voltajes pueden tener la forma b.nm"
330 INPUT"dame el paso entre cada medicion";DV
340     IF DV<=0 THEN 1290
350     IF DV<.01 THEN 1290
360     IF DV>1 THEN 1370 ELSE 1380
370     IF INT(DV)<>DV THEN 1290
380     IF LALO=0 THEN 1390 ELSE 3040
390     IF INT(DV)=DV THEN 1440
400     IF DV<1 THEN 1410
410     IF INT(10*DV)=10*DV THEN 1420 ELSE 1430
420 CLS:PRINT"solo puedes escoger voltajes entre [-35,0], de la forma ab.n":GOT
1470
430 CLS:PRINT"solo puedes escoger voltajes entre [- 9,0], de la forma b.nm":GOT
1470
440 CLS:PRINT"solo puedes escoger voltajes entre [-35,0], de la forma ab"
450 INPUT"dame el voltaje minimo V1";V1
460     IF INT(V1)<>V1 THEN 1440 ELSE 1480
470 INPUT"dame el voltaje minimo v1";V1
480     V1$=STR$(V1)
490     IF LEN(V1$)>5 THEN 1400
500     IF INT(DV)=DV THEN 1510 ELSE 1520
510     IF V1<-35 OR V1>=0 THEN 1400 ELSE 1550
520     IF INT(10*DV)=10*DV THEN 1530 ELSE 1540
530     IF V1<-35 OR V1>=0 THEN 1400 ELSE 1550
540     IF V1<-9 OR V1>=0 THEN 1400 ELSE 1550
550     IF LALO=0 THEN 1560 ELSE 3080
560     IF INT(DV)=DV THEN 1600
570     IF INT(10*DV)=10*DV THEN 1580 ELSE 1590
580 CLS:PRINT"solo puedes escoger voltajes entre"+STR$(V1)+" y 0":GOTO 1630
590 CLS:PRINT"solo puedes escoger voltajes entre"+STR$(V1)+" y 0":GOTO 1630
600 CLS:PRINT"Los voltajes permitidos estan entre"+STR$(V1)+" y 0"
610 INPUT"dame el voltaje maximo V2";V2
620     IF INT(V2)<>V2 THEN 1600 ELSE 1640
630 INPUT"dame el voltaje maximo V2";V2
640     IF V1>=V2 THEN 1650 ELSE 1690
650     TIMES="0"
660     CLS:PRINT"V2 no puede ser menor o igual a V1"
670     IF TIMES<"00:00:05" THEN 1660 ELSE 1680

```

```

680      GOTO 1560
690      V2$=STR$(V2)
-700     IF LEN(V2$)>5 THEN 1560
710     IF INT(DV)=DV THEN 1720 ELSE 1730
720     IF V2<-35 OR V2>0 THEN 1560 ELSE 1760
-730     IF INT(10*DV)=10*DV THEN 1740 ELSE 1750
740     IF V2<-35 OR V2>0 THEN 1560 ELSE 1760
750     IF V2<-9 OR V2>0 THEN 1560 ELSE 1760
760     IF LALO=0 THEN 1770 ELSE 3120
-770     CLS:PRINT"Las frecuencias permitidas son:"
780     PRINT"0.1,0.12,0.2,0.4,1,2,4,10,20,40,100 (kHz)"
790     INPUT"dame el valor de la frecuencia";W
-800     R(1)=.1:R(2)=.12:R(3)=.2:R(4)=.4:R(5)=1:R(6)=2:R(7)=4
810     R(8)=10 :R(9)=20 :R(10)=40:R(11)=100
820     FOR J= 1 TO 11
830         IF W<>R(J) THEN 1840 ELSE GOTO 1920
-840     NEXT J
850     GOTO 1770
860     IF W=.1 THEN W$="F11"
870     IF W=.12 THEN W$="F12"
880     IF W=.2 THEN W$="F13"
890     IF W=.4 THEN W$="F14"
900     IF W=1 THEN W$="F15"
-910     IF W=2 THEN W$="F16"
920     IF W=4 THEN W$="F17"
930     IF W=10 THEN W$="F18"
-940     IF W=20 THEN W$="F19"
950     IF W=40 THEN W$="F20"
960     IF W=100 THEN W$="F21"
970     IF LALO=0 THEN 1980 ELSE 3160
980     CLS:PRINT"los valores permitidos de la amplitud son"
990     PRINT"0.01, 0.1, 1, 5"
:000     INPUT"dame el valor del multiplicador de la amplitud";P
010     E(1)=.01:E(2)=.1:E(3)=1:E(4)=5
020     FOR J=1 TO 4
:030         IF P<>E(J) THEN 2040 ELSE GOTO 2060
:040     NEXT J
050     GOTO 1980
:060     IF P=.01 THEN A$="M1"
:070     IF P=.1 THEN A$="M2"
080     IF P=1 THEN A$="M3"
:090     IF P=5 THEN A$="M4"
:100     '***** PROCESO *****'
:110     N%=ABS((V2-V1)/DV)+1
120     DVV=10*DV
:130     B=0:S=0
:140     K%=0
150     K2%=0
:160     ACT=0
:170     MAX=2
:180     FUENTE=317
:190     DVM=317:DVM1=3
:200     CODIGO$="A2B1R31"+W$+A$+"E"
:210     LONGITUD=LEN(CODIGO$)
:220     COD$="R32E"
:230     LON=LEN(COD$)
:240     CLS:CALL IOOUTPUTS(FUENTE,CODIGO$,LONGITUD)
:250     IF PCIB.ERR<>NOERR THEN ERROR PCIB.BASERR
-260     CLS:PRINT"para parar el proceso oprime return"
:270     K%=K%+1

```

```

280 G$=INKEY$: IF LEN(G$)=0 THEN 2300
290 IF ASC(G$)=13 THEN 2500
300 IF INT(DV)=DV THEN 2340
310 IF INT(DVV)=DVV THEN 2320 ELSE 2330
320 M%=10*(V1+((K%-1)*DV)) :EXPO=-1:MM=M%*.1:GOTO 2350
330 M%=100*(V1+((K%-1)*DV)) :EXPO=-2:MM=M%*.01:GOTO 2350
340 M%=(V1+((K%-1)*DV)) :EXPO= 0:MM=M%
350 IF LEN(STR$(M%))>4 THEN PRINT"proceso invalidado":GOTO 1140
360 P$(K%)="BI"+STR$(M%)+ "E"+STR$(EXPO)+"VE"
370 LP(K%)=LEN(P$(K%))
380 CODIG$(K%)=P$(K%)
390 CALL IOOUTPUTS(FUENTE,CODIG$(K%),LP(K%))
400 IF PCIB.ERR<>NOERR THEN ERROR PCIB.BASERR
410 TIMES="0"
420 IF TIMES>="00:00:03" THEN 2430 ELSE 2420
430 CALL IOENTERA(FUENTE,D(1),MAX,ACT)
440 IF PCIB.ERR<>NOERR THEN ERROR PCIB.BASERR
450 C(K%)=CDBL(D(1))
460 PRINT"CAPACIDAD" TAB(20)"VOLTAJE"TAB(42)"#"
470 PRINT C(K%) TAB(22) MM, TAB(40)K%
480 IF K%-1=N% THEN 2500
490 GOTO 2270
500 CALL IOOUTPUTS(FUENTE,COD$,LON)
510 IF PCIB.ERR<>NOERR THEN ERROR PCIB.BASERR
520 BEEP
530 K2%=0
540 '***** CLASIFICACION *****
550 IF C(1)>C(2) THEN S=C(2):B=C(1)
560 IF C(2)>=C(1) THEN S=C(1):B=C(2)
570 FOR K2%=1 TO K%-3
580 IF C(K2%+2)>B THEN B=C(K2%+2):S=S
590 IF C(K2%+2)<=B THEN B=B
600 IF C(K2%+2)>S THEN S=S
610 IF C(K2%+2)<=S THEN S=C(K2%+2)
620 IF B=S THEN PRINT"REPITE EL PROCESO":GOTO 1140
630 NEXT K2%
640 '***** GRAFICOS *****'
650 CLS:SCREEN 0:SCREEN 2
660 WINDOW (V1,S)-(V2,B)
670 LINE (V1,C(1))-(V1,C(1))
680 FOR K2%=1 TO K%-1
690 P(K2%)=V1 +((K2%-1)*DV)
700 LINE -(P(K2%),C(K2%))
710 NEXT K2%
720 INPUT"oprima 1 para continuar";A:IF A=1 THEN 2730 ELSE 2720
730 CLS:WINDOW (V1,1/B/B)-(V2,1/S/S)
740 LINE (V1,1/C(1)/C(1))-(V1,1/C(1)/C(1))
750 FOR K2%=1 TO K%-1
760 P(K2%)=V1 +((K2%-1)*DV)
770 D(K2%)=CDBL(1/C(K2%)/C(K2%))
780 LINE -(P(K2%),D(K2%))
790 NEXT K2%
800 CALL IOCLEAR(DVM)
810 CALL IORESET(DVM1)
820 '***** ARCHIVO *****'
830 INPUT"
840 IF (S$="S") OR (S$="s") THEN 2860 ELSE 2850
850 IF (S$="N") OR (S$="n") THEN 2930 ELSE 2830
860 INPUT"
870 OPEN "O",# 1,L$
880 QUIERES ARCHIVAR LOS DATOS S/N";S$
890 nombre del archivo s/n";L$

```

```

380 PRINT #1,W,A,V1,V2,DV
390 FOR K2%=1 TO K%-1
400 PRINT # 1,C(K2%),P(K2%)
410 NEXT K2%
420 CLOSE # 1
-930 INPUT"                               quieres realizar otra medicion de c-v
s/n";S$
440 LALO=1
450 IF (S$="S") OR (S$="s") THEN 2970 ELSE 2960
460 IF (S$="N") OR (S$="n") THEN 1140 ELSE 2930
470 CLS:INPUT"quieres cambiar algun valor de las variables s/n";S$
480 IF (S$="S") OR (S$="s") THEN 3000 ELSE 2990
490 IF (S$="N") OR (S$="n") THEN 2100 ELSE 2970
500 CLS:PRINT"el valor inicial del paso dv entre cada medicion es" + STR$(DV)
510 INPUT"quieres cambiar dv s/n";S$
520 IF (S$="S") OR (S$="s") THEN 1290 ELSE 3030
530 IF (S$="N") OR (S$="n") THEN 3040 ELSE 3010
540 CLS:PRINT"el valor de v1 es" + STR$(V1)
550 INPUT"quieres cambiar v1 s/n";S$
560 IF (S$="S") OR (S$="s") THEN 1390 ELSE 3070
570 IF (S$="N") OR (S$="n") THEN 3080 ELSE 3050
580 CLS:PRINT"el valor de v2 es" + STR$(V2)
590 INPUT"quieres cambiar v2 s/n";S$
600 IF (S$="S") OR (S$="s") THEN 1560 ELSE 3110
610 IF (S$="N") OR (S$="n") THEN 3120 ELSE 3090
620 CLS:PRINT"el valor de w es" + STR$(W)
630 INPUT"quieres cambiar w s/n";S$
640 IF (S$="S") OR (S$="s") THEN 1770 ELSE 3150
650 IF (S$="N") OR (S$="n") THEN 3160 ELSE 3130
660 CLS:PRINT"el valor del multiplicador es" + STR$(P)
670 INPUT"quieres cambiar el multiplicador s/n";S$
680 IF (S$="S") OR (S$="s") THEN 1980 ELSE 3190
690 IF (S$="N") OR (S$="n") THEN 2100 ELSE 3170
700 '***** I-V *****'
710 '**** PARAMETROS ****'
720 LALO=0
730 CLS:INPUT"dame dv,(los valores permitidos son solo enteros positivos mayores
que cero y valores de la forma 0.n y 0.nn para n entero)";DV
740 IF DV<=0 THEN 3230
750 IF DV<.01 THEN 3230
760 IF LALO=0 THEN 3270 ELSE 4600
770 CLS:INPUT"dame el voltaje minimo v1";V1
780 IF V1<-100 OR V1>100 THEN 3270
790 IF LALO=0 THEN 3300 ELSE 4640
800 CLS:PRINT"el voltaje v2 debe ser mayor que"+ STR$(V1)
810 INPUT"dame el voltaje maximo v2";V2
820 IF V2<-100 OR V2>100 THEN 3290
830 IF LALO=0 THEN 3340 ELSE 4680
840 CLS:INPUT"dame el tiempo para la aplicacion del voltaje (en seg)";T
850 IF T<=0 THEN 3340
860 IF LALO=0 THEN 3370
870 '**** PROCESO ****'
880 CLS
890 DVV =10*DV
900 N% =ABS((V2-V1)/DV)+1
910 FUENTE=313
920 ELECTR=30601
930 DVM =313;DVM1=3
940 CALL IOCLEAR(DVM)
950 IF PCIB.ERR<>NOERR THEN ERROR PCIB.BASERR

```

```

60 CALL IORESET(DVM1)
470 IF PCIB.ERR<>NOERR THEN ERROR PCIB.BASERR
80 MAX =2
90 ACT =0
500 X$ ="X"
510 LX =LEN(X$)
20 W$ ="W"+STR$(T)+"E0"
30 LW =LEN(W$)
540 R$ ="C1X"
550 LOR =LEN(R$)
160 CALL IOOUTPUTS(ELECTR,R$,LOR)
570 IF PCIB.ERR<>NOERR THEN ERROR PCIB.BASERR
580 TIMES="00:00:00"
590 IF TIMES<"00:00:03" THEN 3590 ELSE 3600
500 RR$ ="Z1X"
610 LRR =LEN(RR$)
720 CALL IOOUTPUTS(ELECTR,RR$,LRR)
530 IF PCIB.ERR<>NOERR THEN ERROR PCIB.BASERR
640 TIMES="00:00:00"
650 IF TIMES<"00:00:03" THEN 3650 ELSE 3660
560 RRR$ ="COX"
570 LRRR =LEN(RRR$)
680 CALL IOOUTPUTS(ELECTR,RRR$,LRRR)
590 IF PCIB.ERR<>NOERR THEN ERROR PCIB.BASERR
700 RI$ ="ROX"
710 LIR =LEN(RI$)
720 CALL IOOUTPUTS(ELECTR,RI$,LIR)
730 IF PCIB.ERR<>NOERR THEN ERROR PCIB.BASERR
740 FOR I% =1 TO N%
750 B$ ="B"+STR$(I%)
760 LB =LEN(B$)
770 L$ ="L"+STR$(I%)
780 LL =LEN(L$)
790 VI(I%) =CDBL(VI+((I%-1)*DV))
800 IF INT(DV)=DV THEN 3840
810 IF INT(DV*V)=DV*V THEN 3820 ELSE 3830
820 VII(I%)=CDBL(INT(10*VI(I%) + .5)*.1) :GOTO 3850
830 VII(I%)=CDBL(INT(100*VI(I%) + .5)*.01):GOTO 3850
840 VII(I%)=CDBL(VI(I%))
850 V$ ="V"+STR$(VII(I%))
860 LV =LEN(V$)
870 CO$ =B$+L$+V$+W$+X$
880 LU =LW+LB+LL+LV+LX
890 CALL IOOUTPUTS(FUENTE,CO$,LU)
900 IF PCIB.ERR<>NOERR THEN ERROR PCIB.BASERR
910 NEXT I%
920 F$ ="DOP0F1T4X"
930 LONGIT=LEN(F$)
940 C$ =F$
950 CALL IOOUTPUTS(FUENTE,C$,LONGIT)
960 IF PCIB.ERR<>NOERR THEN ERROR PCIB.BASERR
970 K2%=0
980 PRINT"para parar el proceso oprime return"
990 ON TIMER(T) GOSUB 4030
000 TIMER ON
010 IF K2%=N% THEN 4160
020 GOTO 4010
030 K2%=K2%+1
040 G$=INKEY$:IF LEN(G$)=0 THEN 4060
050 IF ASC(G$)=13 THEN 4160

```



```

J60 CODE$="FIX"
070 LONGI=LEN(CODE$)
180 CALL IOOUTPUTS(ELECTR,CODE$,LONGI)
190 IF PCIB.ERR<>NOERR THEN ERROR PCIB.BASERR
100 CALL IOENTERA(ELECTR,Z(1),MAX,ACT)
-110 IF PCIB.ERR<>NOERR THEN ERROR PCIB.BASERR
120 I(K2%)=CDBL(Z(1))
130 PRINT"CORRIENTE" TAB(20)"VOLTAJE" TAB(35)"#"
140 PRINT I(K2%) TAB(20) VII(K2%) TAB(34) K2%
150 RETURN
160 TIMER OFF
170 BEEP:CLS
-180 '***** CLASIFICACION *****
190 IF I(1)>I(2) THEN S=I(2):B=I(1)
200 IF I(2)>=I(1) THEN S=I(1):B=I(2)
210 FOR K%=1 TO K2%-2
220 IF I(K%+2)>B THEN B=I(K%+2):S=S
230 IF I(K%+2)<=B THEN B=B
240 IF I(K%+2)>S THEN S=S
-250 IF I(K%+2)<=S THEN S=I(K%+2)
260 IF B=S THEN PRINT"REPITE EL PROCESO":GOTO 1140
270 NEXT K%
280 '***** GRAFICOS *****'
290 CLS:SCREEN 0:SCREEN 2
300 WINDOW (V1,S)-(V2,B)
310 LINE (V1,I(1))-(V1,I(1))
320 FOR K%=1 TO K2%
330 LINE -(VII(K%),I(K%))
340 NEXT K%
350 '***** ARCHIVO *****'
360 INPUT"quieres archivar los datos s/n";S$
370 IF S$="S" OR S$="s" THEN 4390 ELSE 4380
380 IF S$="N" OR S$="n" THEN 4460 ELSE 4360
390 CLS:INPUT" nombre del archivo";L$
400 OPEN "O",# 1,L$+".prn"
410 PRINT #1,V1,V2,DV,T
420 FOR K%=1 TO K2%
430 PRINT # 1,I(K%),VII(K%),K%
440 NEXT K%
450 CLOSE # 1
460 CALL IOCLEAR(DVM)
-470 IF PCIB.ERR<>NOERR THEN ERROR PCIB.BASERR
480 CALL IOCLEAR(ELECTR)
490 LALO=1
500 CLS:INPUT" quieres realizar otra medicion de
i-v s/n";S$
510 IF (S$="S") OR (S$="s") THEN 4530 ELSE 4520
520 IF (S$="N") OR (S$="n") THEN 1140 ELSE 4500
530 CLS:INPUT"quieres cambiar algun valor de las variables s/n";S$
540 IF (S$="S") OR (S$="s") THEN 4560 ELSE 4550
550 IF (S$="N") OR (S$="n") THEN 3370 ELSE 4530
560 CLS:PRINT"el valor del paso dv entre cada medicion es" + STR$(DV)
570 INPUT"quieres cambiar dv s/n";S$
580 IF (S$="S") OR (S$="s") THEN 3230 ELSE 4590
590 IF (S$="N") OR (S$="n") THEN 4600 ELSE 4570
600 CLS:PRINT"el valor del voltaje minimo v1 es" + STR$(V1)
610 INPUT"quieres cambiar v1 s/n";S$
620 IF (S$="S") OR (S$="s") THEN 3270 ELSE 4630
630 IF (S$="N") OR (S$="n") THEN 4640 ELSE 4610
640 CLS:PRINT"el valor del voltaje maximo v2 es" + STR$(V2)

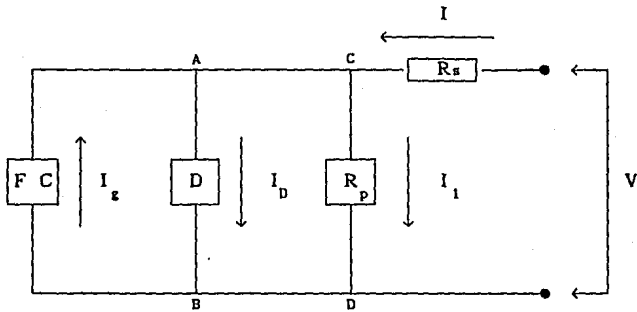
```

```
550 INPUT"quieres cambiar v2 s/n";S$
660 IF (S$="S") OR (S$="s") THEN 3300 ELSE 4670
670 IF (S$="N") OR (S$="n") THEN 4680 ELSE 4650
680 CLS:PRINT"el valor del tiempo T es" + STR$(T)
690 INPUT"quieres cambiar w s/n";S$
700 IF (S$="S") OR (S$="s") THEN 3340 ELSE 4710
710 IF (S$="N") OR (S$="n") THEN 3370 ELSE 4690
720 '***** FINAL *****
730 CLS:PRINT"FIN DE LAS MEDICIONES"
740 END
```

APENDICE B

CIRCUITO ELECTRICO EQUIVALENTE DEL FOTODIODO, DIODO COMERCIAL y LED.

El circuito equivalente para un dispositivo semiconductor de los arriba mencionados se presenta en la siguiente figura, así como su resolución.



F C Fuente de corriente.

I Corriente a través del dispositivo.

D Dispositivo ideal.

I_1 Corriente a través de R_p

R_p Resistencia en serie.

I_g Corriente de generación.

R_s Resistencia en paralelo.

I_D Corriente a través del dispositivo ideal.

V Voltaje aplicado.

La figura anterior representa el circuito de corriente directa equivalente más general para un dispositivo semiconductor.

Para resolver el circuito anterior, utilizaremos las siguientes ecuaciones:

$$1) V_D = V_{AB} = V_{CD} = V - I R_s \quad , (B1)$$

$$2) I_1 = \frac{V}{R_p} - \frac{I R_s}{R_p} \quad , (B2)$$

$$3) I = I_1 + I_D - I_g \quad , (B3)$$

$$4) I_D = I_0 \left(\exp \left(\frac{e V_D}{n k T} \right) - 1 \right) \quad , (B4)$$

donde n es número que toma valores entre uno y dos.

Sustituyendo (B1) en (B4) y el resultado lo sustituimos junto con (B2) en (B3) y si se factoriza I , entonces la ecuación resultante será:

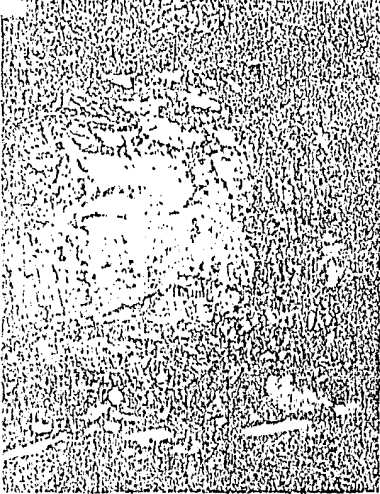
$$I = \frac{I_0 \left(\exp \left(\frac{e (V - I R_s)}{n k T} \right) - 1 \right) + \frac{V}{R_p} - I_g}{1 + \frac{R_s}{R_p}} \quad . (B5)$$

La ecuación (B5) da las características corriente-voltaje para un fotodiodo, si I_g se hace cero la ecuación resultante, rige el comportamiento de un diodo comercial y para un rango menor de voltajes a los LED.

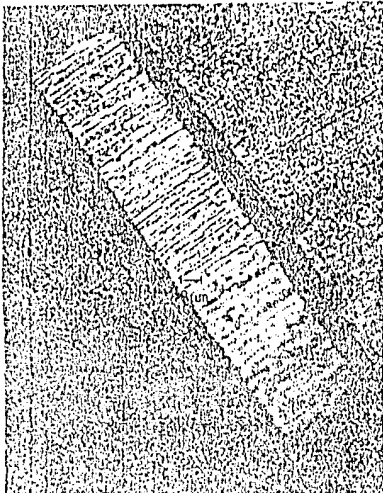
APENDICE C

MEDICION DE PARAMETROS CARACTERISTICOS DE LOS DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES

i) Diodo comercial



En esta fotografía se puede observar el área de la unión en el diodo comercial, cada lado mide $925 \pm 109 \mu\text{m}$ y el área mide $0.855 \pm .202 \text{ mm}^2$. La marca que aparece en la fotografía mide $50 \mu\text{m}$.

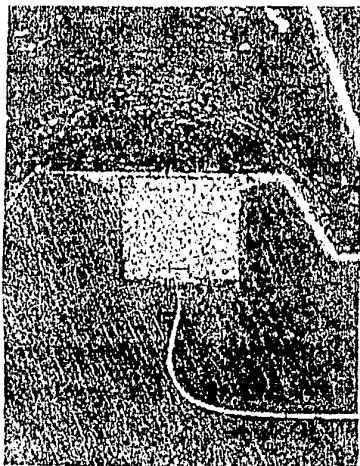


En esta fotografía se observan las dimensiones de la unión, el ancho de la unión tiene un valor de $225 \pm 21.9 \mu\text{m}$ y el largo es de $925 \pm 109 \mu\text{m}$.

ii)LED



En esta fotografía se puede observar las dimensiones de los lados y el área de la unión de un LED, se puede apreciar que un lado es un poco mayor que el otro, la magnitud del lado más grande es de $287 \pm 29.7 \mu\text{m}$ y la del menor de $275 \pm 28 \mu\text{m}$, de aquí que el área sea de $0.079 \pm 0.016 \text{ mm}^2$.



En esta fotografía se puede observar el ancho de la unión en un LED, el cual tiene una magnitud de $275 \pm 28 \mu\text{m}$.