

22
24



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
CAMPUS ARAGÓN

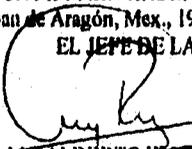
UNIDAD ACADÉMICA

Ing. RAÚL BARRÓN VERA
Jefe de la Carrera de Ingeniería
Mecánica Eléctrica,
Presente.

En atención a la solicitud de fecha 18 de septiembre del año en curso, por la que se comunica que el alumno HEBERTO GÓMEZ POZOS, de la carrera de Ingeniero Mecánico Electricista, ha concluido su trabajo de investigación intitulado "ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS CORRIENTE-VOLTAJE Y DE INTENSIDAD LUMINOSA-LONGITUD DE ONDA PARA DIODOS EMISORES DE LUZ DE ARSENIURO DE GALIO OBTENIDOS POR LA TÉCNICA DE DEPOSITO QUÍMICO EN FASE VAPOR USANDO COMPUESTOS ORGANOMETÁLICOS", y como el mismo ha sido revisado y aprobado por usted se autoriza su impresión; así como la iniciación de los trámites correspondientes para la celebración del examen profesional.

Sin otro particular, le reitero las seguridades de mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
San Juan de Aragón, Mex., 19 de septiembre de 1996.
EL JEFE DE LA UNIDAD


LIC. ALBERTO BARRA ROSAS

c e p Asesor de Tesis.
c e p Interesado.

AIR/lla.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 esta 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.

Agradecimientos.

Al pueblo mexicano que gracias a el existen las instituciones publicas.

A la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO por darme la oportunidad de realizar estudios superiores.

Al INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL por hacer uso de sus laboratorios.

A los profesores por su noble tarea de enseñar.

A mis padres por darme todo.

A mis Hermanos por apoyarme siempre.

Al Dr. Ramón Peña S. por su ayuda siempre desinteresada.

**El que piensa que todas las
peras maduran al mismo
tiempo no sabe nada acerca de
las frutillas.**

Anonimo

**ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS CORRIENTE CONTRA VOLTAJE E
INTENSIDAD LUMINOSA CONTRA LONGITUD DE ONDA EN LOS DIODOS
DE ARSENIURO DE GALIO FABRICADOS POR LA TÉCNICA DE DEPÓSITO
QUÍMICO EN FASE VAPOR USANDO COMPUESTOS ORGANOMETÁLICOS.**

Índice

Página

Introducción general del trabajo.....1

CAPÍTULO 1 ASPECTOS TEÓRICOS DE LA UNIÓN p-n.

1.1	Introducción.....	3
1.2	Clasificación de materiales.....	3
1.3	Materiales semiconductores intrínsecos.....	8
1.4	Materiales semiconductores extrínsecos.....	10
1.4.1	Semiconductor tipo-n.....	10
1.4.2	Semiconductor tipo-p.....	12
1.4.3	Comportamiento de los semiconductores extrínsecos con respecto a la temperatura.....	12
1.5	El diodo de unión p-n.....	14
1.5.1	Generalidades.....	14
1.6	Unión p-n en condiciones de polarización.....	18
1.6.1	Polarización directa.....	18
1.6.2	Polarización inversa.....	20
1.7	Ecuación del diodo de unión p-n ideal.....	21
1.7.1	Efecto de la temperatura de operación en el diodo de unión ideal.....	24
1.8	Comportamiento del diodo real.....	24
1.9	Corriente túnel.....	28
1.10	Electroluminiscencia.....	30
1.11	Estructuras típicas para los LED's.....	33

CAPÍTULO 2 ASPECTOS GENERALES DE LAS UNIONES p-n.

2.1	Introducción.....	36
2.2	Tipos o formas de LED's.....	36
2.3	Selección de materiales.....	39
2.4	Técnicas de fabricación de diodos emisores de luz.....	40
2.5	Algunas aplicaciones.....	42

CAPÍTULO 3 FABRICACIÓN DE UNIONES p-n.

3.1	Introducción.....	46
3.2	Descripción de las técnicas de fabricación.....	48
3.2.1	Técnica de Epitaxia en Fase Líquida (LPE).....	48
3.2.2	Técnica de Epitaxia en Fase Vapor (VPE).....	49
3.2.3	Técnica de Epitaxia por haces moleculares (MBE).....	49
3.2.4	Técnica de Depósito de Vapor Químico usando Organometálicos (MOCVD).....	49

3.3	Obtención de películas epitaxiales.....	51
3.3.1	Sistema para depósito de películas de Arseniuro de Galio (GaAs) por MOCVD.....	53
3.3.1.1	Unidad de control de gases.....	54
3.3.1.2	Reactor.....	59
3.3.1.3	Unidad de calentamiento.....	59
3.3.1.4	Unidad de desalajo de gases.....	59
3.4	Crecimiento de películas p-n de GaAs.....	59
3.5	Crecimiento de uniones p-n de GaAs.....	60

CAPÍTULO 4 CARACTERIZACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS UNIONES p-n OBTENIDAS.

4.1	Introducción.....	62
4.2	Métodos de caracterización.....	63
4.3	Característica Corriente - Voltaje - Temperatura (I - V - T).....	63
4.3.1	Resultados.....	65
4.4	Característica Intensidad Luminosa - Longitud de onda ($I_{lum} - \lambda$).....	73
4.4.1	Resultados.....	75
4.5	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	78
4.5.1	Introducción.....	78
4.5.2	Característica I - V - T.....	78
4.5.2.1	Polarización directa (V_D).....	78
4.5.2.1.1	Voltaje de encendido (V).....	78
4.5.2.1.2	Corriente de saturación (I_{sat}).....	80
4.5.2.1.3	Factor de idealidad (n).....	81
4.5.2.1.4	Mecanismos de conducción.....	81
4.5.2.1.5	Resistencia serie (R_s).....	82
4.5.2.2	Polarización inversa (V_{inv}).....	83
4.5.2.2.1	Voltaje de ruptura (V_R).....	83
4.5.2.3	Efecto de temperaturas bajas.....	84
4.5.2.3.1	Polarización directa.....	84
4.5.2.3.2	Polarización inversa.....	85
4.5.3	Característica $I_{lum} - \lambda$.....	85
4.5.3.1	Espectros de emisión.....	86
4.5.3.2	Análisis de la característica I_{lum} contra λ.....	87
	CONCLUSIONES.....	89
	Lista de abreviaciones.....	91

Introducción general del trabajo.

La importancia del estudio de los diodos electroluminiscentes es debido a su gran aplicación en diferentes campos como son: equipos de medición, monitoreo, comunicación, control, etc.

Los diodos electroluminiscentes tienen una amplia gama de usos porque:

- Pueden emitir en diferentes colores, lo cual pueden servir para diferenciar entre un estado y otro de algún parámetro de un equipo.
- Algunos diodos electroluminiscentes pueden emitir en el intervalo de la luz infrarroja. Estos pueden servir como actuadores a distancia, o en lugares donde se requiere una conmutación aislada por la peligrosidad de algún sitio determinado.
- Por su velocidad alta de conmutación, algunos de ellos pueden servir como transmisores de conmutación digital, también como elementos sensores (lecturas de tareas de datos).

El presente trabajo es parte de un proyecto que tiene por objeto el desarrollo de dispositivos optoelectrónicos a base de semiconductores compuestos del grupo III - V de la tabla periódica.

En particular se trabaja con diodos electroluminiscentes de Arseniuro de Galio (GaAs) cuya emisión se sitúa precisamente en la región infrarroja. Existen diferentes técnicas para construir estos diodos. Los que se reportan en este trabajo, se construirán con la técnica de depósito químico en fase vapor con organometálicos. En la literatura se hace referencia a esta técnica por el acrónimo en inglés de Metalorganic Chemical Vapor Deposition (MOCVD). Igual que para los diodos electroluminiscentes, utilizaremos la abreviatura LED proveniente de Light Emitting Diode.

La técnica que se empleará para construir los LED's se ha desarrollado completamente en la Sección de Electrónica del Estado Sólido (S.E.E.S.) Ingeniería Eléctrica (I.E.) Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IP.N.). Hasta ahora no se ha hecho un trabajo sistemático en su aplicación a dispositivos. Este trabajo es uno de los procesos involucrados en la fabricación de LED, en particular de uniones p-n.

De entre los procesos críticos involucrados en la fabricación de estructuras completas de uniones p-n podemos mencionar.

- Obtención de la unión metalúrgica.
- Selección apropiada y control de los niveles de impurificación de las capas n y p que forman a la unión.
- Obtención de los contactos óhmicos; esto implica seleccionar apropiadamente a la aleación y las temperaturas apropiadas para formar la aleación GaAs-Metal.

El estudio de las uniones p-n se basará en la medición de las características Corriente - Voltaje (I - V) e Intensidad luminosa - Longitud de onda ($I_{lum} - \lambda$) (respuesta espectral). Todo ello con objeto de relacionarlos con los procesos de fabricación. El método de

medición se basa en la aplicación de un voltaje llamado de polarización en los extremos de la unión p-n y observar como depende la corriente a través de él.

Una vez medidas las características en las uniones p-n, estas se habrán de correlacionar con los procesos empleados en la fabricación de las uniones. Esto permitirá; primero demostrar la utilidad de la técnica para hacer LED's y en segundo término contribuir en la optimización de los procedimientos de obtención de estructuras.

En síntesis los objetivos que se plantean en este trabajo son:

- 1.- Realizar uniones p-n con la técnica (MOCVD).
- 2.- Medir las características I - V - T y $I_{lum} - \lambda$.
- 3.- Identificar los posibles problemas durante el proceso de fabricación de la unión p-n, y recomendar las soluciones apropiadas.

Debido a que los conceptos y herramientas teóricas que se requiere para abordar las diferentes temas que se involucran en el desarrollo del presente no son comunes, el material que se incluye en los capítulos primeros se pretende dar los antecedentes necesarios para comprender e interpretar los diferentes resultados experimentales.

De este modo el material que contiene esta tesis esta organizada de la forma siguiente.

En el capítulo 1 se presentan los aspectos teóricos básicos sobre el comportamiento del diodo ideal y se discutirán las desviaciones que se observan en un diodo real. También se discutirán las características de la respuesta de electroluminiscencia, en estructuras típicas.

En el capítulo 2 se presentan las formas típicas de los LED's, los criterios de selección de materiales, las técnicas de fabricación y se presentarán algunas de las aplicaciones.

En el capítulo 3 se presenta el proceso de fabricación de los LED's por la técnica de MOCVD previamente se verán las tres principales técnicas de fabricación que más se usan y se hará una diferenciación sobre las ventajas y desventajas de cada una de ellas.

En el capítulo 4 se presentan los métodos utilizados para caracterizar a los LED's, se presentarán los resultados de las mediciones y se hará una discusión sobre los mismos.

En el capítulo último se darán las conclusiones generales del estudio realizado y las recomendaciones pertinentes para los trabajos que se harán más adelante.

CAPÍTULO I

ASPECTOS TEÓRICOS

- 1.1) INTRODUCCIÓN.**
- 1.2) CLASIFICACIÓN DE MATERIALES.**
- 1.3) MATERIALES SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS.**
- 1.4) MATERIALES SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS.**
 - 1.4.1) Semiconductor tipo n.**
 - 1.4.2) Semiconductor tipo p.**
 - 1.4.3) Comportamiento de los semiconductores extrínsecos con respecto a la temperatura.**
- 1.5) EL DIODO DE UNIÓN P-N.**
 - 1.5.1) Generalidades.**
- 1.6) UNIÓN P-N EN CONDICIONES DE POLARIZACIÓN.**
 - 1.6.1) Polarización directa.**
 - 1.6.2) Polarización inversa.**
- 1.7) ECUACIÓN DEL DIODO DE UNIÓN P-N IDEAL.**
 - 1.7.1) Efecto de la temperatura de operación en el diodo de unión ideal.**
- 1.8) COMPORTAMIENTO DEL DIODO REAL.**
- 1.9) CORRIENTE TÚNEL.**
- 1.10) ELECTROLUMINISCENCIA.**
- 1.11) ESTRUCTURAS TÍPICAS PARA LOS LED'S.**

1.1) INTRODUCCIÓN.

El conocimiento del funcionamiento del diodo de unión p-n es una base para conocer el funcionamiento de otros dispositivos mas complejos (como transistores, triac's, etc.). Previamente a esto se necesitan conocer las características propias de los materiales que se usan para fabricar estos dispositivos electrónicos. En estos materiales es posible cambiar su conductividad introduciendo deliberadamente una determinada impureza, a estos materiales se les llama semiconductores. En este capítulo se hará una clasificación de los materiales por medio de su conductividad, luego centrando el interés específicamente en los semiconductores, las diferentes propiedades que tienen separadamente y formando parte de un dispositivos como un todo, esto siempre con apoyo de ecuaciones como las leyes de las funciones de distribución, estadísticas, la ecuación de continuidad, etc.

1.2) CLASIFICACIÓN DE MATERIALES.

Una clasificación general de los materiales se hace por medio del valor de su resistividad (ρ) ó conductividad ($\sigma = 1/\rho$) estos son los conductores, aislantes y un grupo intermedio de los dos primeros y de gran importancia que son los semiconductores.

Una forma sencilla de entender esta clasificación es a través del tipo de enlace químico que tienen los materiales. En los conductores, el enlace químico se conoce como enlace metálico, los electrones de la última capa de valencia están débilmente ligados a sus

átomos, entonces, pueden transferirse de un átomo a otro con suma facilidad, esto se considera como un gas de electrones y con un campo eléctrico pequeño aplicado se puede establecer una corriente eléctrica. Contrariamente, en los aislantes por el tipo de enlace entre sus átomos, la mayoría de sus electrones permanecen unidos a sus átomos, y para que haya conducción eléctrica se necesitará de un campo eléctrico muy intenso (cerca de 10^5 [volts/cm]). La resistividad de los aislantes buenos como el cuarzo es de aproximadamente 10^{12} [Ω -cm] que es demasiado grande en comparación con los metales que esta entre de 10^3 y 10^6 [Ω -cm].

Los semiconductores están en un término medio y su conductividad depende fuertemente de la temperatura, a temperatura ambiente (300 [Kelvin]) su resistividad va desde 10^3 hasta 10^5 [Ω -cm].

El coeficiente de la resistividad con respecto a la temperatura es negativo, con lo cual a temperaturas altas la resistividad disminuye y a bajas aumenta, (contrariamente a lo que sucede en los metales). Los semiconductores mas conocidos son el germanio (Ge), el silicio (Si) y el arseniuro de galio (GaAs), la característica común de estos es que su enlace es covalente, o lo que es lo mismo comparten sus electrones.

Los átomos que conforman un cristal (un cristal es un conjunto de átomos ordenados periódicamente) están todos colocados en una forma ordenada y periódica. Su formación depende de la función de probabilidad de la mezcla de sus ultimas órbitas (sp), esto hace que los átomos se acomoden, entre ellos mismos, de una cierta manera y que es característico de cada material. Por ejemplo el silicio (Si), el germanio (Ge) y el carbono (C) cristalizan en una estructura llamada diamante. El arseniuro de galio (GaAs) tiene una estructura equivalente con la diferencia de que esta conformado por 2 distintos átomos y se le llama zincblenda figura 1.1.

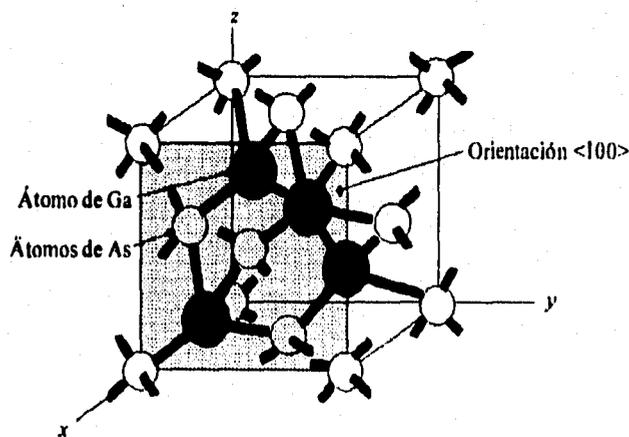


Fig. 1.1.- Estructura atómica del GaAs llamada zincblenda¹.

En la figura 1.1 se observa la celda unitaria o arreglo elemental de átomos del GaAs, cada átomo de Ga esta enlazado con cuatro átomos de As y cada átomo de As esta enlazado con cuatro átomos de Ga.

Otra manera de explicar las diferencias que existen entre los materiales, es utilizando el modelo de bandas de energía, que es un resultado de la aplicación de la mecánica cuántica a los sólidos. Teóricamente la estructuras de bandas se obtienen de la solución de la ecuación de Schrodinger. La solución es la relación energía-momentum (E-K) de los portadores en el sólido.

Una diferencia entre la física clásica y la física cuántica es que la primera presupone que todo sistema, como podría ser una molécula puede tomar o absorber energía continuamente, contrariamente, la mecánica cuántica presupone que los sistemas absorben energía solamente en valores discretos.

Así como en un átomo aislado se tienen estados permitidos de energía que puede ocupar el electrón, en los sólidos se pueden representar bandas de energía consistentes en estados energéticos bien definidos que pueden ser ocupados por electrones.

A un mismo nivel energético le corresponden varios números cuánticos, para el caso de un electrón en una molécula un estado cuántico solo puede ser ocupado por un electrón, esto constituye el principio de exclusión de Pauli.

Un estado energético esta definido por 4 números cuánticos que son: el valor de su energía total (n) o número que define el nivel energético del átomo, el número cuántico de impulso angular (l) determina (en el contexto del modelo de Bohr) la forma de la órbita si es circular o elíptica, número cuántico magnético (m) indica la orientación del plano de la órbita con respecto al plano x, y , y el espín (s) que indica en que sentido gira el electrón, todas estas interpretaciones geométricas solo tienen sentido en el modelo de Bohr y no deben de tomarse en serio, puesto que la materia en dimensiones atómicas se comporta de diferente manera a como uno la percibe.

Sin entrar al desarrollo matemático de la mecánica cuántica, para comprender el modelo de bandas consideremos la formación de un sólido (ver figura 1.2), inicialmente supondremos que los átomos están separados por una distancia suficientemente grande tal que no intercalan entre si, sus estados energéticos estarán perfectamente bien definidos. Al irlos acercando ó al hacer la distancia interatómica más pequeña, los niveles de energía empiezan a separarse o desplegarse, esto debido a que comienzan a intercalar las funciones de onda de los últimos niveles energéticos de los átomos y a su vez a deformarse. Si a distancias infinitas mantienen sus estados, la subcapa $l = 0$ esta llena (2 estados con 2 electrones). Si N indica la cantidad de átomos por unidad de volumen del sólido, en la subcapa $l = 0$ habrá $2N$ estados y $2N$ electrones. La subcapa $l = 1$ esta incompleta hay $6N$ estados y $2N$ electrones, estando desocupados entonces $4N$ estados. Al fundirse esas dos subcapas por efecto del acercamiento, los estados y electrones se sumarán quedando $8N$ estados y 4 electrones, en una misma banda energética.

Reduciendo aún mas la distancia interatómica, los niveles se empiezan a dividir formando dos bandas, separadas por una zona energética que es una medida de la magnitud de la interacción. Idealmente en esta zona no hay ningún estado disponible, a esta zona se le conoce como ancho de banda o banda prohibida (E_g). El comportamiento de las bandas con separaciones menores de la separación real coincide adecuadamente a cálculos teóricos. De las bandas desdobladas la banda inferior quedo con $4N$ estados ocupados y en la banda superior quedo con $4N$ estados desocupados. A la banda superior se le llama banda de conducción (E_c), a la banda de energía inferior se le llama banda de valencia (E_v), en referencia a los electrones que forman el enlace químico.

Por último a distancias menores de la separación real podríamos suponer que la banda E_g aumente y que la energía mínima de equilibrio de los átomos correspondería al mínimo de la curva. En este punto se podría esperar la máxima estabilidad de los átomos pero a esta distancia los núcleos por el efecto de sus potenciales electrostáticos se repelen, entonces el nivel más estable de energía de los átomos se coloca un poco más a la derecha del mínimo de la curva figura 1.2 (zona donde dice región más probable para la formación de los materiales semiconductores).

De acuerdo a lo anterior se puede hacer una clasificación de los materiales por medio de su conductividad y en base al valor de la banda de energía ó ancho de la banda.

En los metales estas dos bandas están mezcladas ($E_g = 0$), en estos materiales cada átomo proporciona un electrón casi libre, y si por lo general en un metal tienen 10^{22} átomos por cm^3 , entonces habrá 10^{22} electrones para el proceso de conducción. Al aplicar una pequeña diferencia de potencial en los extremos del metal (más de 0.025 [volts]), los electrones podrán moverse en la dirección positiva del campo eléctrico aplicado.

Al movimiento de los electrones, resultado de la aplicación de un campo eléctrico, se le llama corriente de arrastre dada por la relación $I_{\text{arrastre}} = qnV$, donde q es la carga del electrón, μ la movilidad de electrones, n la concentración de electrones libres en el material y V voltaje aplicado.

En los aislantes, como el diamante ó el cuarzo, sus bandas están muy separadas entre sí, su E_g es muy grande (típico 7 [electrónVolts]). Para que exista movimiento resultante de electrones, estos necesitan ganar una energía mínima igual a E_g , esta energía la pueden ganar por medio de calor (energía térmica, la cual a temperatura ambiente 300 [Kelvin] es igual a $kT = 0.025$ [electrónVolts], donde k es la constante de Boltzmann 8.62×10^{-5} [electrónVolt/Kelvin] y T la temperatura [Kelvin]). Así antes que los electrones ganen esta energía el material cambiaría sus propiedades como aislante (si $kT = 7$ [electrónVolts] la temperatura tiene que ser 81210 [Kelvin]), por lo cual es difícil tener conducción en los aislantes.

En los semiconductores las bandas de valencia y de conducción no están ni muy cerca ni muy separadas (E_g de aproximadamente 1 [electrónVolt]), a temperaturas ambientales algunos electrones pueden saltar a la banda de conducción figura 1.2.

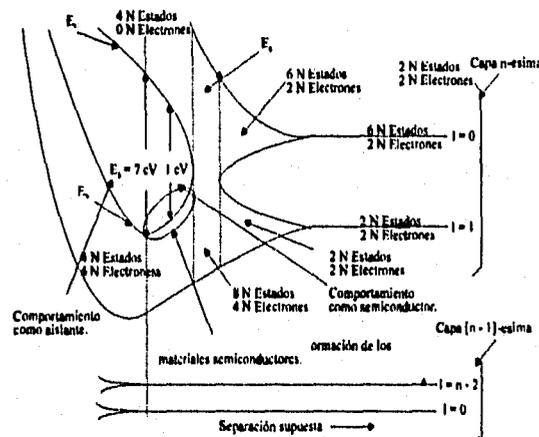


Fig. 1.2.- Formación de las bandas de energía de los niveles atómicos del silicio².

Como mencionamos al inicio de este capítulo la introducción deliberada de un tipo determinado de impurezas cambia el tipo de conductividad del material, estas impurezas introducen niveles permitidos en la banda prohibida (como 0.006 [electrónVolts] para el Estaño, 0.0059 [electrónVolts] para el Selenio, 0.023 [electrónVolts] para el Litio, etc. todos estos niveles se encuentran en la banda prohibida del GaAs) y como veremos en el punto 2.3, a temperatura ambiente están todas ionizadas.

Contando con el modelo de las bandas de energía, que describe apropiadamente el comportamiento de los sólidos, resta por aclarar (o discernir) la forma en que se distribuyen los electrones en los estados energéticos. Para ello se hace uso de herramientas estadísticas por la cantidad de elementos que se manejan.

Dadas las características de los electrones y el valor de su espín, se emplea la función de distribución de Fermi-Dirac³ que es aplicada a partículas idénticas e indistinguibles, se caracterizan por tener un espín semientero y obedecen el principio de exclusión de Pauli. Las otras dos funciones de distribución más conocidas, por mencionarlas son las de Maxwell-Boltzmann⁴, que es aplicada a partículas idénticas y distinguibles como las moléculas de cualquier gas ideal, y la de Bose-Einstein⁵, que no obedecen al principio de exclusión de Pauli y tienen espín entero.

La distribución de probabilidad de Fermi-Dirac esta dada por:

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_f)/kT} + 1} \quad [\text{adimensional}] \quad (1.1)$$

obtenida de la mecánica estadística⁶ esta nos da la probabilidad de ocupación de estados en un determinado intervalo de energía, $E - E_f$ es el rango de energía en estudio, E_f es la energía de Fermi. De modo práctico, la energía de Fermi ó nivel de Fermi es una referencia que nos permite conocer el grado ó índice de ocupación de las bandas de conducción y de valencia. A 0 [Kelvin] separa los niveles ocupados de los vacíos. Esta ecuación nos da la

probabilidad que tienen los electrones de ocupar un nivel de energía y depende de la temperatura que tiene el sistema (kT). Analizando 3 casos: 1) Si $E = E_f$ y T es mayor a 0 [Kelvin], los estados con la energía de Fermi tienen el 50 % de probabilidad de ser ocupados $f(E) = 1/2$. 2) Si $E > E_f$ y $T = 0$ [Kelvin] todos los estados tienen una probabilidad nula de ser ocupados y 3) Si $E < E_f$ y $T \rightarrow \infty$ todos los estados pueden ser ocupados.

Para calcular el número de electrones (n_o) con energía entre un intervalo $E + dE$, en la banda de conducción, a una temperatura T se parte de la ecuación siguiente⁷.

$$n_o = \int_{E_c}^{\infty} f(E)N(E)dE \quad [\text{electrones/cm}^3] \quad (1.2)$$

donde $N(E)$ es la densidad de estados efectivos⁸.

$$N(E) = M_c \frac{\sqrt{2} (E - E_c)^{1/2}}{\pi^2 \hbar^3} (m_e^*)^{3/2} \quad [\text{estados/cm}^3] \quad (1.3)$$

$f(E)$ es la función de distribución de Fermi-Dirac (ecuación 1.1), m_e^* es la masa efectiva de los electrones y M_c es el número de mínimos equivalentes en la banda de conducción y $N(E)dE$ es la densidad de estados en la banda de conducción. La integral se desarrolla desde el fondo de la banda (E_c) hasta su techo (ver figura 1.2).

Para el caso de los huecos la integral va desde el fondo hasta el máximo de la banda de valencia, o sea $p_o = \int_{E_v}^{E_c} f_p(E)N(E)dE$ y $n_o = \int_{E_c}^{E_v} f_e(E)N(E)dE$, en el caso de que $n_o = p_o$ entonces $f_p(E) = (1 - f_e(E))$, donde $f_p(E)$ es la función de distribución de probabilidad de huecos y $f_e(E)$ la de los electrones. La función de distribución de los huecos es análoga para los electrones, si se cuenta la energía de los huecos desde el nivel de Fermi pero en sentido opuesto.

1.3) MATERIALES SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS.

Si el semiconductor es intrínseco o puro, esto es no contiene ningún tipo impurificante, entonces a temperaturas mayores a 0 [Kelvin] se crean huecos y electrones en la misma cantidad, la ubicación del nivel de Fermi para un semiconductor intrínseco depende de la temperatura y masas efectivas de acuerdo a la ecuación 1.4.

$$E_f = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3kT}{4} \ln \left(\frac{m_h^*}{m_e^* M_c^{2/3}} \right) \quad [\text{electrónVolts}] \quad (1.4)$$

A este nivel también se le conoce como nivel intrínseco. En la ecuación (1.4) m_h^* y m_e^* son las masas efectivas de los huecos y electrones respectivamente. Prácticamente se toma solo el primer término de la derecha, esto es por que el segundo término es despreciable, por lo tanto se ubicará en la mitad de la banda prohibida. En la figura 1.3 mostramos la ubicación del nivel de Fermi en la banda prohibida, la gráfica de la función de Fermi-Dirac y la densidad de portadores de carga generados térmicamente.

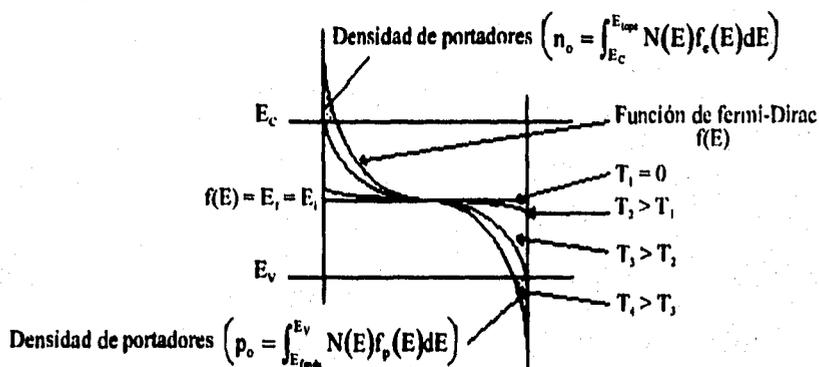


Fig. 1.3.- Gráfica de densidad de estados multiplicada por la función de distribución de Fermi-Dirac.

En la figura 1.3 las áreas sombreadas muestran el porcentaje probabilístico de estados ocupados n_o y desocupados p_o (ecuación 1.2).

A una temperatura constante el material tiene una cierta energía térmica, por lo consecuente se están rompiendo enlaces covalentes ó generando pares electrón-hueco $G_{ih}(T)$ en la misma cantidad se están restableciendo los enlaces ó recombinando $R_{ir}(n_o, p_o, T)$. En equilibrio térmico $G_{ih}(T) = R_{ir}(n_o, p_o, T)^9$, donde R_{ir} es una constante que iguala el término de generación con el de recombinación.

En un semiconductor intrínseco $n_o = p_o = n_i$, donde n_i es la densidad de portadores intrínsecos. Una relación importante que relaciona a n_i con la densidad efectiva de estados en la banda de conducción y en la banda valencia es la siguiente:

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-E_g/2kT} \text{ [portadores intrínsecos/cm}^3\text{]} \quad (1.5)$$

Donde N_c y N_v son la densidad de estados en la banda de conducción y valencia respectivamente⁹. n_i depende de las masas efectivas, de E_g y de la temperatura T . La ecuación (5) nos da la cantidad de portadores de carga en un semiconductor intrínseco.

En cualquier material se tienen aproximadamente 10^{22} [átomos/cm³], en un metal su banda prohibida $E_g = 0$, en un aislante E_g es típicamente 6 [electrónVolt] y de 1 [electrónVolt] en un semiconductor. Con estos valores se calcula la probabilidad de estados ocupados en la banda de conducción, susituyendo estos valores y a temperatura ambiente nos dará, para un aislante aproximadamente n_i de 1.79×10^6 [electrones/cm³] por lo tanto una probabilidad de casi 0 %. En un metal como se traslapan las bandas, se tiene que el número de portadores es casi igual a su número de átomos por [cm³] probabilidad de casi 100 %, en un semiconductor y en un aislante estas bandas están separadas y la probabilidad de encontrar portadores de carga va disminuyendo conforme aumenta su E_g , con una diferencia pequeña de E_g que se encuentre en estos materiales es suficiente para encontrar una diferencia de portadores de carga o intrínsecos por varias décadas de cantidad (de 1 a 10 décadas).

1.4) MATERIALES SEMICONDUCTORES EXTRÍNECOS.

Como mencionamos anteriormente un semiconductor intrínseco es aquel que no contiene átomos extraños ó impurezas. La cantidad de electrones es la misma que la de huecos. A los materiales que contienen impurezas se les denomina semiconductores extrínsecos¹⁰.

La cantidad de impurezas introducidas N_i [impurezas/cm³] (donde N_i puede ser N_D o N_A) debe de ser baja en comparación con la densidad de átomos/cm³ del cristal, normalmente ésta es de una diferencia de 10^6 , con esto se asegura que las características cristalinas del material no cambien. Si N_D o N_A es menor a la densidad de átomos del cristal átomos/cm³, se estará hablando de semiconductor extrínseco no degenerado¹¹. Sin embargo habrá un cambio importante en su conductividad debido a que N_D o N_A es mayor que n_i y que cada átomo de impureza aporta un portador, que son los llamados portadores mayoritarios. Conviene adelantar que si las impurezas son donadoras, entonces se utiliza el subíndice D, siendo N_D la concentración de impurezas donadoras y para impurezasceptoras tendremos N_A .

1.4.1) Semiconductor tipo n.

Consideremos al semiconductor compuesto por GaAs. En él, la introducción de átomos con 4 electrones de valencia (tetraivalente) como el Si en lugares sustitucionales antes ocupados por el Galio (Ga), provocará niveles de energía dentro de la banda prohibida cercanos al borde de la banda de conducción.

Por cada átomo introducido habrá, a temperatura ambiente, un electrón en tal banda, a estos átomos se les conoce como impurezas donadoras y se les designa por N_D . Una manera de calcular los niveles de energía para estas impurezas es por medio del modelo de Bohr para el átomo hidrogenoide, considerando que las impurezas donoras se comportan como un átomo de hidrógeno o sea un átomo de una sola órbita con un solo electrón, debido al apantallamiento de los protones por los electrones que están ubicados en órbitas más internas. Con este modelo la energía de ionización se obtiene de¹².

$$E_i = -13.6 \left(\frac{m^*}{m_0} \right) \left(\frac{e_0}{\epsilon_0} \right)^2 \quad \text{[electrónVolt]} \quad (1.6)$$

El signo menos significa que la energía es de atracción. Para el GaAs su constante dieléctrica ($\epsilon_0 \epsilon_r$) es de 13.18 [electrónVolt]. La masa efectiva de los electrones m^* para el GaAs es de $0.067 \times m_0$, donde m_0 es la masa del electrón en vacío. En la ecuación (1.6) el valor de 13.6 [electrónVolts] es la energía de ionización del hidrógeno.

La energía de ionización de la impureza E_D se obtiene al sustituir estas constantes. Para el caso del átomo de estaño nos da una energía de ionización en su órbita más probable, de 0.06 [electrónVolts], que se ubica abajo de la banda de conducción E_c del GaAs. $E_c = E_D = E_i - 0.06$ [electrónVolts], comparando este valor con la energía térmica a temperatura ambiente $kT = 0.025$ [electrónVolt], podemos concluir que gran parte de las impurezas estarán ionizadas.

Entonces una característica de las impurezas de los elementos del grupo V es que pueden aportar un electrón que quedara débilmente ligado a temperatura próxima a la ambiente.

El Nivel de Fermi para un semiconductor extrínseco tipo n cambiara de posición en la banda prohibida estando ahora ligeramente debajo de la banda de conducción, esa posición nueva E_D se puede calcular por:

$$E_D = E_C - kT \ln \left(\frac{N_C}{N_D} \right) \quad (1.7)$$

La concentración de impurezas ionizadas se calcula por la relación¹³.

$$N_D^+ = N_D \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \exp \left(\frac{E_D - E_f}{kT} \right)} \right] \quad (1.8)$$

De otra manera la concentración de electrones para un semiconductor tipo n, resolviendo (1.2) para el nivel de Fermi donador E_D queda como.

$$n_o = N_C \exp \left(- \frac{E_C - E_D}{kT} \right) \quad (1.9)$$

El diagrama de bandas para un semiconductor tipo-n se representa en la figura siguiente.

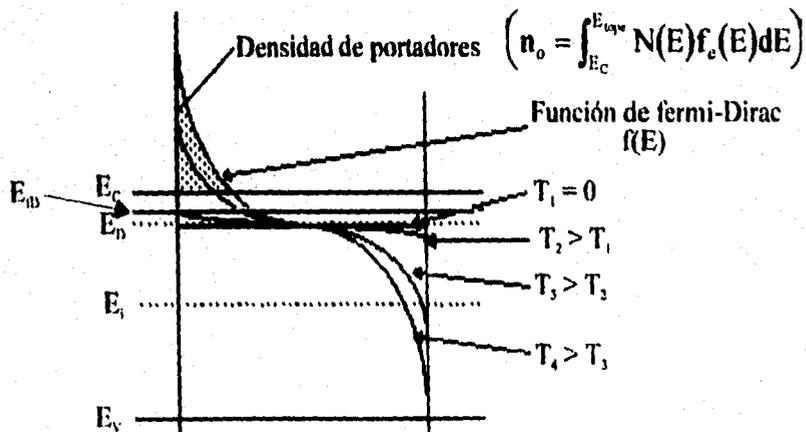


Fig. 1.4.- Diagrama de bandas para un semiconductor tipo n.

1.4.2) Semiconductor tipo p.

Ahora si al material base se le añaden átomos del grupo III los cuales tienen solo 3 electrones de valencia (trivalentes), como el zinc (Zn) contrariamente a lo anterior habrá una deficiencia de electrones, o bien aportará un hueco al proceso de conducción, a estos átomos se les conoce como impurezasceptoras y se les designa por N_A . A diferencia del caso anterior, los niveles se les representa cerca de la banda de valencia.

Al nivel energético más probable se designa como nivel aceptor (E_A). Las ecuaciones expuestas anteriormente se aplicarán de la misma forma con la diferencia que la masa efectiva será la del hueco. Este hueco se comportará de igual manera que un electrón pero su carga es positiva. Igualmente que en el caso anterior para que el material se vuelva tipo p se necesita de la condición: $N_A \gg n_i$, en este caso el material será extrínseco tipo p.

El nivel de Fermi para un semiconductor extrínseco tipo p.

$$E_{fA} = E_V + kT \ln \left(\frac{N_V}{N_A} \right) \quad (1.10)$$

A temperatura ambiente la mayoría de las impurezas están ionizadas, igual que en el caso del semiconductor tipo n, la relación que lo justifica es:

$$N_A^- = N_A \left[1 - \frac{N_A}{1 + g \exp \left(\frac{E_A - E_f}{kT} \right)} \right] \quad (1.11)$$

De igual manera que los electrones, la concentración de huecos p_o queda.

$$p_o = N_V \exp \left(- \frac{E_{fA} - E_V}{kT} \right) \quad (1.12)$$

1.4.3) COMPORTAMIENTO DE LOS SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS CON RESPECTO A LA TEMPERATURA.

Analizando el comportamiento de un semiconductor extrínseco tipo n con respecto a la temperatura se observará lo siguiente

A 0 [Kelvin] todos los portadores de carga ocupan su nivel de energía más bajo. Al empezar a aumentar la temperatura empiezan a ionizarse rápidamente las impurezas, puesto que su energía de ionización es pequeña, a la temperatura T_s , llamada de saturación, llegan a ionizarse todas las impurezas y la cantidad de portadores de carga será igual a N_D . Al seguir aumentando la temperatura esta cantidad N_D será constante puesto que ya no hay más impurezas que ionizar (ecuación 1.8), hasta que la temperatura sea tal que la cantidad de portadores intrínsecos n_i iguale a la concentración de impurezas N_D , temperatura intrínseca t_i .

De modo que en un semiconductor extrínseco tipo n, el nivel de Fermi a 0 [Kelvin] estará en medio de E_D y E_C . Conforme aumenta la temperatura el nivel de Fermi se acercará a la banda de conducción debido a que se empiezan a ionizar las impurezas, llegará a un máximo que es a la temperatura donde todas las impurezas están ionizadas y de ahí en adelante a mayor temperatura se ira acercando, el nivel de Fermi, al nivel intrínseco debido a que los portadores intrínsecos serán comparables o mayores a la concentración de impurezas.

En la figura siguiente se expone $\ln(n_o)$ contra $1/T$ y E_F contra $1/T$ donde se pueden observar 3 regiones, la región de ionización, región de agotamiento y región intrínseca.

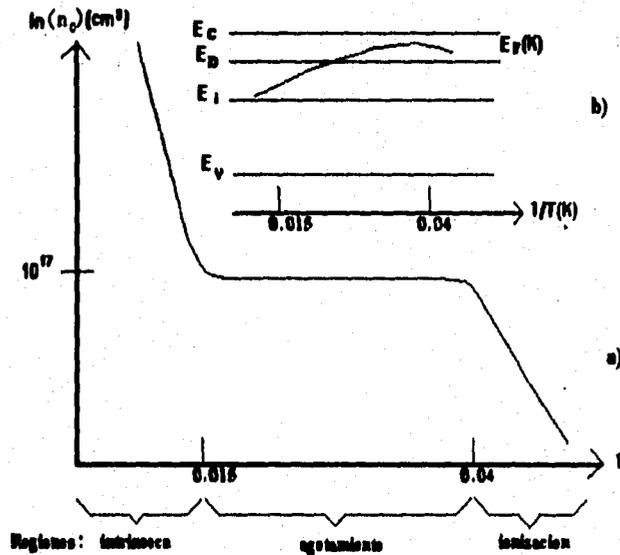


Fig. 1.5.- a) $\log(n_o)$ vs $1/T$ y b) $E_F(T)$ contra $1/T$ en un semiconductor extrínseco tipo n^o.

En cualquier caso el semiconductor siempre debe de ser neutro, sino fuera así se estuviera violando la condición de neutralidad (ecuación 1.13). Ahora si suponemos que en el semiconductor se tienen de los 2 tipos de impurezas ionizadas que sería introduciendo deliberadamente estos dos tipos de impurezas, la condición de neutralidad deberá cumplirse, condición que se expresa por la ecuación¹⁴.

$$n_o + N_A^+ = p_o + N_D^+ \quad (1.13)$$

Esta ecuación se puede, poner en términos de la distribución de Fermi-Dirac, la densidad de estados y la temperatura, quedando de la manera siguiente

$$n_o + \frac{N_A}{1 + g \exp\left(\frac{E_A - E_F}{kT}\right)} = p_o + N_D \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \exp\left(\frac{E_D - E_F}{kT}\right)} \right) \quad (1.14)$$

Donde g es el estado base de degeneración y es igual a 2 para el nivel de energía de la impureza donora debido al hecho que el nivel donor puede aceptar un electrón con cualquier espín o no puede tener un electrón. Si no existen impurezas N_D y $N_A = 0$ entonces $p_o = n_o$, si $N_D = 0$ y $N_A \neq 0$ quedara $p_o = N_A - n_o$.

La mínima temperatura (T_i) a la cual se garantiza que todas las impurezas están ionizadas de la ecuación anterior sustituyendo $T = T_i$ y $E_F = E_D$ porque cuando se llega a esa temperatura el nivel de Fermi se ubica en el nivel donor, la ecuación resultante es¹⁴:

$$T_i = \frac{E_A - E_V}{k \ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right)} \quad (1.15)$$

Independientemente de donde se ubique el nivel de Fermi E_F , se estará siempre cumpliendo con la condición de neutralidad. Por eso si aparecieran mas portadores de carga por otros medios (como luz, voltaje, radiación, etc.) el nivel se desplazara buscando la neutralidad de carga $n_o p_o = n_i^2(T)$. Esta es quizá la propiedad mas relevante de los semiconductores.

1.5) EL DIODO DE UNIÓN p-n.

1.5.1) Generalidades.

Una vez que se conoce la diferencia entre un material tipo-p y uno tipo-n (capítulo 1.4), y si ahora por algún método de fabricación (ver capítulo 3) se unieran estos 2 materiales de manera que formaran un continuo, en el lugar de la unión ocurren cambios importantes que dan lugar a las propiedades características del llamado diodo de la unión p-n, por esa razón se hará una breve discusión de estos cambios. Una estructura idealizada que permite describir esos cambios puede representarse en la figura 1.6.

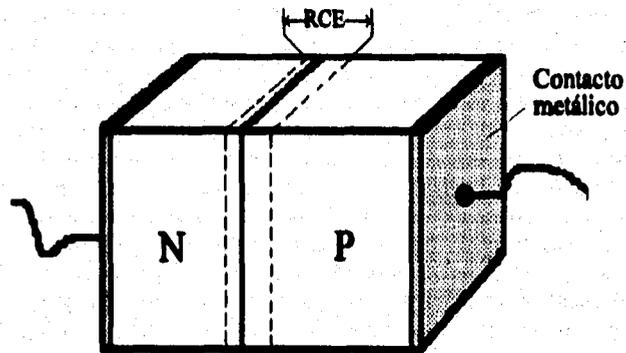


Fig. 1.6.- Diodo ideal.

En realidad es muy difícil encontrar un diodo de esa forma (ver figura 2.4), una vez terminado el diodo difiere mucho del esquema del dibujo anterior, pero este nos servirá para entender su funcionamiento. El proceso de fabricación se verá en el capítulo siguiente. Un esquema simplificado en la región de la unión para las concentraciones de portadores se presenta en la figura siguiente.

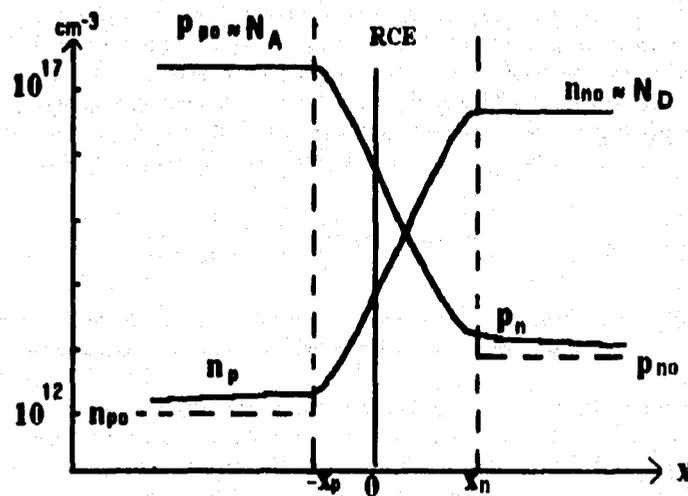


Fig. 1.7.- Distribución de portadores¹⁵.

El lugar donde se hace el contacto de los dos materiales se llama plano límite ó unión metalúrgica y como se observa en la figura 1.7 en este plano hay una transición brusca de un tipo de portador a otra. El caso que se representa corresponde a una unión

abrupta en la que $N_A = 4 \times 10^{17} \text{ [cm}^{-3}\text{]}$ y $N_D = 8 \times 10^{16} \text{ [cm}^{-3}\text{]}$, tomando como referencia la unión metalúrgica. Una parte de los electrones del lado tipo n pasaron al lado p y los huecos del lado tipo p pasaron al lado n, esta situación se debe a que los electrones mas cercanos de la unión se difunden, quedando carga fija positiva en el lado n. Para el lado p ocurre un proceso equivalente, solo que ahora la carga fija ionizada es negativa.

Este proceso continuaria si no fuera porque en ambos lados la carga ionizada produce un campo eléctrico que alcanza una magnitud suficiente para oponerse al flujo de electrones y huecos. A este flujo de portadores de carga se le llama corriente de difusión.

En la región de tipo p lejos de la unión hay una concentración de huecos en equilibrio igual a la cantidad de impurezasceptoras $P_{po} = N_A$. La concentración de portadores de carga negativa será según la relación de la ley de acción de masas¹⁶ $n_{po}p_{po} = n_i^2(T)$, $n_{po} = n_i^2(T)/N_A$, donde n_{po} es la concentración de portadores de carga negativa en el lado p. En este caso los portadores negativos son los minoritarios, porque la concentración de portadores de carga positiva en equilibrio es $p_{po} = N_A \gg n_{po}$. Para el material tipo n y lejos de la unión la concentración de dos portadores de carga será, $N_D \gg p_{no}$, la $n_{no} = N_D$ y $p_{no} = n_i^2(T)/N_D$.

La extensión donde existe este gradiente de portadores se llama región de carga del espacio ó capa de agotamiento (de $-x_p$ a x_n) la cual se designa comúnmente como RCE. En ese espacio idealmente no hay portadores libres, toda la carga existente es carga fija ionizada. Pero como observamos en la figura 1.7 debe de existir un gradiente tanto de electrones como de huecos, dándose la transición de tipo p a tipo n. Fuera de esta área se localizan las regiones neutras (RN) debido a que en ellas no hay carga neta total.

El volumen ocupado por la carga ionizada, depende de la concentración de impurezas en este caso como $N_D \gg N_A$ la región p se tendrá un volumen mayor.

Debido a la presencia de la carga fija ionizada en la RCE consecuentemente aparece un potencial electrostático ó barrera de potencial, debido al gradiente de portadores libres a través de la RCE, cuya relación esta dada por el teorema de Poisson¹⁷.

$$-\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{\partial e}{\partial x} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} = \frac{q}{\epsilon_s} [p(x) - n(x) + N_D^+(x) - N_A^-(x)] \quad (1.16)$$

donde V = potencial eléctrico [Volts], e = campo eléctrico [Volts/cm], ρ = densidad de carga [Coulomb/cm³] y ϵ_s = permitividad eléctrica del material [Coulomb/Volts-cm] y $q = 1.6 \times 10^{-19}$ [Coulomb].

Considerando despreciable la carga móvil $p(x) - n(x)$, solo existirá la carga fija que son las impurezas ionizadas. Para el caso de una unión abrupta, la densidad de carga es constante en ambas regiones de la RCE en la región n es $N_D^+(x)$ y la región p es $N_A^-(x)$. Con objeto de resolver para V ó para e , la RCE se puede dividir en esas dos zonas.

Tomando en consideración lo expuesto anteriormente, podemos calcular el campo eléctrico $e(x)$ y el potencial interconstruido al que denominaremos como V_{bi} . Resolviendo (1.16) se obtiene:

Para el campo eléctrico:

$$e(x) = -\frac{qN_A(x+x_p)}{\epsilon_s} \quad \text{para } -x_p \leq x < 0 \quad (1.17)$$

y

$$e(x) = \frac{qN_D(x-x_n)}{\epsilon_s} \quad \text{para } 0 < x \leq x_n \quad (1.18)$$

Para el potencial interconstruido V_M :

$$V_{bi} = \frac{1}{2} e_m W = \frac{1}{2} e_m (x_n + x_p) \quad \text{en toda la RCE} \quad (1.19)$$

Donde e_m es el campo máximo el cual existe en $x = 0$, esté es dado por $e_m = qN_D x_n / \epsilon_s = qN_A x_p / \epsilon_s$, y $W = x_n + x_p$ la extensión de la RCE.

Este cálculo se hizo, suponiendo que toda la carga existente está concentrada en dos bloques de $-X_p$ a 0 es qN_A y de 0 a X_n es qN_D . En realidad la forma de los bordes de la RCE es exponencial, sin embargo la aproximación que se ha hecho es aceptable y se le llama aproximación de vaciamiento¹⁸.

En la figura (1.8) se expone, para un diodo de unión p-n abrupta, el diagrama de bandas, la distribución de carga, campo eléctrico y voltaje interconstruido en condiciones de equilibrio con sus respectivas ecuaciones.

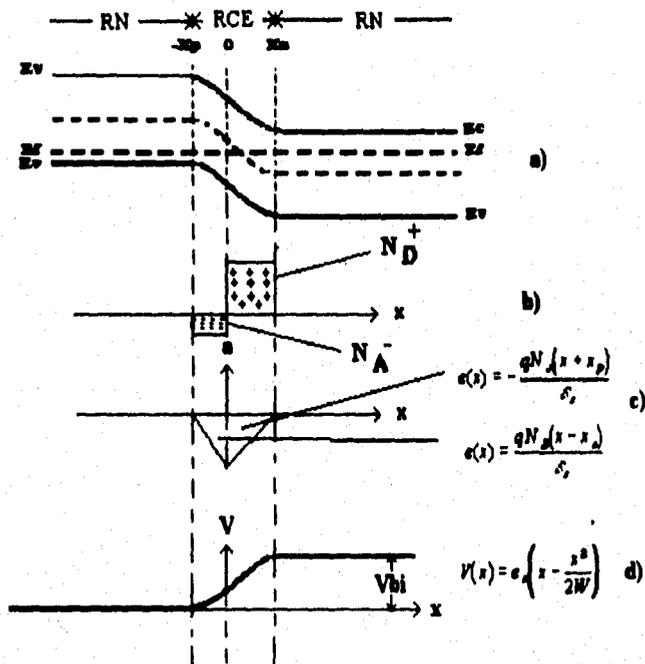


Fig. 1.8. - a) Diagrama de bandas, b) densidad de carga, c) campo eléctrico y d) voltaje interconstruido¹⁵.

1.6) UNIÓN p-n EN CONDICIONES DE POLARIZACIÓN.

En el estado de equilibrio ($V = 0$) es decir sin aplicar voltaje al diodo existen corrientes tanto de electrones como de huecos en ambos sentidos debido a sus movimientos aleatorios en la RCE, pero en si no tiene una resultante ($I = 0$). Al aplicar una diferencia de voltaje a través del diodo ($V \neq 0$), éste se saldrá de su estado de equilibrio, provocando que cambien los parámetros de la densidad de carga, el campo eléctrico y la barrera de potencial ubicados en la RCE, esto permitirá que exista circulación de corriente medible, de acuerdo al sentido de polarización.

1.6.1) POLARIZACIÓN DIRECTA.

Al momento de aplicar una diferencia de potencial a la unión, quedando el lado p más positivo que el lado n condición que se conoce como de polarización directa, la concentración de portadores minoritarios en los bordes de la RCE aumentara su magnitud según las relaciones de Boltzmann¹⁹.

$$p_n = p_{n0} e^{\frac{qV}{kT}} \quad (1.20)$$

$$n_p = n_{p0} e^{\frac{qV}{kT}} \quad (1.21)$$

donde V es el potencial aplicado a los extremos de la unión.

Para voltajes pequeños de polarización: n_{n0} y p_{p0} se mantienen prácticamente constantes, en cambio los portadores minoritarios cambian de manera importante por ser su cantidad muy pequeña comparada con la de los mayoritarios (de cerca de 5 ordenes de magnitud). Esto último es la condición de nivel de inyección bajo donde se cumple que $p_{p0} \gg n_{p0}$ y $n_{n0} \gg p_{n0}$.

En ausencia de otro fenómeno la corriente estará limitada por el proceso de transporte por difusión a las regiones neutras como se mencionó anteriormente.

Como la neutralidad en cualquier región se mantiene, aun en el caso de polarización, el cambio en la concentración de portadores mayoritarios debe de ser igual al cambio de concentración de portadores minoritarios, de manera que:

$$(n_n - n_{n0}) = (p_n - p_{n0}) \text{ y } (p_p - p_{p0}) = (n_p - n_{p0})$$

Con la condición de inyección a nivel bajo.

$$p_n' = p_n - p_{n0} \ll n_{n0} \text{ y } n_p' = n_p - n_{p0} \ll p_{p0}$$

donde p_n' son las concentraciones en exceso y como se observa es la diferencia de los portadores minoritarios en equilibrio térmico y con polarización.

En la figura 1.9a se observa el diagrama de bandas con polarización directa. En presencia de polarización directa la barrera de potencial disminuye (figura 1.9b), tanto huecos como electrones aumentan su magnitud en una cantidad igual a $e^{qV/kT}$ y cruzan la barrera por efecto de difusión, ya en las regiones neutras tanto los huecos como los electrones desaparecen por recombinación en dichas regiones (estas recombinaciones pueden producir luz (fotones o emisión radiactiva) o calor (fonones o emisión no-radiativa), en relación a esto se discutirá con mas detalle en el apartado 1.10). A una distancia L_n (longitud de difusión²⁰) su magnitud se habrá reducido en una cantidad de $1/2.717$ a su valor en el borde de la RCE. La distribución de los portadores minoritarios tiene la forma indicada en la Figura 1.9c.

La corriente total de la unión en cualquier plano debe ser la misma de modo que la suma de las densidades de corriente tanto de electrones como de huecos en cualquier plano nos dará la corriente total. Como se ha hecho la suposición de que en la RCE no existe ningún otro proceso las corrientes de electrones y huecos se mantendrán constantes de modo que $J_{total} = J_{h/borde} + J_{e/borde}$.

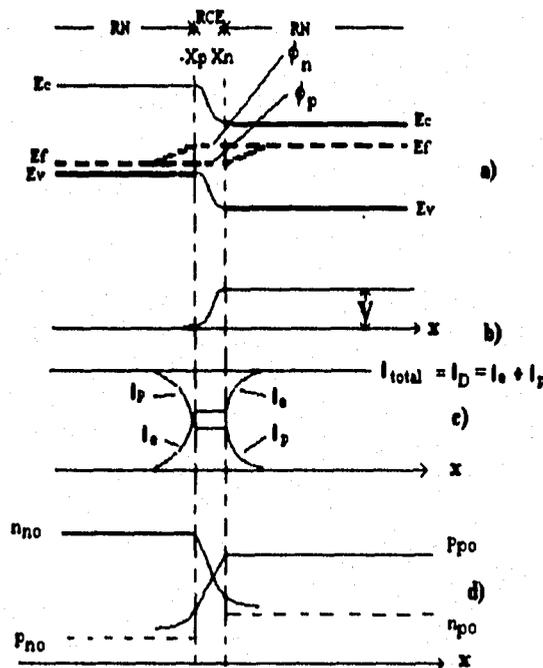


Fig. 1.9.- a) Diagrama de bandas en polarización directa, b) Altura de la barrera, c) Densidad de corriente de electrones y huecos y d) distribución de portadores¹⁵.

En la figura 1.9 se observan las densidades de corrientes de ambos portadores lejos de la RCE, ahí la corriente se debe esencialmente a los portadores mayoritarios. En los bordes la densidad de corriente es debida a los dos tipos de portadores mayoritarios y minoritarios. En todo el diodo la corriente es la misma en cualquier plano $I = A(J_n + J_p) = A(J_n \text{ borde tipo } n \text{ de la capa } + J_p \text{ borde tipo } p \text{ de la capa})$. También se muestran los cuasineveles de Fermi para electrones y huecos ϕ_n y ϕ_p .

1.6.2) Polarización inversa.

Cuando se le aplica una diferencia de potencial a la unión, quedando el lado p más negativo que el n, esta condición se le conoce como polarización inversa. En condiciones de polarización inversa que corresponde al caso opuesto del discutido en el punto anterior aumentará la barrera de potencial (figura 1.10b) y consecuentemente aumentará la oposición al flujo de electrones y huecos (diagrama de bandas con polarización inversa figura 1.10a). Tanto la densidad de huecos como la de electrones disminuyen en los bordes de la RCE, hasta una cierta distancia de la RCE donde su magnitud es igual a su concentración de equilibrio (figura 1.10d) y la densidad de corriente en cualquier plano del diodo es la misma como en la condición anterior (figura 1.10c), pero en muchos ordenes de magnitud menor.

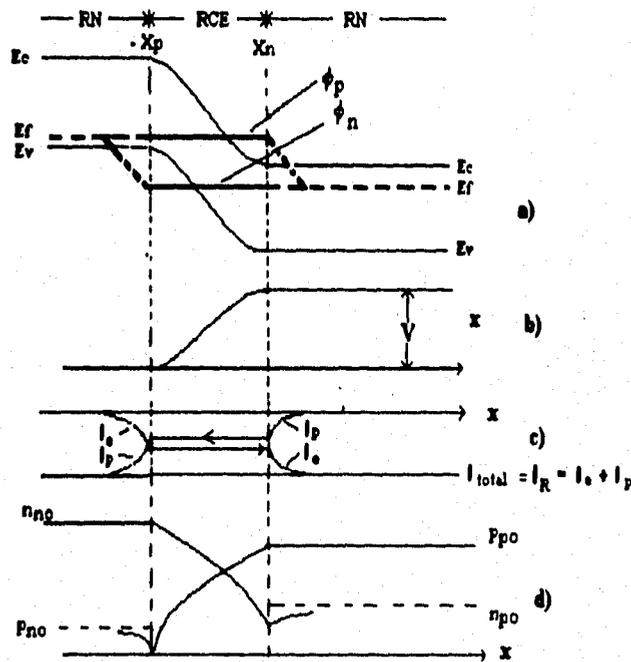


Fig. 1.10.- Diodo en polarización inversa a) Diagrama de bandas. b) Altura de la barrera c) Corrientes de electrones y huecos y d) concentración de portadores minoritarios¹⁵.

La corriente se debe a la corriente de arrastre de los portadores minoritarios (Figura 1.10), y por lo tanto opuesta en dirección a la que se produce en polarización directa. Esta densidad de corriente a valores pequeños de voltaje incrementará la concentración de portadores minoritarios, pero después de un cierto valor (un valor típico es de 10^9 [Amperes] ecuación 1.28) no producirán ningún aumento, entonces la corriente se satura (se hace independiente del voltaje), hasta en tanto no se alcance el voltaje de ruptura.

De lo expuesto anteriormente hemos observado las formas de concentración de portadores y densidad de corriente en toda la unión tanto en polarización directa como en inversa (Figuras 1.9 y 1.10).

En el subcapítulo siguiente se presenta la ecuación para la densidad de corriente en la unión p-n en función de los parámetros fundamentales de la estructura p-n.

1.7) ECUACIÓN DEL DIODO DE UNIÓN P-N IDEAL.

Las consideraciones para obtener estas ecuaciones son las siguientes. En las regiones neutras no hay campo eléctrico, se considera que estas regiones son isotrópicas, homogéneas y se tiene inyección a nivel bajo. En este caso los huecos tendrán movimiento debido principalmente por difusión, porque el campo eléctrico pequeño que producen los

portadores en exceso es "apantallado" por los portadores mayoritarios, bajo estas condiciones la ecuación de continuidad²¹, llamada ecuación de difusión de portadores minoritarios es:

$$D_n \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} = \frac{\partial p_n}{\partial t} + \frac{p_n - p_{no}}{\tau_h} \quad (1.22)$$

El primer miembro del término de la derecha ecuación (1.22) es la variación de portadores en exceso en condiciones no estáticas o de c.a., y el segundo miembro de la derecha es la velocidad de recombinación que depende de la cantidad de huecos en exceso $p_n' = p_n - p_{no}$ que aparecen por algún medio, en este caso por polarización, y τ_h es la vida media de los huecos.

La ecuación anterior en términos de p_n' queda como:

$$D_n \frac{\partial^2 p_n'}{\partial x^2} = \frac{\partial p_n'}{\partial t} + \frac{p_n'}{\tau_h} \quad (1.23)$$

Para resolverla se hacen algunas consideraciones, en presencia de polarización de corriente directa la concentración de portadores en exceso p_n' tendrá un valor que no variará con el tiempo. Esto es se considera estado estable.

Entonces $\delta p_n'/dt = 0$ quedando solo:

$$D_n \frac{\partial^2 p_n'}{\partial x^2} = \frac{p_n'}{\tau_h}$$

resolviendo se obtiene,

$$P_n'(x) = C_1 e^{-x/L_n} + C_2 e^{+x/L_n}$$

donde C_1 y C_2 son constantes de integración y L_n es la longitud de difusión definida por $L_n = (D_n \tau_h)^{1/2}$ que esta normalmente en el rango de 10^{-3} a 10^{-1} [cm]. Para calcular C_1 y C_2 el primer limite se fija en el borde de la RCE, en ($x = 0$, borde de la RCE) donde $p_n = p_{no} e^{qV/kT}$, p_n' se puede escribir por medio de la diferencia.

$$p_n'(x=0) = p_n(0) - p_{no} = p_{no}(e^{qV/kT} - 1)$$

donde p_{no} es la concentración en equilibrio. Para el segundo limite se fijará lejos de la unión $p_n'(x \rightarrow \alpha) = 0$ y solo existen p_{no} . En el borde de la RCE $C_1 = p_{no}(e^{qV/kT} - 1)$ y lejos de la unión $C_2 = 0$, esto quiere decir que los huecos inyectados por la región p, circulan por difusión, irán desapareciendo por recombinación en la región n. A una distancia L_n del borde de la RCE su magnitud se disminuirá en una cantidad igual a $1/2.717$.

La solución general será:

$$P_n'(x) = p_{no} (e^{qV/kT} - 1) e^{-x/L_h} \quad (1.24)$$

Sustituyendo esta solución en la expresión para la densidad de corriente.

$$J_h(x) = -qD_h \frac{\partial p_n'}{\partial x} = q \frac{D_h p_{no}}{L_h} (e^{qV/kT} - 1) e^{-x/L_h} \quad (1.25)$$

La densidad de corriente en $x = 0$, o en los bordes de la RCE es.

$$J_h(0) = q \frac{D_h p_{no}}{L_h} (e^{qV/kT} - 1) = q \frac{D_h}{L_h} p_n'(0) \quad (1.26)$$

De manera similar se obtiene una expresión para los electrones y si $I = A(J_e(0) + J_h(0))$ la densidad de corriente total es la misma en cualquier plano del diodo de área transversal (A), la ecuación queda:

$$I = A(J_e(0) + J_h(0)) = Aq \left(\frac{D_h p_{no}}{L_h} + \frac{D_e n_{po}}{L_e} \right) (e^{qV/kT} - 1) \quad (1.27)$$

A esta ecuación se le llama relación de tensión-corriente del diodo ideal, fué propuesta originalmente por Shockley⁴⁰. A voltajes ($V > 0$ y $V > kT/q$) el término exponencial domina y puede despreciarse el valor de - 1, entonces la corriente aumenta exponencialmente ecuación (1.27a).

$$I_D = I_s e^{qV/kT} \quad (1.27a)$$

donde

$$I_s = Aq \left(\frac{D_h p_{no}}{L_h} + \frac{D_e n_{po}}{L_e} \right) \quad (1.28)$$

para cuando el voltaje es inverso ($V < 0$) la densidad de corriente disminuye exponencialmente, pero a unos pocos kT/q el término exponencial se desprecia quedando únicamente el (- 1) esto quiere decir que a voltajes no muy grandes (menores de $kT/q \approx 25 \times 10^{-3}$ [Volts]) la corriente se satura o es independiente del voltaje. A esa corriente resultante se le llama corriente de saturación (1.28).

A la ecuación 1.28 se le puede dar otra interpretación: como $D_h = L_h^2/\tau_h$ obtenemos que $I_s = Aq(p_{no}L_h/\tau_h + n_{po}L_e/\tau_e)$ donde p_{no}/τ_h es la velocidad de generación y el volumen donde esta se genera es AL_h , región próxima inmediata a la RCE. Para polarización directa la velocidad de recombinación es p_{no}/τ_h .

1.7.1) Efecto de la temperatura de operación en el diodo de unión ideal²².

De la ecuación del diodo ideal, la principal dependencia con la temperatura viene dada por la corriente de saturación I_s (ecuación 1.28) la cual contiene 6 parámetros que dependen de la temperatura, los más importantes son la concentración de portadores minoritarios $p_{no} = n_i(T)^2/N_D$ y $n_{po} = n_i(T)^2/N_A$.

De las relaciones anteriores despejamos n_i^2 (concentración de portadores intrínsecos al cuadrado) quedando $I_s = Aqn_i^2(D_n/N_DL_n + D_p/N_AL_p)$, el término entre paréntesis no varía mucho con la temperatura por que estos son parámetros propios de cada material, pero n_i^2 se expresa como:

$$n_i^2 = kT^3 e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (1.30)$$

donde E_g es el ancho de la región prohibida referida o extrapolada al cero absoluto. En forma logarítmica quedará $\ln(n_i^2) = \ln(kT^3) - E_g/kT$ en la cual $\ln(n_i^2)$ dependerá más grandemente del segundo término en el rango de operación del diodo como función de $1/T$ que es aproximadamente lineal con pendiente igual a E_g/k .

En conclusión el efecto que tiene la temperatura en la unión p-n, es a mayor temperatura aumenta la corriente de saturación y disminuye el voltaje de encendido (capítulo 5.2.) haciendo a la unión p-n menos eficiente según la relación $P = IV$.

1.8) COMPORTAMIENTO DEL DIODO REAL.

La ecuación (1.27) expuesta anteriormente describe perfectamente el comportamiento de algunos diodos por ejemplo los de Germanio y se le conoce como ecuación del diodo ideal. En general hay necesidad de hacer varios ajustes y de tener en consideración otros fenómenos para obtener a la ecuación del diodo real.

Primero.- Las caídas de tensión que se presentan en las regiones neutras.

$$V = V_D + \int_{\text{regiones neutras}} (-e) dx \quad (1.31)$$

donde V = voltaje aplicado, V_D = voltaje en la RCE que se puede obtener de la ecuación del diodo ideal, $I = I_s(e^{V_D/kT} - 1)$.

$$V_D = \frac{kT}{q} \ln(1 + I/I_s) + IR_s \quad (1.32)$$

donde se ha incluido el término IR_s , debido a la caída de tensión en las regiones neutras, IR_s se puede representar como la integral que aparece a la derecha de la ecuación (1.31), esta ecuación nos sugiere que a valores pequeños de corriente (I) el voltaje varía logarítmicamente pero a corrientes grandes el voltaje variara linealmente en función de I

puesto que IR_s varía más rápidamente que $(KT/q)\ln(1+I/I_s)$, para evitar esto las regiones neutras se hacen muy delgadas a fin de que la resistencia serie R_s sea pequeño.

Haremos la suposición de que la resistencia R_s en las regiones neutras es una constante y toma en cuenta a los contactos metal-semiconductor²³ (esta R_s es de aproximadamente $1 [\Omega]$) los cuales son la interfase con el medio externo. Estas pueden representar una cierta caída de voltaje.

Segundo.- En un diodo real debe contemplarse la presencia de niveles permitidos adicionales a los donadores N_A y aceptores N_D , conocidos como centros de recombinación o niveles de trampas. Se les conoce así porque están situados cerca del centro de la banda prohibida. Estos niveles permitidos (E_i), que son más eficientes en la RCE que en las regiones neutras, actúan como centros de recombinación en polarización directa y como centros de generación para polarización inversa, ayudan al material a volver más rápidamente a la condición de neutralidad. La eficiencia de ambos procesos dependen de varias características como:

- Qué tan cerca estén esos niveles energéticos al nivel intrínseco ($E_i \rightarrow E_i$).
- Cuantos estarán en condiciones de actuar a una temperatura dada (N_i).
- Qué sección transversal tienen para actuar (σ).

La ecuación general para la velocidad de recombinación-generación considerando que existe un solo centro y está localizado a la mitad de la banda es²⁴:

$$U = \frac{\sigma_p \sigma_n v_{th} (pn - n_i^2) N_i}{\sigma_n \left[n + n_i \exp\left(\frac{E_i - E_i}{kT}\right) \right] + \sigma_p \left[p + n_i \exp\left(-\frac{E_i - E_i}{kT}\right) \right]} \quad (1.33)$$

donde N_i es la densidad de centros de generación-recombinación que aparecen en la RCE inducidos por impurezas no deseadas o introducidas a propósito. Como mencionamos al principio de este capítulo, durante el proceso de fabricación del diodo, se producen niveles que actúan como centros de atrapamiento. Estos niveles no se ajustan al modelo del átomo hidrogenoide y es necesario usar otros modelos más apropiados²⁵.

Con objeto de tomar en cuenta los efectos de generación-recombinación, se puede obtener una ecuación más simple que la (1.33) si consideramos lo siguiente. Se tiene la máxima eficiencia de los centros cuando $E_i = E_i$, esto significa que el centro está situado a la mitad de la banda, y si $\sigma_n = \sigma_p = \sigma$, el área de la sección transversal de atrapamiento es igual tanto para huecos como para electrones.

Para el caso de polarización directa donde el proceso que domina es la recombinación debido a que $(\phi_p - \phi_n) > 0$ (donde ϕ_p y ϕ_n son los cuasi-niveles de Fermi o niveles de Fermi fuera de equilibrio para los huecos y electrones respectivamente). Por esto $pn > n_i^2$, recordando que el producto pn dentro de la RCE está dado por la ecuación:

$$pn = n_i^2 \exp\left[\frac{q(\phi_p - \phi_n)}{kT}\right] \quad (1.34)$$

entonces la ecuación (1.33) queda:

$$U = \frac{\sigma v_{th} N_i n_i^2 (e^{qV/kT} - 1)}{n + p + 2n_i} \quad (1.35)$$

$$= \frac{\sigma v_{th} N_i n_i^2 (e^{qV/kT} - 1)}{n_i \left\{ \exp\left[\frac{q(\psi - \phi_n)}{kT}\right] + \exp\left[\frac{q(\phi_p - \psi)}{kT}\right] + 2 \right\}} \quad (1.36)$$

De esta ecuación se ve que el valor máximo de U es cuando ψ (donde ψ es E/q) esta en medio de ϕ_p y ϕ_n dentro de la RCE. Así el denominador de la ecuación anterior queda como $2n_i(\exp(qV/2kT) + 1)$ para $V \gg kT/q$. Entonces la velocidad de recombinación quedará finalmente:

$$U = \frac{1}{2} \sigma v_{th} N_i n_i \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \quad (1.37)$$

La corriente debida a este mecanismo se puede evaluar con la expresión:

$$J_{rec} = \int_0^W q U dx \approx \frac{qW}{2} \sigma v_{th} N_i n_i \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \approx n_i N_i \quad (1.38)$$

A la expresión (1.27) que obtuvimos para la densidad de corriente le tenemos que sumar esta, de modo que la densidad de corriente total en el diodo J_D es igual a $J_{dif.} + J_{rec}$ quedándonos:

$$J_D = q \left(\frac{D_n p_{no}}{L_n} + \frac{D_p p_{po}}{L_p} \right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) + \frac{qW}{2} \sigma v_{th} N_i n_i \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \quad (1.39)$$

Esta es una ecuación mas general y se expresa de manera simple como:

$$J_D = J \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (1.40)$$

Donde n puede tener el valor de 1 para el caso de las corrientes de difusión y 2 para las de recombinación, cuando se tiene un valor entre 1 y 2 será una mezcla de ambas, si tiende a 1 predominará la difusión y si tiende a 2 predominaran las de recombinación.

La determinación del parámetro n nos da la pauta de que tipo de corriente está predominando para ciertos intervalos de voltajes. Por ejemplo en la figura 1.11 se ve que de 0 a 0.2 [volts] la corriente sigue la forma $e^{qV/2kT}$ la cual sugiere que predomina la corriente de recombinación en la RCE. De 0.2 a 0.5 [volts] la corriente de difusión en las regiones

neutras predomina y de 0.5 en adelante las variación de la corriente es función de la resistencia serie R_s .²⁶

Es importante caracterizar los diodos a diferentes temperaturas porque tanto la recombinación como la generación dependen mucho de la temperatura. En el caso de diodos de germanio a temperatura ambiente la recombinación en la RCE es despreciable pero a temperaturas menores de la ambiental, la velocidad de recombinación de las regiones neutras puede llegar a ser menor que las de la RCE predominando entonces la recombinación en la RCE.

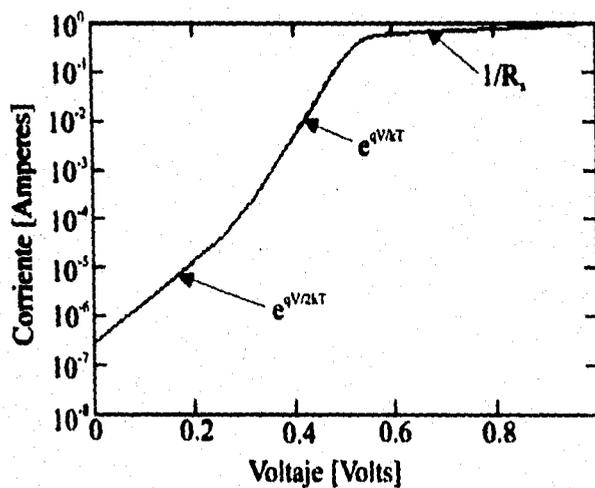


Fig. 1.11.- Característica I - V de un diodo de unión p-n²⁷.

Ahora en polarización inversa al disminuir la cantidad de portadores minoritarios en los bordes ($n_p \ll n_i^2$) y al tratar de llevar a la neutralidad el sistema predominará la generación sobre la recombinación, quedando la ecuación (1.33)

$$U = \left[\frac{\sigma_p \sigma_n v_{th} N_i}{\sigma_n \exp\left(\frac{E_i - E_f}{kT}\right) + \sigma_p \exp\left(\frac{E_f - E_i}{kT}\right)} \right] n_i = -\frac{n_i}{\tau_c} \quad (1.41)$$

Donde τ_c es el valor entre corchetes y se le conoce como el tiempo de vida medio efectivo de generación.

Para obtener la densidad de corriente de generación se integra en todo el ancho W de la RCE, quedando:

$$J_{gen} = \int_0^W q|U|dx \approx q|U|W = \frac{qn_i W}{\tau_c} \quad (1.42)$$

Entonces a la corriente inversa para el diodo ideal hay que añadirle la corriente de generación $J_{inv} = J_{sat} + J_{gen}$.

$$J_{inv} = J_{sat} + J_{gen} = q \left(\frac{D_n p_{no}}{L_n} + \frac{D_p n_{po}}{L_p} \right) + \frac{q n_i W}{\tau_t} \quad (1.43)$$

Como puede verse de esta ecuación la corriente de generación depende más de la concentración intrínseca $n_i(T)$, ecuación (30), que del cambio que puede tener τ_t con la temperatura. Para una temperatura constante, J_{gen} depende del valor de W , esta a la vez depende del voltaje inverso como $(-V)^{1/2}$ para uniones abruptas y $(-V)^{1/3}$ para uniones linealmente graduales. En general la corriente inversa de saturación varía más respecto a la temperatura como $n_i(T)^2$, que la corriente de generación que varía como $n_i(T)$. Sin embargo para el GaAs, los valores ideales (típicos) de una y de otra son: para $J_{sat} = 10^{-16}$ [Amperes] y para $J_{gen} = 10^{-18}$ [Amperes] ambas a 300 [Kelvin].

Otro mecanismo que no predice la ecuación ideal del diodo de unión son las corrientes superficiales²⁸. Las corrientes superficiales aparecen porque al momento de cortar el semiconductor muchos enlaces de la superficie quedan sueltos quedando estados disponibles de ser ocupados los cuales pueden servir también como centros de generación y recombinación. Para reducirlos se trata de completar estos enlaces por medio de diferentes tratamientos, de estas corrientes depende mucho el voltaje inverso y no tanto de la temperatura²⁹.

Por último los contactos metal-semiconductor nos proporcionan un medio de comunicación con el semiconductor, estos contactos deben presentar el menor obstáculo para la circulación de la corriente, con tales características ambos contactos se llaman contactos óhmicos.

1.9) CORRIENTES TÚNEL³⁰.

En los diodos de unión p-n, especialmente aquellos en que ambos lados están muy impurificados, puede representarse un mecanismo de transporte de corriente adicional, denominado corriente túnel o corriente de emisión por campo. El efecto túnel en un diodo es la probabilidad que un electrón tiene de pasar a través de la barrera ubicada en la RCE. El resultado de este efecto es una corriente neta a través de él, la cual está dada por la ecuación siguiente³¹.

$$J_{tunnel} = \frac{(2m^*)^{1/2} q^3 EV}{4\pi^2 h^2 E_g^{1/2}} \exp\left(\frac{4(2m^*)^{1/2} E_g^{3/2}}{3qEh}\right) \quad (1.44)$$

Como puede verse de la ecuación, entre mayor sea el campo eléctrico en la unión mayor será la corriente túnel.

El efecto túnel se da porque, existen estados disponibles de un lado de la barrera y estados donadores por el otro lado a un mismo nivel de energía. El electrón, por tal motivo,

tiene una probabilidad de traspasar esta barrera y ocupar esos estados isoenergéticos, a este fenómeno se le llama tunelamiento banda-banda ó directo. Con polarización directa en el diodo, la forma de la barrera no cambia notablemente pero en cambio se tendrán más estados energéticos disponibles debido al desplazamiento del nivel de Fermi. Al aumentar mas el voltaje se tendrán más estados isoenergéticos hasta tenerse un valor máximo de ellos, y posteriormente irán disminuyendo hasta anularse el tunelamiento. Por tal motivo el efecto de tunelamiento se observa a voltajes bajos, y a temperaturas bajas donde la corriente de difusión no es importante (Figura 1.12).

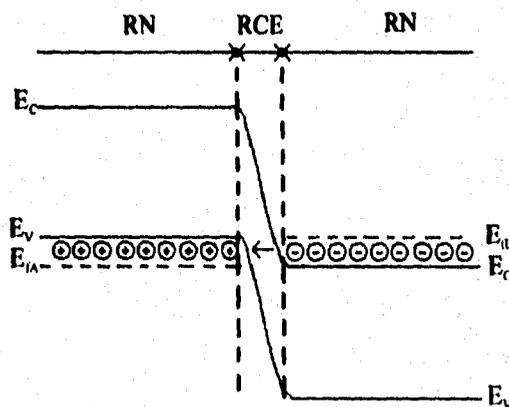


Fig. 1.12.- Tunelamiento banda-banda³².

El tunelamiento a voltajes altos se presenta solo si existen niveles permitidos (impurezas ó trampas) en la banda prohibida al mismo nivel energético que el nivel de Fermi de la banda de conducción, a este tunelamiento se le llama indirecto, banda-impureza o proceso de cascada (Figura 1.13) cuya corriente variará de la forma³³.

$$I = AD_{if}M_{if}P_T \quad (1.45)$$

donde **A** es una constante insensible a la relación temperatura y voltaje, **D_{if}** contiene la densidad de ocupación de estados inicial y final, **M_{if}** es la matriz que enlaza los estados final e inicial y **P_T** la probabilidad de tunelamiento. A diferencia del tunelamiento directo esta corriente depende más de la temperatura porque la probabilidad de ocupación de un nivel permitido en la banda prohibida es más sensible a la temperatura que un nivel próximo a las bandas³⁴.

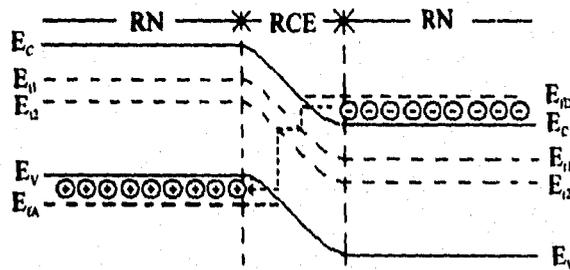


Fig. 1.13 Tunelamiento banda-impureza³³.

Una manera de identificar cada una de estas componentes de corriente es precisamente vía su comportamiento con la temperatura.

1.10) ELECTROLUMINISCENCIA³⁵.

Como hemos señalado en un diodo polarizado favorablemente (lado p más positivo que lado n) circulara una corriente. El lado n inyecta electrones al lado p y viceversa, los electrones se recombinan en el lado p y los huecos en el lado n, debido a que retornan a su estado base (el electrón-hueco desaparecen) Figura 1.14.

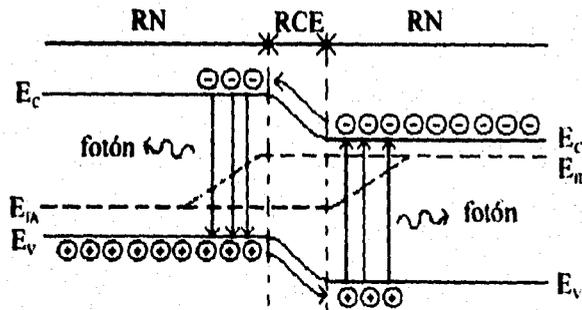


Fig. 1.14.- Proceso de recombinación radiativa³⁶.

Un criterio de diseño de los LED's no nos dará la manera de como se produce la recombinación de los portadores de carga en los LED's. Si la recombinación se realiza tanto en lado p como en el lado n, debemos considerar que la recombinación de los electrones en el lado p es más importante que los huecos en el lado n, por ser más rápidos los electrones que los huecos. Entonces con esta idea podemos establecer 2 criterios de diseño. 1.- El lado n debe estar mas impurificado que el lado p para que halla más electrones que inyectar del lado n al p y sea mayor la recombinación en el lado p que en el n y 2.- el lado p debe de ser del menor espesor posible para evitar absorción por el mismo material³⁷.

La emisión de luz en un semiconductor se da debido a la recombinación de portadores de carga, pero para que halla emisión se necesita que la recombinación que

produce luz (recombinación radiactiva) sea el proceso predominante sobre otros procesos de recombinación que no produce luz tales como la recombinación que produce calor (fonones). Para describir cualitativamente esto, se define un tiempo de vida para la recombinación radiactiva τ_r , y para la recombinación no radiactiva τ_{nr} , el menor es el que predominará. En los diodos construidos con materiales de banda directa como el **GaAs** predomina la recombinación radiactiva sobre la no radiactiva dándose así el fenómeno de electroluminiscencia.

Lo mencionado arriba se explica por las transiciones entre bandas, estos procesos están regidos por la regla de selección-k, la cual para el caso de las transiciones directas, un electrón cerca del fondo de la banda de conducción con cantidad de movimiento k_2 al transitar a la banda de valencia se genera un fotón. Como se debe de conservar la cantidad de movimiento, la cantidad de movimiento del electrón en la banda de conducción k_2 debe de ser igual a la cantidad de movimiento en la banda de valencia k_1 más la cantidad de movimiento del fotón. Como el vector de onda de la banda de valencia es igual al vector de onda de la banda de conducción entonces $k_2 \approx k_1$, por lo cual la cantidad de movimiento del fotón se desprecia comparándola con la del electrón, de esta manera se puede dar la recombinación radiactiva de manera eficiente³⁸.

Al igual que en la característica I - V la presencia de defectos en el material del diodo disminuye la eficiencia del diodo en la característica $I_{lum} - \lambda$. Al tenerse estados en la banda prohibida los electrones tendrán la posibilidad de recombinarse a través de esos estados, emitiendo así en otra energía, en otros casos los electrones quedan atrapados en esos estados disminuyendo la eficiencia de emisión, este último caso corresponde a procesos no radiativos.

En la figura 1.15 presentamos todas las posibilidades de recombinación radiactiva en un diodo.

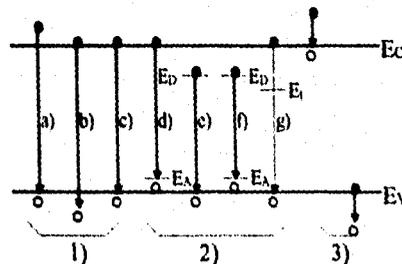


Fig. 1.15 Transiciones básicas en un semiconductor³⁹.

1) Transiciones interbanda a) y b) emisión de energía alta o portadores calientes también llamada emisión de avalancha, c) emisión intrínseca, 2) transiciones de banda a niveles de impurezas o defectos d) de banda de conducción a nivel aceptor, e) emisión de nivel donador a nivel aceptor. f) con participación de un nivel de trampa 3) interbanda involucrando portadores calientes también llamada emisión desaceleración⁴⁰.

La diferencia entre estos tipos de emisiones (figura 1.15) es en la longitud de onda en la que emiten, siendo para el caso 1 el que emite en la mayor longitud de onda y para el caso 3 el de menor longitud de onda.

En resumen algunos de los criterios de diseño de los LED's son⁴¹:

El criterio de diseño de los LED's se basa en la eficiencia de iluminación. La eficiencia de iluminación se divide en eficiencia interna y externa. La primera se define como la cantidad de portadores de carga que cruzan a la RCE entre los fotones que crean por estos portadores de carga y la eficiencia externa es la cantidad de fotones que se generan en el semiconductor entre los que logran salir. Para aumentar la eficiencia interna se utilizan los cuatro primeros criterios propuestos y para magnificar la eficiencia externa se utilizan los criterios 5 al 6.

1.- La estructura de bandas del semiconductor debe de ser directa.- Para que la recombinación radiactiva domine sobre la no-radiativa (ver capítulo 1.10).

2.- Lado n más impurificado que el lado p.- Los electrones por tener masa efectiva más pequeña que los huecos son mas veloces, de esta manera el tener una concentración de electrones en el lado n más alta que una concentración de huecos en el lado p, la recombinación radiactiva dominante será la de los electrones en el lado p.

3.- El ancho de la banda prohibida (E_g) del lado p de la unión pn debe de ser mayor que la energía de los fotones creados (estos son las llamadas heteroestructuras figuras 1.16c-d).- Para evitar autoabsorción.

4.- El lado p debe de ser angosto para evitar absorción por el mismo material.- Debido a que la mayoría de los fotones se crean en el lado p esta debe de ser delgada para evitar que los fotones se absorban en el mismo material.

5.- El contacto eléctrico es de dimensiones pequeñas para evitar más área de emisión.- El contacto eléctrico debe de ser lo más pequeño posible sin aumentar la resistencia serie (R_s).

6.- Del tipo de estructura del encapsulado.- Con este se consigue dos propósitos: Uno evitar las pérdidas por reflexión en la interfase cápsula-medio ambiente (como mencionamos existe un ángulo crítico (θ_c) en la cual los fotones que llegan con un ángulo mayor que este serán reflejados, por lo tanto la cápsula debe de tener una cierta curvatura para evitar este tipo de pérdidas ver capítulo 2.2). El otro propósito es la forma de modificar el patrón de radiación para algún tipo de aplicación (fig. 2.2).

1.11) ESTRUCTURAS TÍPICAS PARA LOS LED'S.

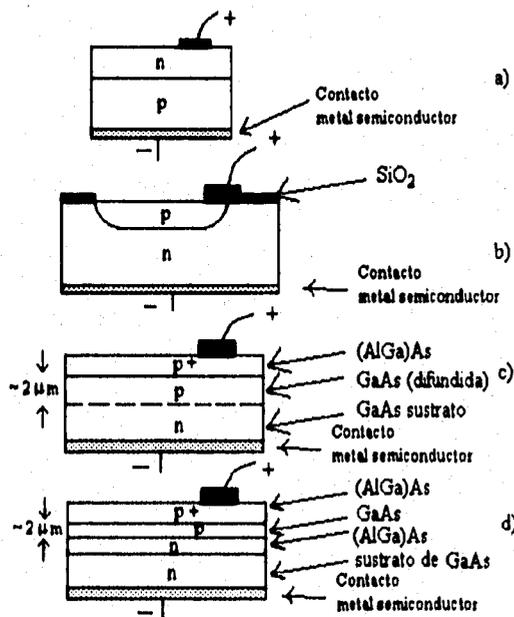


Fig. 1.16.- Estructuras de LED's de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}^{42}$: a) diodo simple, el área de contacto es pequeña, la luz es emitida en la superficie de la región tipo n que es de banda prohibida ancha debido a que es de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. b) LED planar con área de contacto pequeña, la región p se consigue difundiendo Zn en la región n de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. c) Heterounión simple y d) doble heterounión.

Los LED's de GaAs emiten cerca de los 870 [nm] en la región del infrarrojo. Para obtener emisión en el visible se le añade Al para formar el compuesto ternario de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Las estructuras típicas del LED de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ se muestran en la figura 1.16. En la figura 1.16a la luz es emitida a través de la región-n cuya banda prohibida es ancha, por lo tanto la luz emitida se absorbe poco. El LED de (AlGa)As figura 1.16b preparado por la técnica de LPE con sustrato de GaAs tipo n, el cajón tipo p es formado difundiendo Zn (también se usan Be, Mg, Cd, Li, etc., para hacer cajones tipo n se usan S, Sn, Te, Se, etc.). El LED de heterounión simple se muestra en la figura 1.16c. La recombinación radiactiva ocurre en la región angosta entre las capa p y p⁺ cerca de la superficie. Los LED's de doble heteroestructura, figura 1.16d, tienen una región p que está entre las regiones tipo p⁺ y n, ambas con bandas prohibidas anchas, consiguiéndose con esto una eficiencia mejor.

Los espectros de emisión contienen mucha información acerca del dispositivo electroluminiscente, y su forma depende de varios parámetros. En la figura 1.17 mostramos varios espectros de fotoluminiscencia de GaAs como función de la concentración de huecos (p). Se observa de los espectros de emisión de la figura 1.17 que a mayor concentración de

portadores el pico de emisión se corre a energías bajas como consecuencia de la disminución en la banda prohibida óptica.

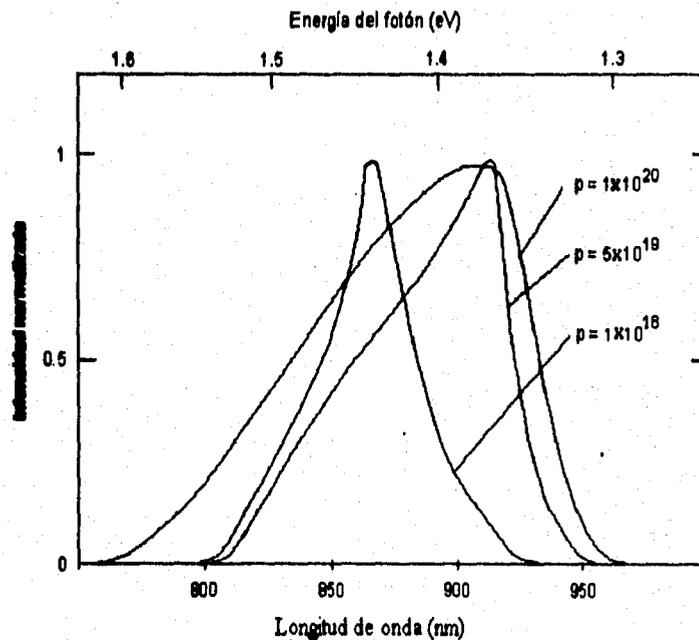


Fig. 1.17.- Espectros de emisión del GaAs en función de la concentración de huecos (p)⁴³.

Referencias:

- 1) Physics of Semiconductors Devices by S. M. Sze, pp. 8, Second Edition. John Wiley and Sons.
- 2) Física Moderna de Kenneth Krane, pp. 468, Ed., Noriega LIMUSA.
- 3) N. Ashby y S. C. Miller, Principles of Modern Physics (San Francisco, Holden-Day, 1970), capítulo 2.
- 4) F. Reif, Statistical Physics. Volume 5 of the Berkeley Physics series (Nueva York, McGraw-Hill, 1967).
- 5) C. Kittel, Thermal Physics (Nueva York, Wiley, 1969).
- 6) R. H. Fowler, Statistical Mechanical.
- 7) Physics of Semiconductors Devices by S. M. Sze, cap. 1.4, Ed. Wiley.
- 8) R. A. Smith, "Semiconductors", 2nd ed., Cambridge University Press, London, 1979.
- 9) R. N. Hall, "Electron-Hole recombination in germanium". Phys Rev., vol. 87, p. 837; July, 1952.
- 10) "Física de los semiconductores" por K. V. Shalimova, cap. 3.5.
- 11) "Física de los semiconductores" por K. V. Shalimova, cap. 3.7.
- 12) Física Moderna de Kenneth Krane, pp. 199, Ed., Noriega LIMUSA.
- 13) W. Shockley, Electrons and Holes in semiconductors, D. Van Nostrand, Princeton, N. J., 1950
- 14) "Física de los semiconductores" por K. V. Shalimova, cap. 3.8.
- 15) W. Shockley, Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors. Bell Syst. Tech. J., 28 435 1949); Electrons and Holes in Semiconductors, D. Van Nostrand, Princeton, N. J., 1950.
- 16) Thermodynamics H. B. Callen Cap. 2.8.
- 17) Low level current in insulated gate field effect transistors Solid-state Electronics, 1972, Vol. 15,

- pp. 293-302.
- 18) C. G. B. Garrett and W. H. Brattain, "Physical Theory of Semiconductor Surface," *Phys Rev.*, 99, 376 (1955).
 - 19) "Introducción a la física de los semiconductores" por Adler, Smith y Longini, Tomo 1, Sec. 3.5.3. De Reverte, S. A. cap. 4.1.
 - 20) W. C. Johnson and P. T. Panousis, "The influence of Debye Length on the C-V Measurement of Doping Profiles," *IEEE Trans. Electron. Devices*, DE-18, 965 (1971).
 - 21) "Introducción a la física de los semiconductores" por Adler, Smith y Longini, Tomo 1, Sec. 4.1 Ed Reverte, S. A.
 - 22) Y. P. Verihni, *Physica* 34, 149 (1967).
 - 23) A. G. Milnes and D. L. Feucht, *Heterojunctions and Metal-Semiconductor Junctions*, Academic, New York, 1972.
 - 24) C. T. Sah, R. N. Noyce, and W. Shockley, *Carrier Generation and Recombination in p-n Junction and p-n Junction Characteristics*, *Proc. IRE*, 45, 1228 (1957).
 - 25) J. Callaway and A. J. Hughes, "Localized Defects in Semiconductors," *Phys. Rev.*, 156, 860 (1967).
 - 26) "Introducción a la física de los semiconductores" por Adler, Smith y Longini, Tomo 2, Sec. 4.0 Ed Reverte, S. A.
 - 27) De Sah, Noyce y Shockley, *Proc. IRE*, 45, 1228-43, 1957.
 - 28) A. S. Grove, *Physics and Technology of Semiconductor Devices*, Wiley, New York, 1967.
 - 29) "Introducción a la física de los semiconductores," por Adler, Smith y Longini, Tomo 2, Sec. 4.3 Ed Reverte, S. A.
 - 30) Tunnel diodes R. N. Hall *IRE Transactions on Electron Devices* pp 694-702.
 - 31) Excess tunnel current in Silicon junctions A. G. Chynoweth Feldman and Logan of *Phys Rev.*, vol. 121, No 3 February 1, 1967.
 - 32) *Physics of Semiconductor Devices* by S. M. Sze, cap. 9.2, Ed. Wiley.
 - 33) T. A. Demassa and D. P. Knott, "The prediction Diode Voltage-Current Characteristics," *Solid State Electron.*, 13, 131 (1970).
 - 34) R. N. Nanavati and C. A. Morato De Andrade, "Excess Current in Gallium Arsenide Tunnel Diodes," *Proc. IEEE*, 52, 869 (1964).
 - 35) P. Goldberg, Ed., *Luminescence of Inorganic Solids*, Academic, New York, 1966.
 - 36) *Componentes electronicos Siemens AKTIENGESELLSCHAFT* pag. 383.
 - 37) S. Gage, D. Evans, M. Hodapp, and H. Sorenson, *Optoelectronics Applications Manual*, McGraw-Hill, New York, 1977.
 - 38) W. N. Carr, *Characteristics of a GaAs Spontaneous Infrared Source with 40 Percent Efficiency*, *IEEE Trans. Electron Devices*, DE-12, 531 (1965).
 - 39) H. F. Ivey, "Electroluminescence and Semiconductor Laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-2, 713 (1966).
 - 40) H. F. Ivey, "Electroluminescence and Related Effects", Suppl. 1 to L. Marton, De., *Advances in electronics and Electron Physics*, Academic, New York, 1966.
 - 41) *Optoelectronics applications Manual* H. P. MacGraw-Hill.
 - 42) "Heterojunction LED's" of Kressel et al cap 14.6.
 - 43) A. A. Bergh and P. J. Dean, *Light-Emitting Diodes*, Clarendon, Oxford, 1976.

CAPÍTULO 2

ASPECTOS GENERALES DE LAS UNIONES p-n

2.1) INTRODUCCIÓN.

2.2) TIPOS O FORMAS DE LED'S.

2.3) SELECCIÓN DE MATERIALES.

2.4) TÉCNICAS DE FABRICACIÓN DE DIODOS EMISORES DE LUZ.

2.5) ALGUNAS APLICACIONES.

2.1) INTRODUCCIÓN.

Un diodo emisor de luz (LED) es un dispositivo electrónico que convierte la energía eléctrica en energía luminosa. Su funcionamiento se basa en el fenómeno de electroluminiscencia, que es la generación de luz debida a la circulación de corriente a través de una unión p-n bajo la aplicación de un campo eléctrico. La luz electroluminiscente difiere de la térmica por su rango angosto de longitud de onda λ (para un LED este ancho es típicamente de 0.01 a 0.05 μm) y para la térmica de 0.4 a 0.7 μm) también difieren por la forma de producirse, la luz electromagnética se produce por la interacción entre dos cargas de signo opuesto (las dos cargas después de estar en estado excitado regresan a sus estados bases o por intercambio de sus energías cinética y potencial) y la térmica por el movimiento vibratorio que tienen los átomos, para este caso el material (que se usa como fuente) puede durar largo tiempo produciendo luz si se evita la combustión.

2.2) TIPOS O FORMAS DE LED'S.

Los LED's se fabrican de tal manera que se consiga la eficiencia máxima posible, por ello se encuentran diferentes tipos o formas.

El esquema típico de un LED en presentación comercial, ya encapsulado se representa en la figura 2.1.

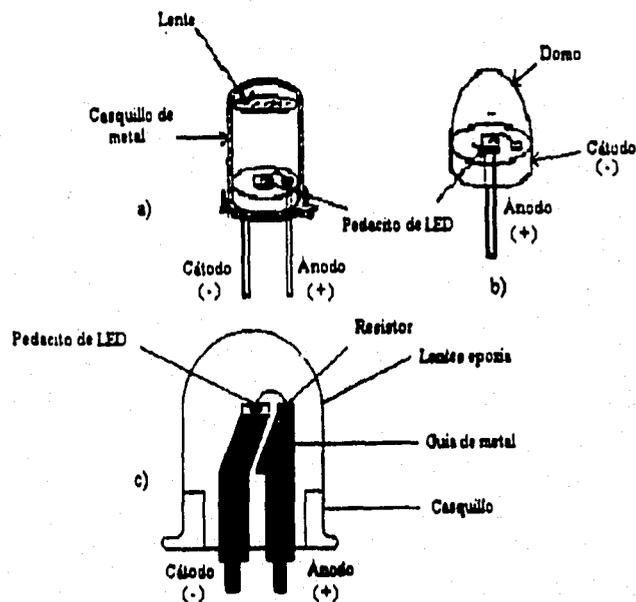


Fig. 2.1.- LED comercial¹.

Como se observa en la figura 2.1, este tipo de LED tiene una cubierta o casquillo de metal para que la mayor parte de la luz salga por la parte superior. La estructura semiconductor o pedacito de LED se coloca en la base del dispositivo y esta misma forma el contacto con la parte n. En la parte superior (lado p) se hace una fusión poco profunda para conectar un hilo que será la otra terminal, ese hilo se aísla de la base. Para aumentar el área de emisión, se puede colocar un lente arriba del casquillo de metal, en muchos casos se puede sustituir por un domo de plástico transparente para eliminar la necesidad de un lente, como esta mostrado en las figuras 2.1.b y c, este ayuda a la luz a escapar hacia el exterior.

De una oblea semiconductor o material base que es de Si, Ge o GaAs, de ella se parte para obtener LED's, inicialmente se obtienen por cortes muchos diodos (normalmente de $0.1 \text{ [mm}^2 \text{]}$ de área). Un reflector apropiado incrementa el impacto visual de la luz emitida por el diodo.

Existen 3 mecanismos de pérdidas que disminuyen la emisión de luz o fotones estos son: 1) Absorción de luz dentro del mismo material que lo emite, debido a que el material (substrato) es opaco, cerca del 85 % de los fotones emitidos son absorbidos, 2) pérdidas de Fresnel, debido a que la luz al pasar de un medio de índice de refracción n_2 (para nuestro caso, substrato de GaAs $n_2 = 3.66$) a otro medio de índice n_1 (por ejemplo aire $n_1 = 1.0$) una porción de la luz es reflejada en esa interfaz, 3) por reflexiones internas que tienen los fotones dentro del substrato que inciden en la interfaz a un ángulo más grande que el crítico θ_c , definido por la ley de Snell, $\theta_c = \text{sen}^{-1}(n_1/n_2)$. Para el GaAs este ángulo es cercano a 16° . En la figura 2.2 se presentan 3 LED's en sección transversal junto con su patrón de radiación.

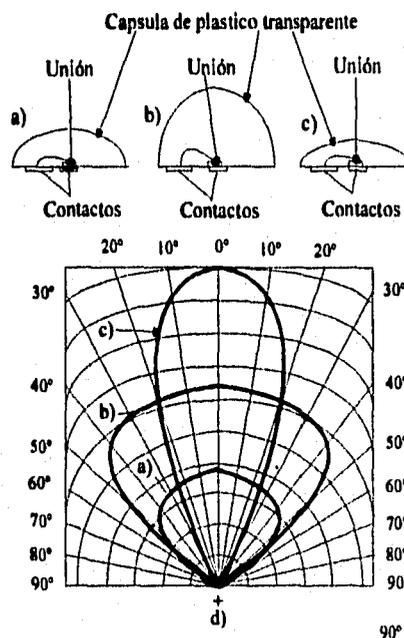


Fig. 2.2.- Sección transversal de tres LED's: a) Hemisférico, b) esférico truncada, c) Parabólica y d) su correspondiente patrón de radiación².

En la figura 2.2 se observa que el patrón de radiación de los LED's depende del tipo de encapsulado, el que tiene mas alcance en visibilidad viendo al LED de frente es el que tiene el encapsulado parabólico.

La forma de los encapsulados depende de la forma en que se desea hacer el diodo y pueden hacerse semejantes a un óvalo, a un rectángulo, en forma de estrella, etc. La propuesta para hacer dispositivos rectangulares es por su adaptabilidad para la producción en masa o para formar matrices (por ejemplo números de siete segmentos)³.

Con el área mínima usual de $0.1 \text{ [mm}^2\text{]}$ de las estructuras semiconductoras se obtiene una luz confortable. Cabe señalar que la visibilidad es una función logarítmica de la brillantez y una función lineal del contraste en los niveles de iluminación usual. Una pequeña mejora en el contraste puede reducir los requerimientos de brillantez. Cuando un LED se coloca en una superficie oscura se puede añadir un filtro que haga la función de reflejar la luz proveniente del exterior y a la vez distinguir la emisión del diodo. Esto es para que no se confunda el estado del LED si esta encendido o apagado con relación al fondo considerando⁴, por ejemplo la luz del GaP con un reflector de cobre. Se escoge el cobre porque absorbe más las componentes azules y verdes de la luz ambiental y refleja mas la luz roja emitida por el diodo.

En conclusión se tienen LED's: 1) con diferentes encapsulados que tienen el propósito de modificar el espectro de radiación, 2) otras formas de encapsulados como rectangulares, óvalos, etc. se usan en conjunto por ejemplo en una matriz o display, etc. 3)

algunos otros LED's contienen filtros en la parte de arriba para usarlos en superficies que tienen un color parecido a la del encapsulado y así evitar la confusión si esta apagado o encendido.

2.3) SELECCIÓN DE MATERIALES.

Una forma de seleccionar los materiales en el caso de que nos concierne (que es la respuesta luminosa) es por medio del valor del ancho de su banda prohibida (E_g), que normalmente es del orden de 1 [electrónVolt].

A este valor de energía (E_g) le corresponde un valor de longitud de onda λ [nm] por medio de la relación:

$$E_g = hc/\lambda$$

donde h es la constante de Planck igual a 4.137×10^{-15} [electrónVolt-s], c es la velocidad de la luz igual a 3×10^8 [m/s], despejando λ queda:

$$\lambda = hc/E_g$$

Para el caso del semiconductor de GaAs su E_g es de aproximadamente de 1.42 [electrónVolt] a temperatura ambiente, sustituyendo valores, $\lambda = (4.137 \times 10^{-15}$ [electrónVolt-s])(3×10^8 [m/s])/(1.42 [electrónVolt]) \approx 870.7 [nm], cerca de este valor de longitud de onda emite el GaAs.

En la gráfica siguiente se muestra el espectro electromagnético en donde emiten algunos semiconductores, incluyendo la luminosidad relativa en función del ojo humano.

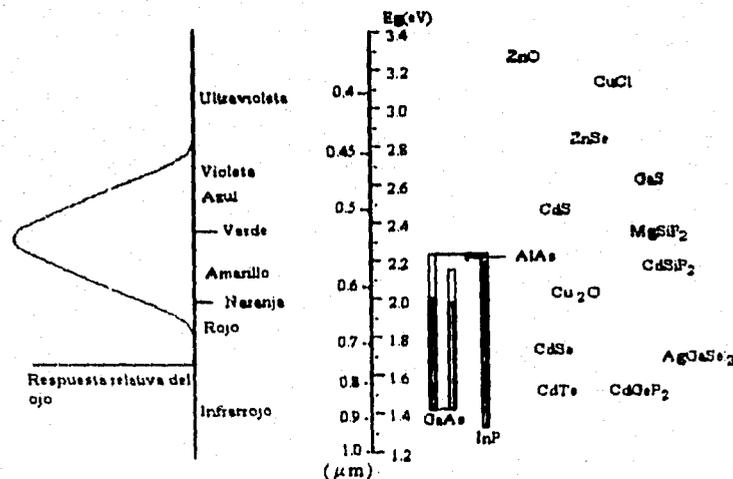


Fig. 2.3.- Energías donde emiten algunos semiconductores y la respuesta relativa del ojo humano⁵.

En la figura 2.3 se observan algunos semiconductores que tienen la propiedad de emitir luz por lo tanto puede servir como LED's y a la izquierda de ellos su correspondiente ancho de banda prohibida E_g dada en [electrónVolt] o en [nm], por lo tanto si se desea que un LED emita en algún color el criterio de selección es el ancho de banda prohibida E_g , mas a la izquierda se observa la respuesta que tiene el ojo humano ante los diferentes colores de la región visible.

2.4) TÉCNICAS DE FABRICACIÓN DE DIODOS EMISORES DE LUZ.

Las técnicas para fabricar dispositivos semiconductores (tales como diodos, LED'S, transistores, etc.) de manera muy general se pueden clasificar en dos, que son la técnica planar⁶ y la epitaxial⁷, la primera consiste en difundir una cierta concentración de impurezas (las impurezas tienen la propiedad de cambiar el tipo de conductividad en los semiconductores) en un material base o sustrato a una profundidad predeterminada, esta profundidad depende de varios parámetros un valor típico es de 1.5 [μm].

En la segunda técnica se crecen o depositan capas epitaxiales (ver cap. 3.3), el espesor de estas depende de la técnica y del diseño del LED.

Esta segunda técnica es la mas apropiada para realizar LED's fundamentalmente por el tipo de materiales semiconductores y es la que se usa en este trabajo.

Dentro de la técnica planar hay diferentes procedimientos, por mencionar algunos que regularmente se usa para silicio está el proceso de difusión en estado sólido figura 2.4a⁸, la cual fue desarrollada en 1956 y da un control preciso del perfil de impurificación o variación de la concentración de las impurezas con la distancia (se usa por ejemplo, como impurificante el boro en forma de tribomuro de boro BBr_3).

Dentro de este procedimiento hay una variante que mejora y que da control sobre la geometría de la unión difundida y consiste en colocar una capa de algún material que evite que impurezas donadoras o aceptoras se difundan en toda el área. Un ejemplo típico se muestra en la figura 2.4b, en la cual se crece una capa de óxido de silicio sobre silicio con un grosor de aproximadamente 1 [μm]. Con la ayuda de técnicas litográficas (Por ejemplo fotolitografía de rayos x o litografía por haz de electrones), se grabaran zonas donde se desea la introducción de impurezas y posteriormente se eliminaran estas zonas de óxido por medio de una solución química quedando ventanas o patrones.

Las impurezas solo se difundirán a través de las ventanas. Este es el principal proceso de producción de dispositivos de semiconductores y circuitos integrados⁹. Otro procedimiento basado en el anterior que da un control mas preciso del perfil de impurificación, es la implantación ionica¹⁰ figura 2.4c. Este se realiza a temperatura ambiente y los daños que pudieran ocurrir en la red debida a la implantación se eliminan con un recocido a una temperatura del orden de 700 [$^{\circ}\text{C}$]. La implantación iónica es un proceso que se realiza a temperaturas bajas y comparada con la de difusión, que se realiza generalmente a 1000 [$^{\circ}\text{C}$], es una ventaja.

En relación a la técnica epitaxial, este proceso de crecimiento se puede efectuar en fase de líquida (LPE)¹¹ o en fase vapor (VPE)¹². De esta última existen varios procedimientos como son: epitaxia en fase de vapor con haluros¹³, epitaxia en fase de vapor usando organometálicos (MOCVD)¹⁴ y epitaxia por haces moleculares (MBE)¹⁵, con estas 2 últimas técnicas se obtiene un control preciso de la composición del semiconductor en el

rango de dimensiones atómicas, con la diferencia que la MBE es mas cara que MOCVD.

Una estructura de LED sin montar y sin encapsulado, realizada por epitaxia se presenta en 2.4d¹⁶.

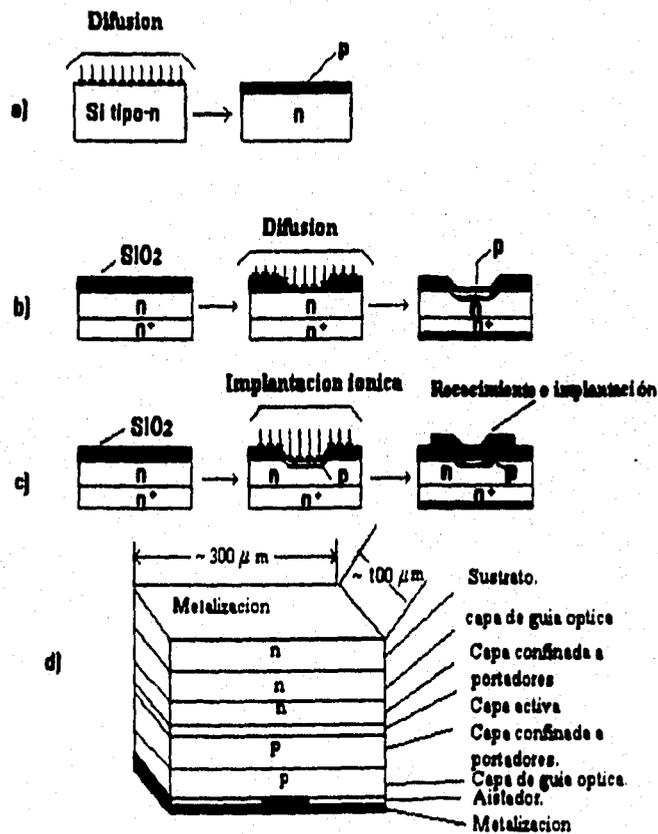


Fig. No 2.4.- Algunas técnicas de fabricación de uniones p-n. a) Por difusión. b) Por difusión controlada. c) Por implantación ionica y d) estructura terminada por epitaxia. En las figuras no se muestran todos los pasos de fabricación¹⁷.

En la figura 2.4a primeramente se tiene el material base o sustrato de algún tipo de conductividad, en este caso se presenta de tipo n, luego se hace incidir un flujo de impurezas del tipo contrario a la del sustrato, en este caso tipo p o huecos, que luego por difusión penetran el sustrato formando una capa tipo p, los contactos eléctricos se colocan en los extremos del sustrato. En la figura 2.4b se tiene el mismo sustrato, con la diferencia que en la parte de abajo se tiene una concentración de electrones más alta denotada por el símbolo n⁺, esto con el propósito de tener un mejor acoplamiento en el

contacto eléctrico, en la parte de arriba del sustrato se colocó una capa de dióxido de silicio que luego por técnicas litográficas se abrieron ventanas o zonas donde queremos que se introduzcan las impurezas, teniendo ya hechas las ventanas se hace incidir las impurezas como en el caso anterior. En la figura 2.4c se tiene el mismo procedimiento que en la figura 2.4b con la diferencia de que aquí no se hace introducir las impurezas por medio de un flujo sino que se implantan por medio de un haz de impurezas que van a velocidad alta, dejando una zona dañada, por eso en el último paso se les hace un tratamiento térmico o recosen a temperaturas altas (1200 °C) para volver al material su misma estructura atómica. En la figura 2.4d las impurezas se hacen llegar al sustrato por medio de un flujo, pero aquí las impurezas no se difunden como en los casos anteriores, sino que se van acomodando en la misma forma en la que están ordenados los átomos del sustrato, por lo tanto se va creciendo una capa con la misma estructura atómica del sustrato, la ventaja de la técnica de epitaxia es que se pueden tener infinitas de capas de diferentes tipos, por lo tanto esta técnica sirve para fabricar dispositivos complejos.

2.5) ALGUNAS APLICACIONES.

El desarrollo de los LED's de semiconductores ha tenido una evolución rápida, su aparición en el mercado es ya de 25 años y tiene una gran variedad de aplicaciones por ejemplo en el campo de señalización o que muestran el estado de algún sistema o subsistema y en dispositivos de despliegue como los arreglos de LED's para dar la forma de un dígito. En general se ha obtenido un incremento muy rápido en su eficiencia además de un notable decremento en su costo.

Además del fácil manejo, costo bajo, compatibilidad con los modernos dispositivos electrónicos de silicio, además de los requerimientos de potencia baja, operación en voltaje bajo, tamaño pequeño, conmutación rápida, vida larga y su tecnología de manufacturación, hacen del LED muy útil en muchos campos.

Con la evolución rápida de las computadoras es necesario el despliegue de información en forma simbólica como por ejemplo letras, números y símbolos especiales.

La forma del despliegue numérico decimal usado casi universalmente en todo tipo de instrumentación electrónica utiliza este tipo de dispositivos.

Debido a la velocidad de transición alta de un estado a otro (de 1's a 0's) los LED's acoplados con fotoresistencias de silicio nos pueden proporcionar una conmutación aislada y pueden ser usados como elementos sensores¹⁷ (por ejemplo la lectura de una tarjeta de datos en donde la información se contiene en forma de agujeros). La relación señal-ruido es semejante a los detectores típicos en un orden de magnitud mejor que la que corresponde a las lámparas de filamento o lámparas incandescentes¹⁸.

Los LED's se pueden dividir en 3 grupos, de acuerdo a los materiales con que se fabrican.

- 1.- Semiconductores de banda de energía indirecta (Por ejemplo el GaP)¹⁹.
- 2.- Semiconductores de banda de energía directa (como algunos semiconductores compuestos como GaAs, InSb)²⁰.
- 3.- Infrarrojos semejantes a los diodos de GaAs con capa fluorescente²¹, esta capa sirve para magnificar la luz proveniente del LED como en el caso de un televisor

En la figura 2.5 se hace una comparación de estos tres grupos de dispositivos anteriormente mencionados en tres áreas: generación de luz, velocidad de conmutación y producción de color. El área sombreada de los triángulos de las esquinas indica los rangos de trabajo de cada diodo. Como se observa el diodo de GaP es el más eficiente en generación de luz, en tiempo de conmutación, el diodo de GaAs con Zn es el mejor por eso su uso en dispositivos de microondas, por ejemplo el diodo gun²².

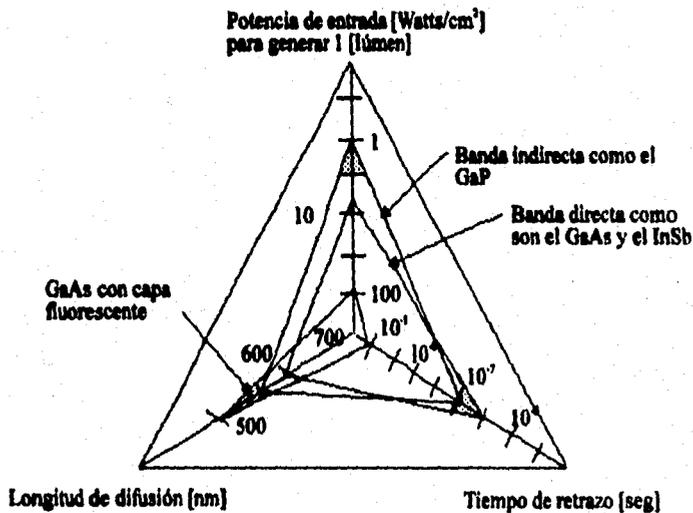


Fig. 2.5.- Comparación de los 3 grupos de LED's²².

La primera aplicación comercial de los LED's fue de luz indicadora y de despliegue de señal. La eficiencia de la generación de luz es probablemente el parámetro más importante. El tener una generación de luz alta en principio es indicativo que el LED está bien diseñado²⁴.

Basados en los requerimientos de potencia luminosa, los LED's se pueden clasificar en tres grupos de aplicaciones:

- 1.- Despliegues simbólicos.
- 2.- Luz indicadora.
- 3.- Despliegues panorámicos.

En la aplicación primera, para el despliegue simbólico se requieren usualmente de un gran número de LED's que se encienden simultáneamente, la potencia luminosa de salida requerida por diodo está en el rango de 0.5 a 2 [mililúmen]. Estos dispositivos se hacen en la forma tradicional, con las memorias y las funciones lógicas necesarias.

Para indicadores en donde se requiere de luz confortable a no más de 3 [metros], se requiere de una potencia luminica de salida de 6 a 10 [mililúmen].

Finalmente en presencia de una luz ambiental alta, o que se puedan observar a distancias grandes como los medidores indicadores de las oficinas centrales telefónicas grandes, se requerirá de una potencia alta de salida de 60 a 100 [mililúmen].

El recuadro siguiente, figura 2.6, nos indica la potencia luminica que desarrolla cada material semiconductor en función de la potencia de entrada.

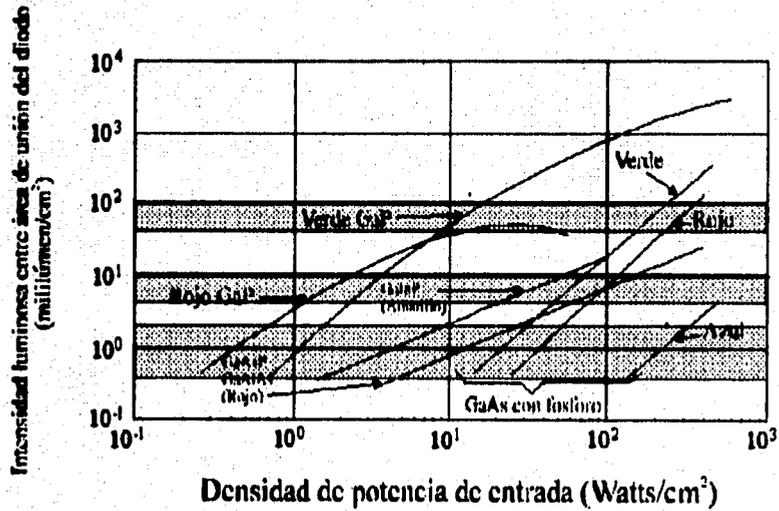


Fig. 2.6.- Relación potencia de entrada [Watt/cm²] contra potencia de salida [lúmen/cm²] se observan también los 3 rangos de trabajo para cada aplicación²⁵.

Los diodos emisores de luz tuvieron sus primeras aplicaciones como indicadores luminosos. Actualmente se usan también los láseres (que son estructuras mas complejas), los cuales fundamentalmente se derivan de los LED's. Se tiene un gran campo de investigación para estos dispositivos ópticos, debido a que siempre se tendrán que indicar por medio luminoso el estado de un equipo o parte de un equipo, aparte de las aplicaciones que pueden hacerse, de ellos, en los sistemas de comunicaciones ópticas, por ejemplo los LED's infrarrojos de GaAs²⁶.

En la tabla siguiente se resumen todas las aplicaciones de los LED's mencionadas en este capítulo.

Tabla

Tipo de LED	Característica o utilidad
Hemisférico, esférico truncada, parabólico.	Direccionalidad en el patrón de radiación.
Encapsulado en forma rectangular.	En segmentos para formar letras o dígitos.

Fabricados con diferentes tipos de materiales.	Emisión de luz con diferente longitud de onda.
De banda directa.	Gran potencia luminosa.
De banda indirecta.	Velocidad alta de conmutación.
Con capa fluorescente.	Mayor realce en la emisión de luz.
Con diferentes potencias luminosa.	Dependiendo el requerimiento de potencia.

Referencias:

- 1) A. A. Bergh y P. J. Dean "Light Emitting Diodes", Clarendon Oxford, 1976.
- 2) S. V. Galginaitis "Improving The External Efficiency of Electroluminescent Diodes", *Appl. Phys. Lett.*, **3**(1965)173.
- 3) W. D. Appar, W. H. Duffy, H. E. Elder, y P. E. Fralcy, "A gallium Phosphide light emitting diode designed for high volume production," in Proc. 1970 IEEE Conf. Display Devices (New York, Dec. 1970).
- 4) A. A. Bergh y B. H. Johnson, "A Solid future for telephone lamps," *Bell Lab. Rec.*, vol. 47, pp. 320-326, Nov. 1969.
- 5) A. A. Bergh y P. J. Dean, *Light-Emitting Diodes*, Clarendon Oxop.
- 6) J. A. Hoernl, "Planar Silicon Transistor and Diodes", IRE Electron Devices Meet., Washington, D. C., 1960.
- 7) H. C. Theuerer, J. J. Kleimack, H. H. Loar, and H. Christenson, "Epitaxial Diffused Transistor", *Proc. IRE*, **40**(1960)1642.
- 8) M. Tanenbaum and D. E. Thomas, "Diffused Emitter and Base Silicon Transistor", *Bell Syst. Tech. J.*, **1**(1956)35.
- 9) R. H. Dennard, F. H. Gaensslen, E. J. Walker, and P. W. Cook, 1 μ m MOSFET VLSI Technology: Part II Device Designs and Characteristics for High Performance Logic Applications, *IEEE Trans. Electron Dev. De-26*(1979)325.
- 10) K. A. Pickar, "ion implantation in Silicon-Physics, Processing and Microelectronics devices, in R. Wolfe, *De Applied Solid State Science*, Vol. 5, Academic, New York, 1975.
- 11) L. R. Dawson, Liquid Phase Epitaxy, in *Progress in Solid State Physics*, Vol. 7, H. Reiss, and J. O. McCaldin, Eds., Pergamon, New York, 1972, Chap. p. 117.
- 12) C. H. J. Van Den Breket, Characterization of the Chemical Vapor Deposition Process, Philips Research Rep. **110**(1977)32.
- 13) J. R. Knight, D. Effer, and P. R. Evans, The Preparation of High Purity Gallium Arsenide by Vapor Phase epitaxial Growth, *Solid State Electron*, **17**(1965)8.
- 14) H. M. Manasevit and W. Y. Simpson, The Use of Metal-Organics in the Preparation of semiconductor Materials: Y. Epitaxial Gallium-V Compounds, *J. Electrochem. Soc.* **173**(1969)116.
- 15) D. C. Gupta, Improved Methods of depositing Vapor Phase Homoepitaxial Silicon, *Solid State Technol.*, p. 33(Oct. 1971).
- 16) M. Eitenberg, H. Kressel, and J. P. Witke, "Very High radianse Edge-Emitting LED", *IEEE. J. Quantum. Electron.*, QE-12(1979)360.
- 17) A. G. Grove, *Physics and Technology of Semiconductor Device*, Wiley, New York, 1967.
- 18) R. N. Hall and W. C. Dunlap, "p-n Junctions Prepared by Impurity Diffusion," *Phys. Rev.*, **80**, 467(1950).
- 19) *Optoelectronics applications Manual*, H. P. Mac Graw-Hill. cap. 3.
- 20) *Semiconductor Devices and Integrated electronics* of Milnes cap. 3..
- 21) "Light Emission Diodes" of Bergh and Deqan, cap. 4.
- 22) O. Madelung, *Physics of III-V Compounds*, Wiley, New York, 1957.
- 23) Welker, H., *Über neue halbleitende Verhijnungen*, *Z. Naturf.* **744**(1952)11.
- 24) "Light Emission Diodes" of Bergh and Deqan, cap. 4.
- 25) *Proceedings of IEEE*, vol. 60, No. 2, pp. 213 February 1972.
- 26) *Optoelectronics applications Manual*, H. P. Mac Graw-Hill, pp. 2. 3 - 2.6.

CAPÍTULO 3

FABRICACIÓN DE UNIONES p-n

- 3.1) Introducción.**
- 3.2) DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS DE FABRICACIÓN.**
 - 3.2.1) TÉCNICA Epitaxia en Fase líquida LPE.**
 - 3.2.2) TÉCNICA Epitaxia en Fase Vapor VPE.**
 - 3.2.3) TÉCNICA Epitaxia por Haces Moleculares MBE.**
 - 3.2.4) TÉCNICA Depósito de Vapor Químico usando Organometálicos MOCVD.**
- 3.3) OBTENCIÓN DE PELÍCULAS EPITAXIALES.**
 - 3.3.1) Sistema para depósito de películas de GaAs por MOCVD.**
 - 3.3.1.1) Unidad de control de gases.**
 - 3.3.1.2) Reactor.**
 - 3.3.1.3) Unidad de calentamiento.**
 - 3.3.1.4) Unidad de desalojo de gases.**
- 3.4) CRECIMIENTO DE PELÍCULAS DE GaAs.**
- 3.5) CRECIMIENTO DE UNIONES p-n DE GaAs.**

3.1) Introducción.

En este capítulo se describirá la metodología seguida para la fabricación de los diodos electroluminiscentes de arseniuro de galio (GaAs) por la técnica de Depósito Químico en Fase de Vapor usando Compuestos Organometálicos (MOCVD)¹. Esta técnica es una de las más adecuadas para sintetizar semiconductores compuestos de la familia III-V², los cuales se preparan con los elementos de los grupos III y V de la tabla periódica. Otros ejemplos de compuestos semiconductores que se preparan por MOCVD son InP, InSb, GaInAs, AlGaAs, GaInAsP, etc. Estos semiconductores se utilizan para construir diferentes tipos de dispositivos como son LÁSER, HFET.

La técnica de MOCVD permite depositar capas epitaxiales sobre sustratos de diferente naturaleza y en particular sobre sustratos monocristalinos. En este último caso las capas que se crecen siguen la misma estructura del sustrato.

Un sistema MOCVD permite obtener estructuras con las diferentes capas que requiere un dispositivo, las cuales tienen diferentes funciones como regiones activas, capas colchón y capas de acoplamiento metal-semiconductor o contactos óhmicos.

Hoy en día se conocen ampliamente 4 técnicas para depósito de capas epitaxiales, la de Epitaxia en Fase Líquida (LPE)³ y la de Epitaxia en Fase Vapor (VPE)⁴, han tenido buenos resultados en la investigación y producción de dispositivos. Las otras dos son la técnica de epitaxia por Haces moleculares (MBE)⁵ y de (MOCVD), con estas últimas se están desarrollando dispositivos que requieren control de las capas epitaxiales a nivel atómico, de ahí el interés de conocerlas.

En la tabla 3.1 se indican las características más importantes de las técnicas mencionadas, sus ventajas y desventajas.

Tabla 3.1

	LPE	VPE	MBE	MOCVD
Razón de crecimiento típico ($\mu\text{min.}$)	0.1 - 1.0	0.05 - 0.3	0.001 - 0.03	0.01 - 0.3
Temperaturas típicas del sustrato ($^{\circ}\text{C}$)	850	750	550	650
Proceso	Sobresaturación de una solución por variaciones en la temperatura (Proceso reversible).	Reacción de HCl y Ga a 850 $^{\circ}\text{C}$. Después reacción de GaCl y AsCl ₃ sobre el sustrato a 750 $^{\circ}\text{C}$ (Proceso reversible).	Evaporación de Ga y As en vacío ultra alto (Proceso irreversible).	Descomposición pirólítica de los compuestos organometálicos e hidruros sobre el sustrato (proceso irreversible).
Morfología	Dificultad para la obtención de capas homogéneas y delgadas en áreas grandes.	Muy buena si se controlan bien las condiciones de crecimiento.	Muy buena.	Muy buena comparable a MBE.
Impureza residual (cm^{-3})	Muy baja 10^{13}	Baja 10^{14}	Algo alta 10^{15}	Baja 10^{14}
Control de impurezas (cm^{-3})	10^{14} - 10^{19}	5×10^{14} - 10^{19}	5×10^{16} - 10^{19}	10^{15} - 10^{20}
Producción a gran escala	Limitada	Buena	Limitada	Buena
Problemas a gran escala	Morfología: mojado inhomogeneo, removido de las mezclas, limitación de impurezas. Dificultad para crecimiento de InP.	Se requiere muy buen control de los parámetros de crecimiento. Reactor con dos zonas de temperatura. Empleo de reactivos muy tóxicos (AsCl ₃).	Requiere de vacío muy alto (10^{-9} Atms.) lo que incrementa el costo del sistema. Dificultad para crecimiento de compuestos III - V, que contiene fósforo.	Empleo de gases muy tóxicos (AsCl ₃). Sensible a parámetros como la geometría del reactor y variaciones de presión.
Ventajas	Sistema de costo bajo.	Ideal para capas delgadas con pureza alta (GaInAs y GaInAsP).	Desarrollo de super-redes para GaAlAs/GaAs. Primeros reportes de MESFET's de GaInAs/GaInAs.	Desarrollo alto en LASER de GaAlAs/GaAs. Versatilidad alta y costo bajo.

3.2) DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS DE FABRICACIÓN.

En seguida se hará una breve descripción de las técnicas epitaxiales mencionadas. Puesto que, como se mencionó en la introducción, usaremos la de MOCVD para fabricar los LED's, nos extenderemos un poco mas en esta última.

3.2.1) TÉCNICA LPE.

La técnica de epitaxia en fase líquida a través de la precipitación directa en fase líquida sobre un sustrato. La solución líquida esta constituida por un solvente (A) y el soluto (B), además de las impurezas (T).

El crecimiento se realiza por la difusión del soluto hacia el sustrato a través de una capa frontera líquida. Suponiendo un gradiente lineal de concentración, el flujo del soluto en [átomos/cm²/s] está dado por:

$$J = D(\partial C / \partial x) = D(C_s - C_e) / \delta \quad (3.1)$$

Esta ecuación se le llama ecuación de Henry⁶, donde **D** es la constante de difusión del soluto [cm²/s] en el líquido. Mencionaremos simplemente que esta constante depende de la temperatura y de la energía de activación para la difusión, δ es el ancho de la capa de frontera [cm].

C_s es la concentración del soluto en fase líquida y C_e la concentración en equilibrio del soluto en la superficie del sustrato.

Los sistemas usados para hacer crecer capas epitaxiales son básicamente dos, los verticales y los horizontales, se diferencian por la incidencia del flujo de reactivos en la oblea (sustrato) si es vertical u horizontal de ahí su nombre. En cualquier caso se formará una capa frontera, a través de la cual llegan los reactivos al sustrato.

Para LPE solo existe el sistema horizontal esta se muestra en la figura 3.1, aquí el sustrato se puede sumergir o colocar en la superficie de la solución. La capa frontera se forma entre el líquido (solución) y el sustrato, en el dibujo se indica con líneas cortadas.

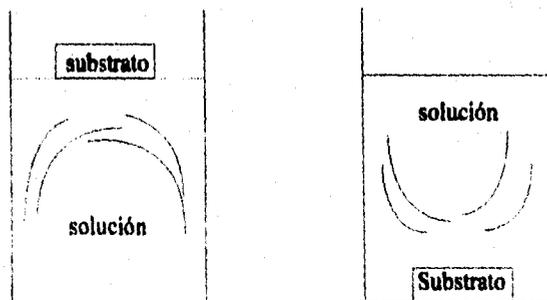


Fig. 3.1.- Diferentes consideraciones de crecimiento horizontal⁸.

Algunas desventajas de esta técnica son: Mala uniformidad del espesor, no es adecuado para la producción en masa y no se usa para el silicio.

Algunas ventajas: Razones de crecimiento alta, temperaturas de crecimiento baja y permite el decapado IN-SITU o que mientras se crece se puede tener un decapado⁸.

3.2.2) TÉCNICA VPE.

Aquí los reactivos son transportados en fase vapor, esto se logra con un burbujeador que permite controlar la presión de vapor de estos reactivos. Los sistemas empleados son normalmente de tubo abierto para desalojar los reactivos no utilizados y se usa hidrógeno como gas portador.

El conjunto de reacciones que se dan en el sustrato es compleja, es función de la temperatura y presión parcial de los reactivos en la superficie.

En general la manera en que ocurre el proceso se puede expresar de manera sencilla en términos de la concentración de los reactivos en el flujo de gas (N_g).

La ecuación de densidad de flujo es equivalente a la usada en la técnica LPE y esta dada por:

$$J = -D(\partial N / \partial x) = -D/\delta(N_g - N_s) \quad (3.2)$$

Donde N_g es la concentración en el gas, N_s es la concentración en la superficie del sustrato, J número de moléculas del reactante por unidad de área por unidad de tiempo, δ es el ancho efectivo de la capa frontera. D es el coeficiente de difusión que normalmente es proporcional a T^m donde m está entre 1.75 y 2⁹.

3.2.3) TÉCNICA MBE.

Esta técnica, llamada también evaporación en vacío, es muy útil para estudiar los procesos de depósito de películas epitaxiales.

Esta técnica en principio es idéntica a las otras dos pero es diferente en detalles de operación como: La razón de alimentación al sustrato es de muchos ordenes de magnitud mas baja. La necesidad de tener vacío alto (de 3 a 4 ordenes menor que la presión atmosférica) es para evitar contaminación del sustrato y así aumentar el recorrido libre medio de las moléculas. Con esto se consiguen materiales puros altamente.

La técnica MBE es muy utilizada para el estudio de compuestos semiconductores mas complejos que los binarios, donde el control preciso de múltiples impurezas a temperaturas bajas en el proceso de depósito son imprescindibles.

3.2.4) TÉCNICA DE MOCVD.

Esta técnica es una variante de la VPE y se diferencia de esta por el uso de compuestos metal-orgánicos.

Los primeros experimentos que se realizaron para la obtención de películas con esta técnica fueron hechas por Didchenko en 1960 y por Harrison y Tompkins en 1962, pero los

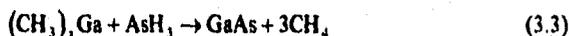
reportes primeros que se tuvieron usando propiamente el sistema (MOCVD) aparecieron en 1969¹¹.

Convencionalmente los crecimientos de los compuestos III - V fueron hechos por el proceso de epitaxia en fase de vapor y por epitaxia en fase líquida. Sin embargo estos procesos no son muy convenientes para la producción industrial como lo es el proceso MOCVD el cual tiene como principales ventajas: a) La capacidad de crecer en áreas grandes; b) Un control preciso sobre el grosor de la películas; c) Pureza alta de las capas (dopajes pequeños) y d) Facilidad de automatización.

Normalmente los precursores del grupo III son alquitos sencillos por ejemplo de Al, Ga e In, comúnmente son trimetil. Los precursores del grupo V son los hidruros (AsH_3 , PH_3), aunque están en desarrollo sistemas que usan compuestos menos peligrosos. Uno de ellos fue el que se empleó para desarrollar los LED's que se reportan en este trabajo¹³.

La estequiometría global de la reacción química se controla con los flujos de hidrógeno que se hacen burbujear por los compuestos organometálicos.

Todo el proceso para depósito de GaAs se desarrolla según la ecuación,



debe tenerse en cuenta que el proceso es mucho más complejo¹². El producto de la reacción es metano y posiblemente etano. A las temperaturas típicas de crecimiento estos gases no contaminan a las capas epitaxiales.

Esta técnica es muy atractiva debido al hecho que el trimetilgalio (TMG) o $(\text{CH}_3)_3\text{Ga}$ puede ser transportado en fase de vapor por medio de un burbujeador. La presión de vapor de TMG se controla por la temperatura a la que se mantiene el contenedor del organometálico.

El flujo de arsina (AsH_3) se controla fácilmente dado que está en fase vapor.

Todas estas especies llegan al sustrato por difusión a través de la capa frontera.

La reacción es irreversible en el rango de temperaturas en la cual se pueden crecer las capas (500 - 1000 [°C]). A temperaturas altas se consigue una mejor calidad del cristal pero a la vez se crean más vacancias. De 650 - 750 [°C] se considera un óptimo rango para el crecimiento. La razón de crecimiento es función lineal de la presión parcial del TMG, típicamente la razón de crecimiento es de aproximadamente 0.1 [$\mu\text{m}/\text{min}$].

Para obtener películas de calidad alta con esta técnica requiere de temperaturas bajas de crecimiento y una sobrepresión alta de arsina para evitar la descomposición del GaAs.

Los problemas asociados con la pureza de los elementos del grupo III han sido resueltos por los nuevos métodos de síntesis y purificación. Los hidruros del grupo V, como AsH_3 y PH_3 hace algunos años contenían trazas de O_2 y H_2O lo cual resultaba en materiales de calidad muy mala, especialmente cuando se mezclaban con el Al.

El crecimiento de películas de calidad alta se investiga por medio del proceso alternativo de MOCVD incluyendo sistemas a presiones bajas y plasmas¹⁴, el plasma es una atmósfera de electrones que están a energías altas (10 - 15 [electrónVolts], esto se logra teniendo una atmósfera de algún gas inerte como el Argón aplicando campos eléctricos y magnéticos altos como de 20 [kilovoltios] y 10 [Kilogauss] respectivamente), que ayudan a disociar a las moléculas de los reactivos, por lo tanto la presencia de plasma ayuda a depositar películas a temperaturas más bajas.

3.3) OBTENCIÓN DE PELÍCULAS EPITAXIALES.

Primeramente se requiere de un gas portador altamente puro que conduzca a los diferentes elementos precursores, este gas usualmente es hidrógeno, el cual es burbujeado en los contenedores de compuestos organometálicos (TMGa, TMIIn, etc.), los vapores que se obtienen se mezclan con los hidruros (AsH_3 , PH_3 , etc.) y son conducidos hasta el sustrato. Sobre el sustrato ocurre el proceso de pirólisis que consiste en la descomposición térmica de las moléculas en el rango de 400-900 [°C]. Posteriormente por difusión los átomos se van acomodando en el sustrato siguiendo la misma estructura cristalina con lo que se obtendrán las películas (GaP , GaAs , etc.).

En la figura 3.2, se ilustra la forma en que van acomodándose los átomos de Ga y As al formarse una película epitaxial de GaAs.

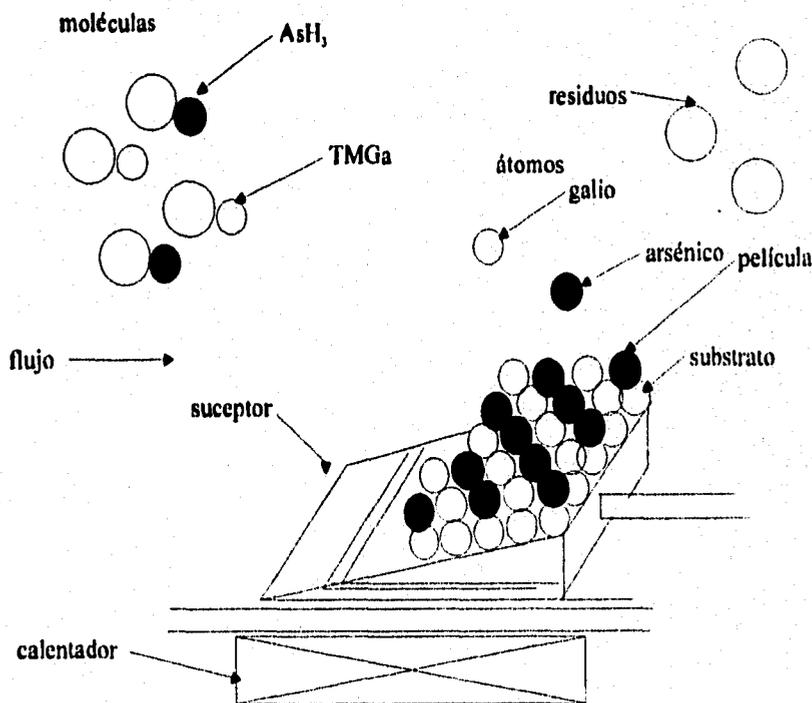


Fig. 3.2.- Proceso pirólitico.

La ventaja de este método es que se pueden hacer películas tipo-p o tipo-n de manera muy simple.

Únicamente se introduce, también en fase vapor, a la impureza requerida; así se usa zinc para obtener GaAs tipo-p y silicio tipo-n.

Algunos ejemplos de otras películas semiconductoras de los compuestos III - V que pueden prepararse por MOCVD se dan en la tabla No 3.2.

Tabla 3.2

SEMICONDUCTOR	REACTIVOS
GaAs	TMGa - AsH ₃ ó TEGa - AsH ₃
GaP	TMGa - PH ₃ ó TEGa - TEP
GaAs _{1-x} P _x	TMGa - AsH ₃ - PH ₃
Ga _{1-x} Al _x As	TMGa - TMAI - AsH ₃ TEGa - TMAI - AsH ₃
AlAs	TMAI - AsH ₃
AlN	TMAI - NH ₃
GaN	TMGa - NH ₃ ó TEGa - NH ₃
InAs	TEIn - AsH ₃
Ga _{1-x} Al _x In	TEGa - TEIn - AsH ₃
InAs _{1-x} P _x	TEIn - AsH ₃ - PH ₃
InSb	TMin - SbH ₃
GaSb	TMGa - TMSb ó TEGa - TESb
GaInAsP	TMGa - TEIn - AsH ₃ - PH ₃
Ga _{1-x} In _x P	TEIn - TEGa - PH ₃
Al _y Ga _{1-x-y} In _x P	TEAl - TEGa - TEIn - PH ₃
InAs _{1-y} Sb _y	TEIn - TESb - AsH ₃
InP	TEIn - PH ₃ ó TMin - PH ₃

Algunos dispositivos que se obtienen usando esta técnica se indican en la tabla No 3.3.
Tabla 3.3

MATERIAL	DISPOSITIVO
GaAs	MESFET's Diodos
GaAs/GaAlAs	MESFET's Celdas solares Fototransistores Fotocátodos Láseres (DH, pozos cuánticos, etc.)
InP	Diodos Gunn Celdas solares
GaInAsP/InP	IMPATT's FET's

3.3.1) Sistema para depósito de películas de ARSENIURO DE GALIO (GaAs) por MOCVD.

El sistema MOCVD consta de:

- 1.- Unidad de control de gases.
- 2.- Reactor.
- 3.- Unidad de calentamiento.
- 4.- Unidad de desalajo de gases.

En el diagrama a bloques siguiente se presenta la interrelación de los diferentes subsistemas, y en seguida se describirán brevemente.

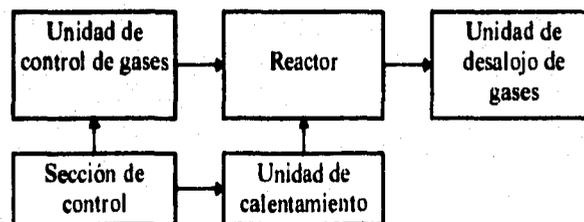


Fig. 3.3.- Diagrama a bloques del sistema MOCVD¹³.

En la figura 3.4 se presenta la configuración del reactor, se observan los distintos caminos que siguen los flujos que intervienen, también se observan las dos unidades de

calentamiento, una de ellas rodea en una sección al reactor la cual sirve para sublimar o evaporar al arsénico y la otra, colocada abajo del sustrato, sirve para la formación de las capas epitaxiales.

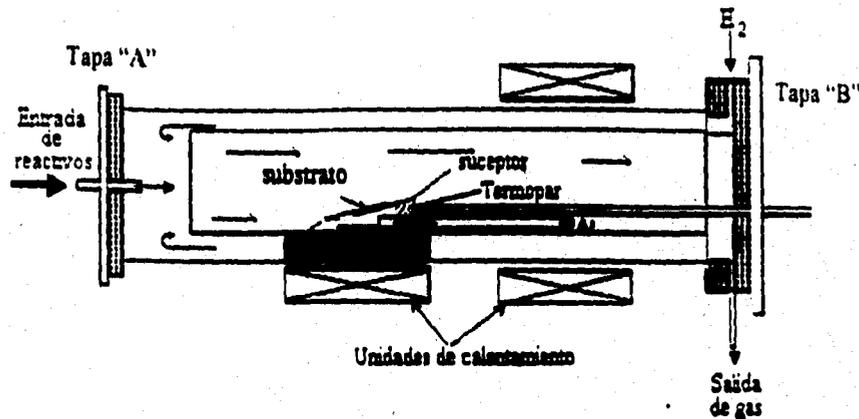


Fig. 3.4.- Proceso organometálico¹¹.

3.3.1.1) Unidad de control de gases.

Como su nombre nos dice este subsistema ayuda a tener un control preciso de los reactivos que conformarán al semiconductor, con las condiciones que precisa el tener elementos puros altamente y por otra parte se debe de tener un amplio margen de seguridad por la peligrosidad de manejar gases y compuestos como el SiH_4 , el cual es tóxico, y los organometálicos TMGA y DEZ que son pirofóricos.

Este equipo, según su funcionalidad, debe de cumplir lo siguiente:

- Pureza en los compuestos y gases de purga.
- Control preciso en las cantidades de suministro.
- Control para abrir y cerrar los flujos de los reactivos considerados en el proceso.
- Seguridad y funcionalidad en el manejo de los compuestos y gases de purga.

Para cubrir estos requerimientos se necesita de los componentes siguientes:

- Purificador de H_2 .
- Controladores de flujo de masa.
- Controladores de temperatura por inmersión.
- Válvulas y electroválvulas.
- Compuestos y gases.
- Sección de control.

En las figuras 3.5 se presentan estos elementos

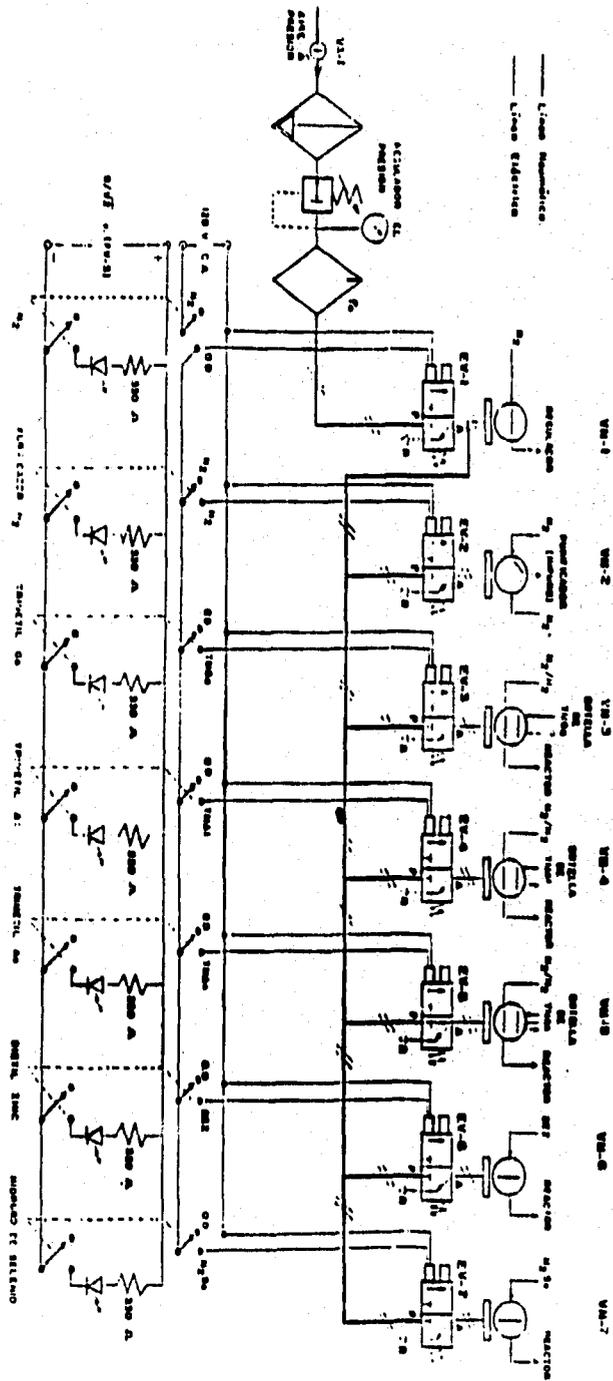


Fig. 3.5a.- Elementos que constituyen la unidad de control de gases

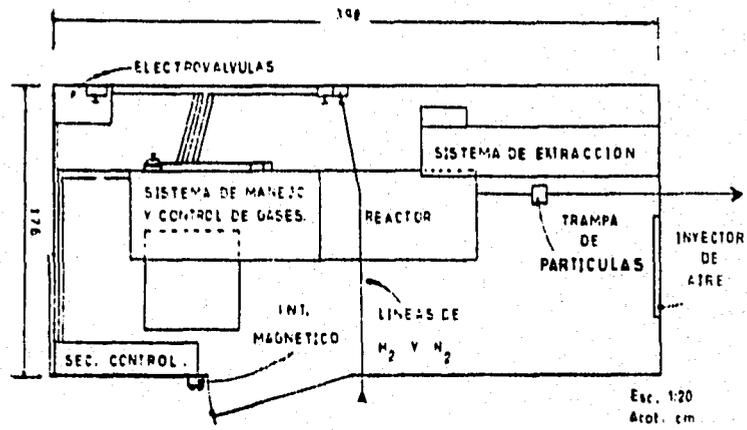


Fig. 3.5b.- Localización de las secciones del sistema MOCVD.

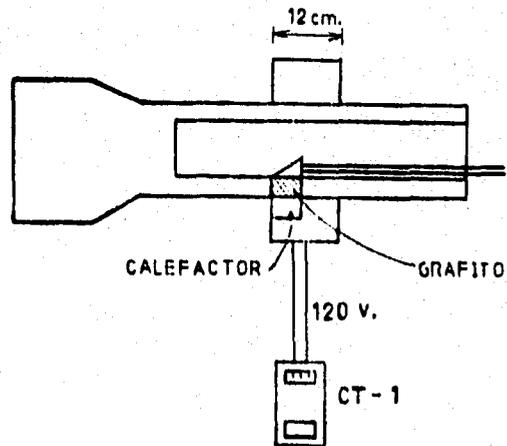


Fig. 3.5c.- Unidad de calentamiento.

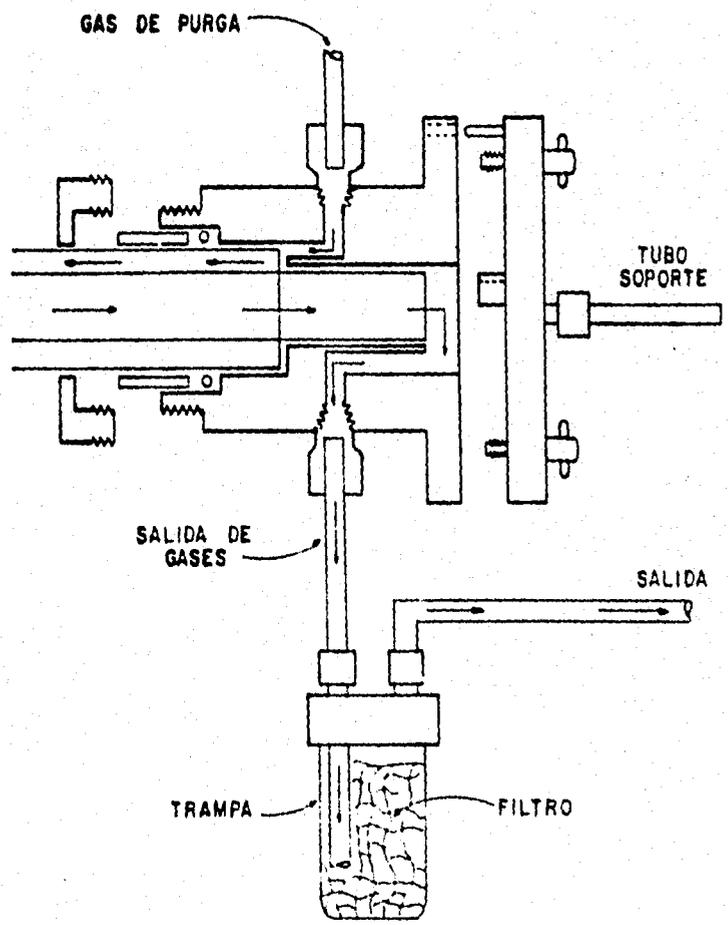
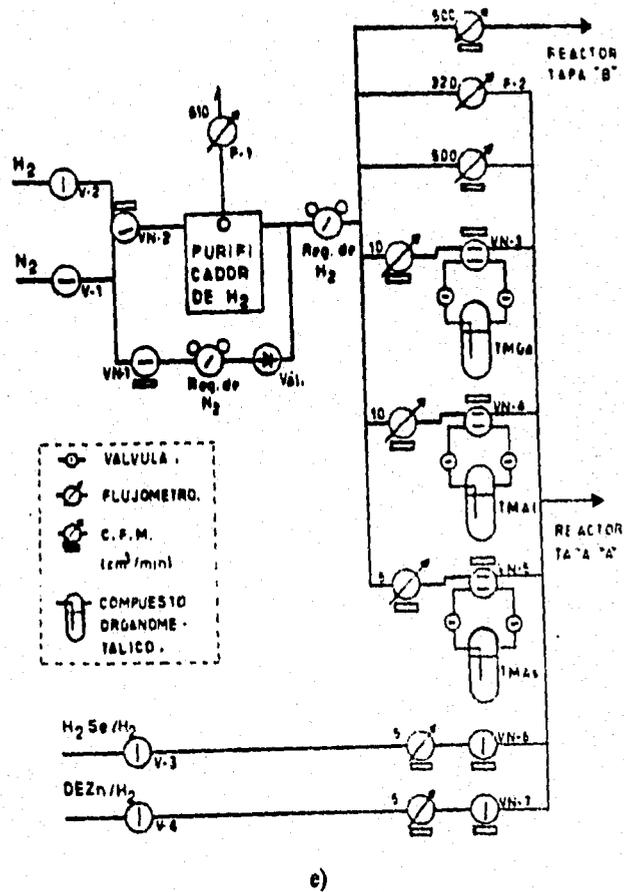


Fig. 3.5d.- Unidad de desalajo de gases.



f)

Hidrógeno de selenio	Distil Zinc	Tritorio Arsenico	Tritorio Aluminio	Tritorio Germanio	Purificador de Hidrogeno	Mercurio
 Flujometro						
<input type="checkbox"/> Abierto <input type="checkbox"/> Cerrado						
 Controlador de flujo de masa						

Fig. 3.5.- c) Sistema MOCVD y f) sección de control.

3.3.1.2) Reactor.

El reactor es un tubo de cuarzo que sirve para efectuar la mezcla de los diferentes reactivos y para realizar el proceso de pirólisis. Este reactor tiene la capacidad de soportar las diferentes temperaturas de trabajo que están en el intervalo de 400-1200 [°C].

Dentro del reactor se encuentra el suscepter que es el soporte del sustrato el cual ayuda a homogeneizar la temperatura en la zona de crecimiento. El material con el que está hecho es grafito, material altamente puro con el que se puede trabajar a temperaturas altas. Para tener un crecimiento homogéneo el suscepter se coloca con un ángulo de inclinación de 5 - 15° con respecto al flujo de los reactivos. Para tener un control preciso de la temperatura del suscepter se coloca un termopar de cromel-alumel dentro de el suscepter por medio de tubo de cuarzo incrustado, como se ve en la figura 3.4.

3.3.1.3) Unidad de calentamiento.

Este subsistema nos permite controlar las temperaturas antes mencionadas y a la vez mantenerlas constantes con el objeto de minimizar los defectos cristalinos.

3.3.1.4) Unidad de desalojo de gases.

Los gases residuales que se obtienen después de haber hecho los crecimientos son metano e hidrógeno principalmente, también pueden ser los compuestos introducidos al inicio del experimento como (TMGa, DEZ, etc.). Hay que tener en cuenta que debido a su toxicidad deben de ser expulsados en forma apropiada.

3.4) CRECIMIENTO DE PELÍCULAS P-N DE GaAs.

Para la preparación de películas epitaxiales de GaAs necesarias para fabricar los diodos emisores de luz se requiere.

- a) Compuestos organometálicos como el trimetil de galio ((CH₃)₃Ga ó TMGa), y arsénico sólido.
- b) Silano (SiH₄), impureza donadora tipo "n".
- c) Dietilzinc ((C₂H₅)₂Zn, DEZ), impureza tipo "p".

El arsénico y los compuestos organometálicos proporcionan los elementos básicos para crecer películas cristalinas de GaAs, las impurezas (Si y Zn) le darán al material el carácter tipo "p" o "n".

La concentración del impurificante en las capas crecidas depende de la temperatura de crecimiento y de la presión parcial del dopante.

La razón de crecimiento de las capas depositadas depende de la temperatura¹⁴ y orientación del sustrato¹³.

3.5) CRECIMIENTO DE UNIONES P-N DE GaAs.

El tipo de estructura que conforma a las uniones p⁺-n se muestra en la figura 3.5.

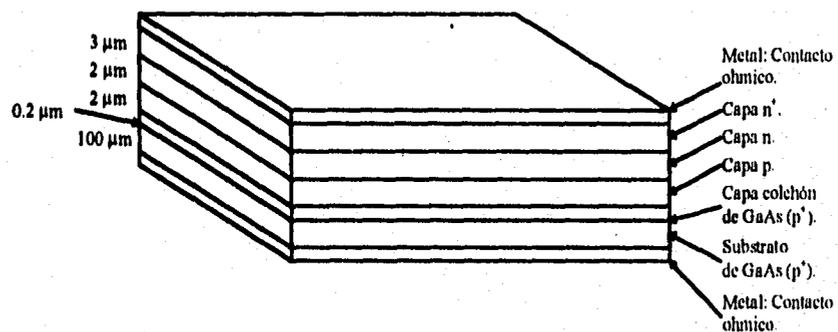


Fig. No 3.5.- Estructura de la unión.

La secuencia de pasos para depositar las diferentes capas para la fabricación de las uniones p-n es la siguiente:

Primeramente se parte de un substrato de GaAs (p⁺) con orientación de los planos cristalográficos es <100> (ver figura 1.1). Este material GaAs, en forma de oblea se vende en el mercado y son de aproximadamente 10 [cm] de diámetro y de 0.5 [μm] de espesor, pueden ser de tipo p⁺ o n⁺.

La oblea primeramente se corta en fracciones de aproximadamente 1 [cm²], esto por limitaciones del tamaño del reactor. Luego se pasa por un proceso de pulido químico, esto es, se rebaja el espesor de la oblea, con esto se consiguen dos propósitos, uno de quitarle los defectos mecánicos producidos en el momento de cortar el lingote de GaAs y dos para limpiarla. Posteriormente el trozo de substrato se introduce en el reactor, el cual se lleva a una temperatura en un rango de 500-1000 [°C]. Finalmente se da paso al reactor a los diferentes compuestos que formaran a las películas epitaxiales.

La secuencia para la formación de la unión p-n es la siguiente: Se parte de un substrato tipo p⁺, con una concentración aproximada de 10¹⁸ [cm⁻³] se hace crecer una primera capa denominada capa colchón de espesor de aproximadamente 0.2 [μm] con la misma concentración que el substrato, que tiene el propósito de seguir la misma estructura atómica que el substrato pero con una calidad superior a la del substrato. Enseguida se hace crecer una segunda capa de las mismas características de la anterior pero con una concentración de aproximadamente 10¹⁶ [cm⁻³] impurezas tipo p, para la realización de estas capas se uso el dietilzinc (C₂H₅)₂Zn para dar el carácter tipo p.

Luego se hace el cambio de impurificante para crecer la capa n con un espesor de aproximadamente 2 [μm] y una impurificación de aproximadamente 10¹⁶ [cm⁻³], esta capa tipo n junto con la tipo p forman la región activa o zona donde se da la emisión radiativa y por último se crece otra capa n de concentración mayor tipo n⁺ de espesor de aproximadamente 3 [μm] e impurificación 10¹⁸ [cm⁻³] esta sirve para hacer la metalización

correspondiente, estas dos últimas capas se depositaron usando silano (SiH_4) para dar el carácter tipo n al GaAs.

Referencias:

- 1) VLSI Fabrication Principles Sorab K. Ghandhi Session pag. 2.15.
- 2) Physics of III - V Compound of Madelung.
- 3) Aparatus for thin layers and Multiple layers Bauser, M. Frik and Schmidt. *Inst. Phys Conf. Soc.* No 24, 1975, chapter 1.
- 4) Growth of GaAs for multiple applications L. Hollan. *Inst. Phys Conf. Soc.* No 24, 1975, chapter 1.
- 5) VLSI Fabrication Principles Sorab K. Ghandhi Session 5.3.5.
- 6) Physics and Technology of Semiconductor Devices of Andrew S. Grove pp. 24-31.
- 7) H. Schlichting, Boundary Layer Theory, 4th de., McGraw-Hill Book Co., 1960, Chapter 7.
- 8) VLSI Fabrication Principles Sorab K. Ghandhi pp, 277, pp, 273.
- 9) D. Shaw. Self- and Impurity-Difusion in Ge and Si. *Phys.Stat. Sol. (b)* 11(1975)72.
- 10) A. Y. Cho and J. R. Arthur. Molecular Beam Epitaxi. Progra., in *Solid State Chem.* 157(1973)10.
- 11) H. M. Manasevit and W. Y. Simpson. The Use of Metal-Organics in the Preparation of Semiconductor Materials: Y. Epitaxial Gallium-V Compounds, *J. Electrochem. Soc.* 1725(1969)116.
- 12) J. R. Knight, D. Effer, and P. R. Evans. The Preparation of High Purity Gallium Arsenide by Vapor Phase Epitaxial Growth. *Solid State Electron.* 178(1965)8.
- 13) Tesis "Desarrollo de un sistema de deposito epitaxial (MOCVD) para semiconductores III - V", de C. Castro Zavala, pag. 58, pag 23.
- 14) R. P. H. Chang, A. J. Polak, D. C. Allara, and C. C. Chang, Physical Properties of Plasma Grown GaAs Oxides, *J. Voc. Sci. Technol.* 888(1979)116.
- 15) D. W. Shaw. Influence of Substrate Temperture on GaAs Epitaxial Deposition Rates. *J. Electrochemical. Soc.* 405(1968)115.

CAPÍTULO 4

CARACTERIZACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS UNIONES p-n OBTENIDAS.

- 4.1) Introducción.**
- 4.2) Métodos de caracterización.**
- 4.3) Característica Corriente - Voltaje - Temperatura (I - V - T).**
 - 4.3.1) Resultados.**
- 4.4) Característica Intensidad luminosa - Longitud de onda ($I_{lum} - \lambda$).**
 - 4.4.1) Resultados.**
- 4.5) DISCUSIÓN DE RESULTADOS.**
 - 4.5.1) Introducción.**
 - 4.5.2) CARACTERÍSTICA I - V - T.**
 - 4.5.2.1) Polarización directa.**
 - 4.5.2.1.1) Voltaje de encendido.**
 - 4.5.2.1.2) Corriente de saturación.**
 - 4.5.2.1.3) Factor de idealidad.**
 - 4.5.2.1.4) Mecanismos de conducción.**
 - 4.5.2.1.5) Resistencia serie.**
 - 4.5.2.2) Polarización inversa.**
 - 4.5.2.2.1) Voltaje de ruptura.**
 - 4.5.2.3) Efecto de temperaturas bajas.**
 - 4.5.2.3.1) Polarización directa.**
 - 4.5.2.3.2) Polarización inversa.**
 - 4.5.3) CARACTERÍSTICA $I_{lum} - \lambda$.**
 - 4.5.3.1) Espectros de emisión.**
 - 4.5.3.2) Análisis de la característica I_{lum} contra λ .**

4.1) Introducción.

Después de haber fabricado las uniones p-n se realiza la caracterización correspondiente a fin de conocer sus diferentes propiedades que presentan como dispositivos. De los resultados obtenidos tendremos un criterio para evaluar adecuadamente el trabajo realizado en la fabricación de las uniones, por lo tanto se evaluará el funcionamiento en sí del sistema MOCVD con respecto a la confiabilidad y eficiencia que tiene para la realización de dispositivos.

En este capítulo mostraremos la manera de caracterizar a los LED's, específicamente de sus características Intensidad de corriente - Voltaje - Temperatura (I - V - T) e Intensidad luminosa - Longitud de onda ($I_{lum} - \lambda$), pondremos los resultados correspondientes y la discusión de estos resultados.

4.2) Métodos de caracterización.

Existen diferentes maneras de caracterizar a las uniones p-n, algunas de ellas son destructivas en las cuales las propiedades de la unión cambian permanentemente debido a que se sobrepasan los límites de operación de la unión (como podría ser el conocimiento del voltaje de ruptura), las no destructivas se hacen en los límites de operación del dispositivo. El método para evaluar la característica (I - V - T) se obtendrá variando el voltaje en el diodo, observando la variación de la corriente. Algunos otros métodos de caracterización son: Capacitancia - Voltaje - Temperatura (C - V - T) esta se realiza para calcular por ejemplo el valor del potencial interconstruido (V_b) ecuación 1.19, los diferentes medios para excitar un LED y así observar emisión como: con radiación óptica (fotoluminiscencia), por haz de electrones o rayos catódicos (catodoluminiscencia), por campo eléctrico o corriente que es el que usaremos en el punto 4.4 (electroluminiscencia).

4.3) Característica I - V - T.

Ésta se realizó con un sistema de medición cuyo diagrama a bloques se muestra en la figura 4.1 y empleando los equipos de medición que se indican.

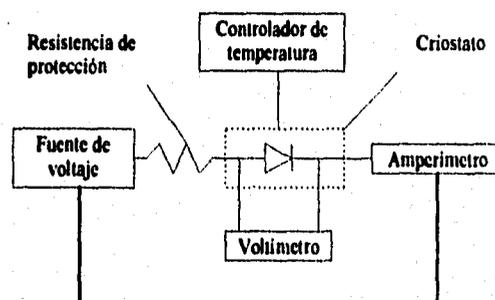


Fig. 4.1.- Diagrama a bloques para la característica I - V - T.

Para la medición de las uniones p-n, el voltaje se vario de 0 a 2 [volts] en intervalos de 0.05 [volts], la resistencia que aparece es para protección del diodo, se uso una resistencia de 100 [Ω] a 1/2 [Watt].

Para observar el efecto de la temperatura sobre la característica I - V, los diodos se colocan en un criostato (cuadro a rayas, un criostato es una caja hermética que no permite la transferencia de calor), marca Semilab. La temperatura se ajuto por medio de un controlador marca Lakeshore, este controlador permite variar la temperatura de 10 hasta 400 [Kelvin], en nuestro caso las mediciones se hicieron a la temperatura de 77, 150, 300 y 323 [Kelvin].

La medición se realizo usando un circuito en serie, el amperímetro, fuente de voltaje y diodo están en serie, la resistencia se coloca solamente para protección del diodo, la fuente de voltaje proporciona el voltaje necesario para excitar al diodo, el voltímetro esta en

paralelo con el diodo, con el fin de poder medir el voltaje real del diodo, igual caso para el amperímetro que mide corriente, el cual está en serie con el diodo.

En las gráficas 4.1 mostramos los equipos que aparecen en la figura 4.1.

Enseguida mostraremos los resultados experimentales de la característica $I - V - T$ obtenidos de las uniones p-n.



a)



b)

Fotos 4.1.- Equipos de medición de $I - V - T$ a) criostato con su sensor de temperatura en la parte de hasta arriba b) sensor introducido en el contenedor de hidrógeno líquido.

4.3.1) Resultados.

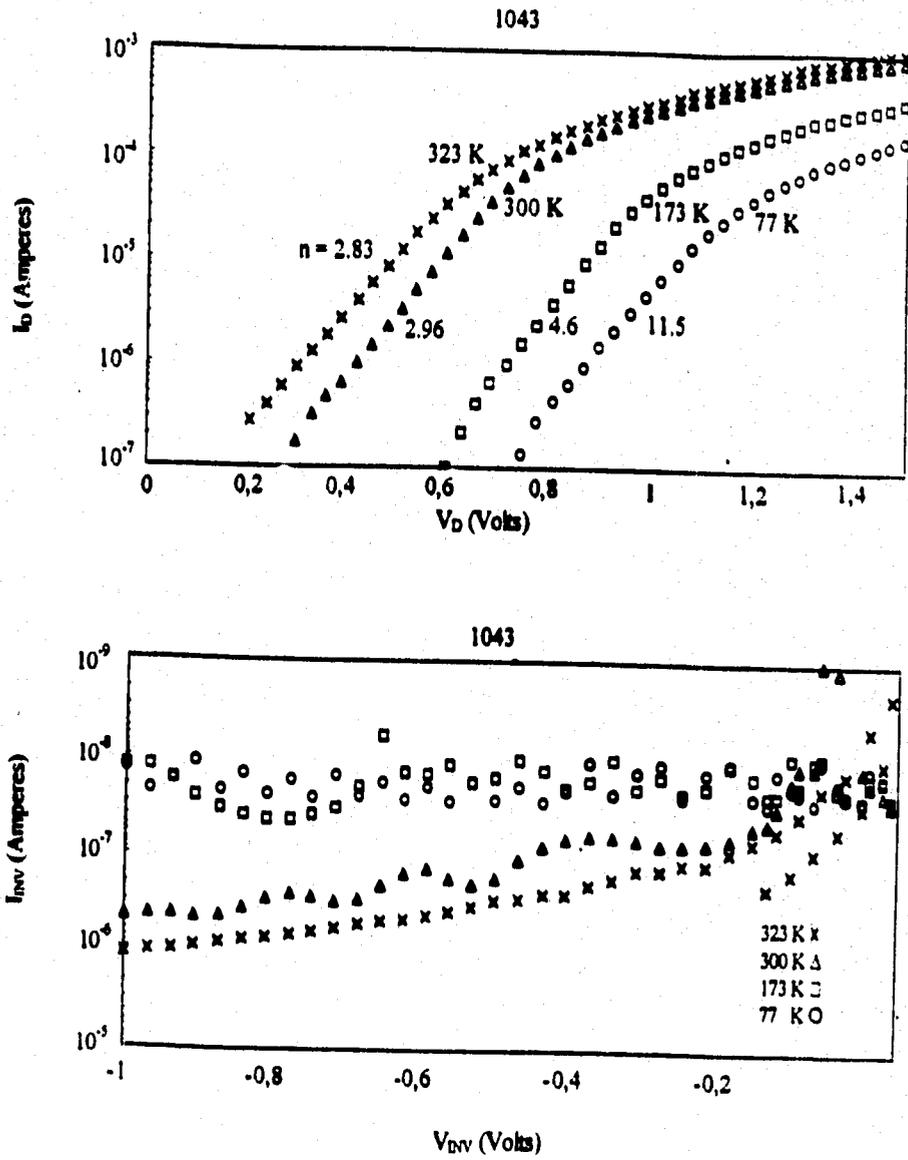


Fig. 4.2a.- Característica I - V - T en directa e inversa.

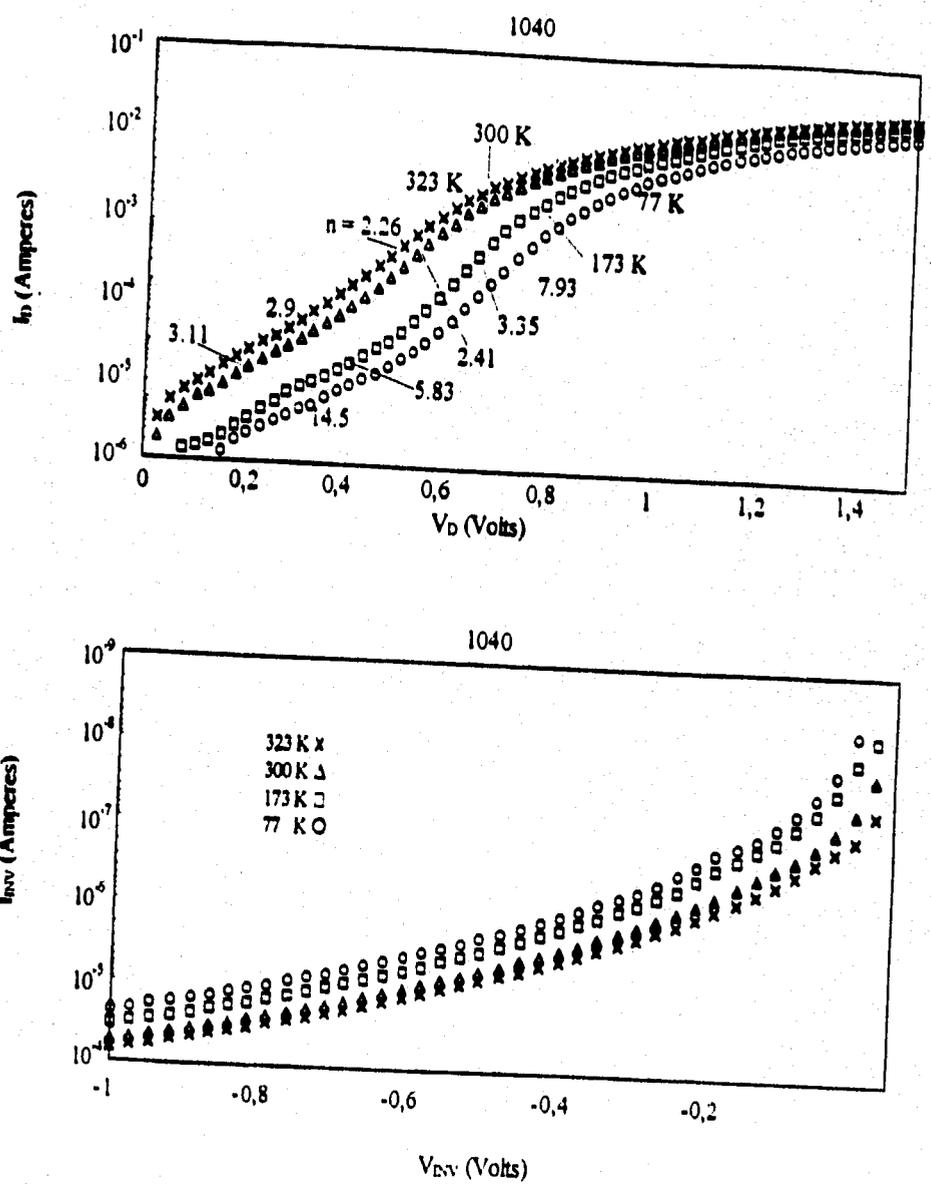


Fig. 4.2b.- Característica I - V - T en directa e inversa.

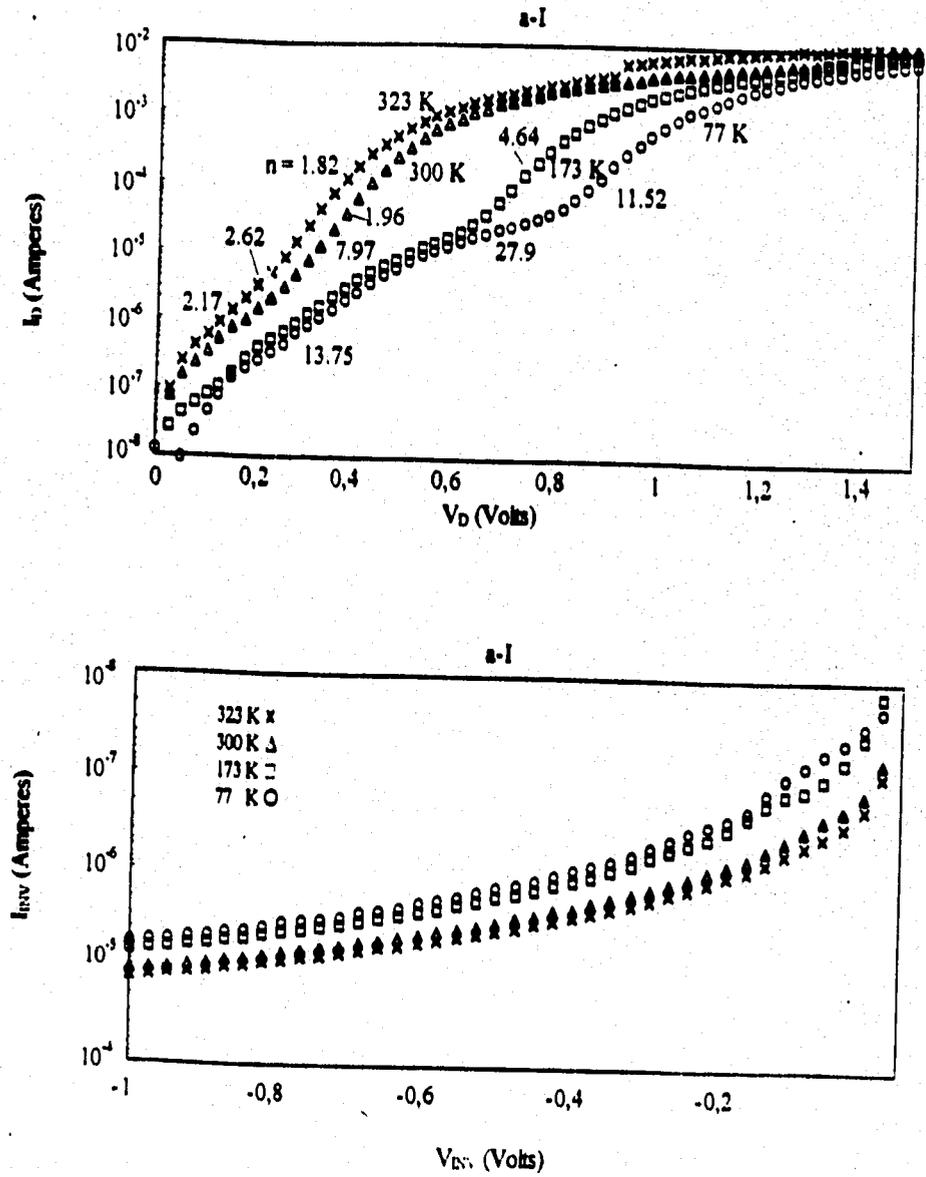


Fig. 4.2c.- Característica I - V - T en directa e inversa.

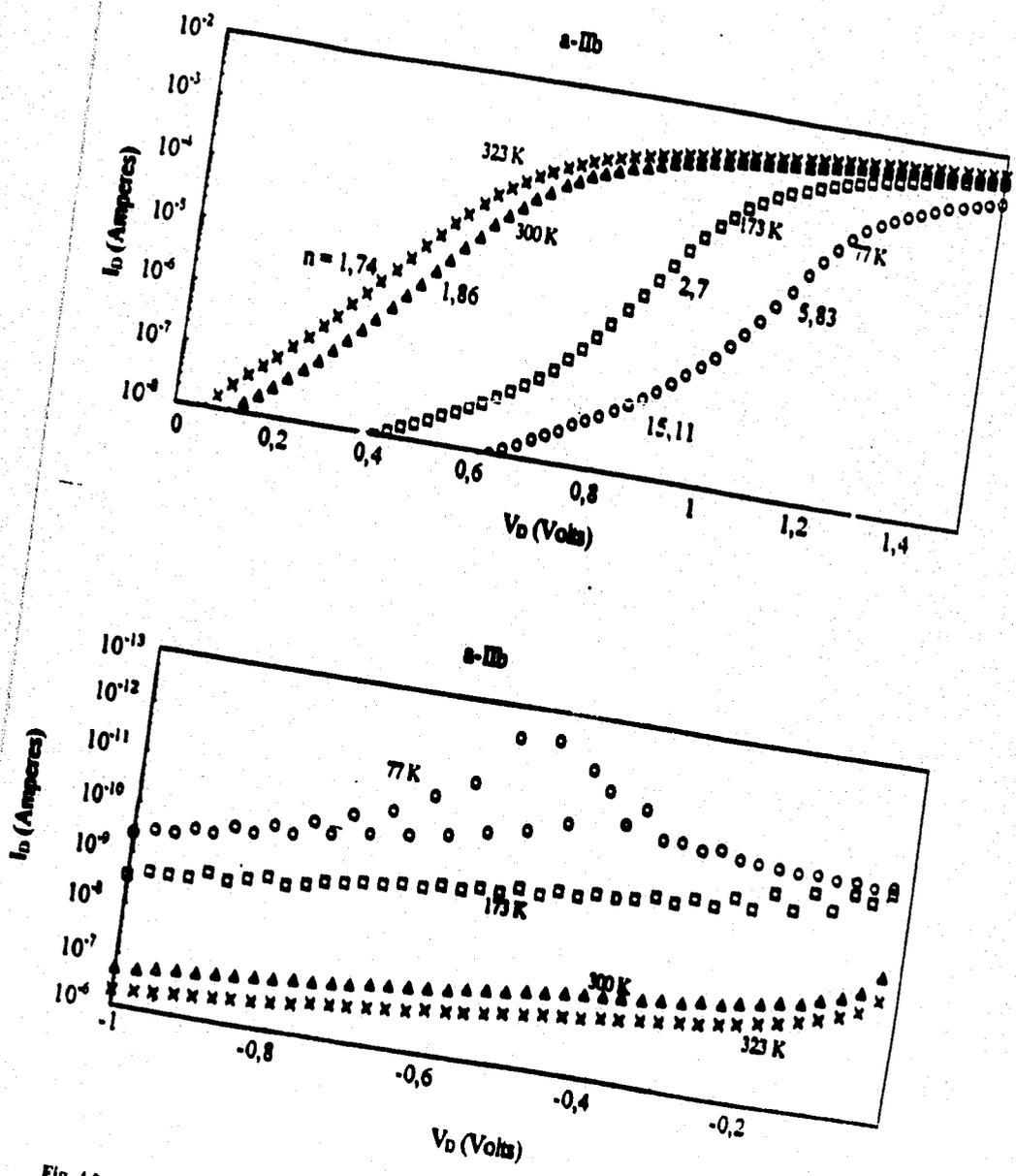


Fig. 4.2e.- Característica I - V - T en directa e inversa.

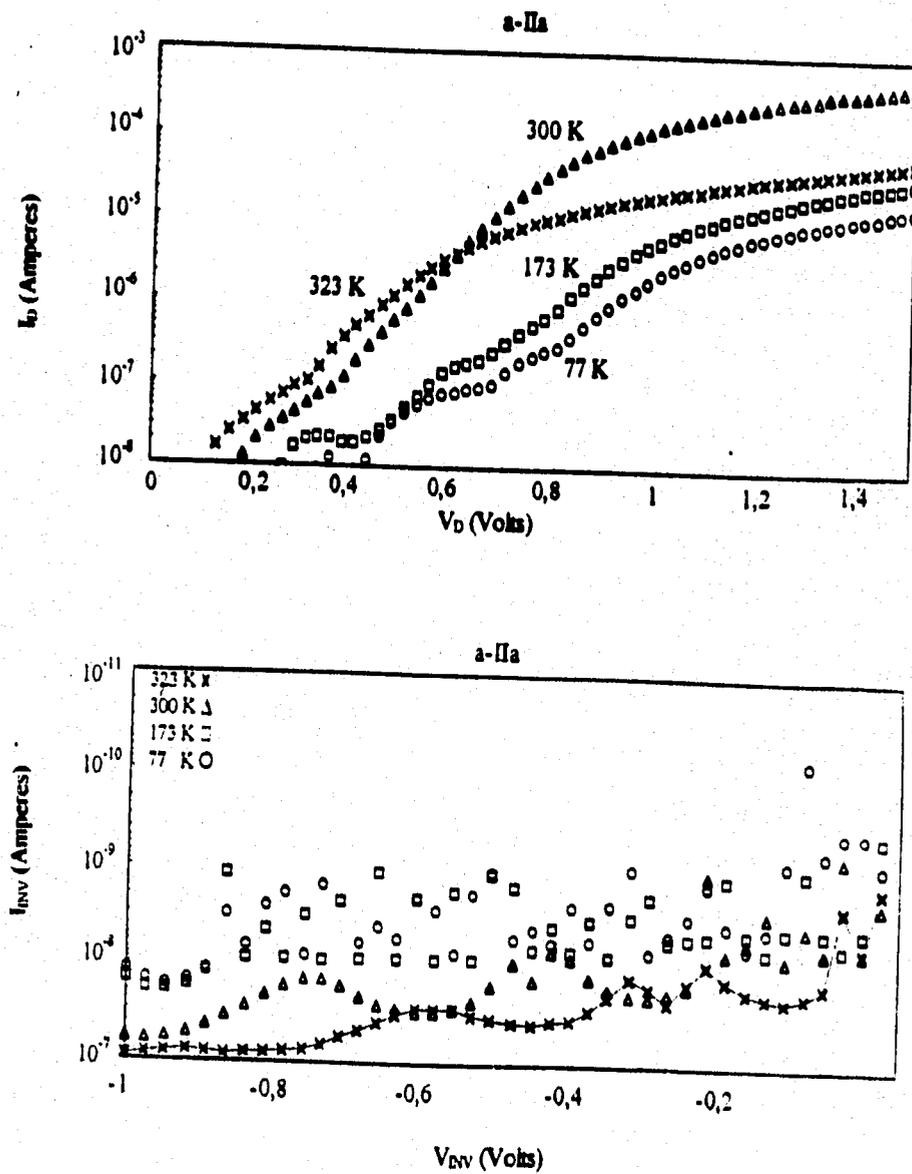


Fig. 4.2f.- Característica $i - V - T$ en directa e inversa.

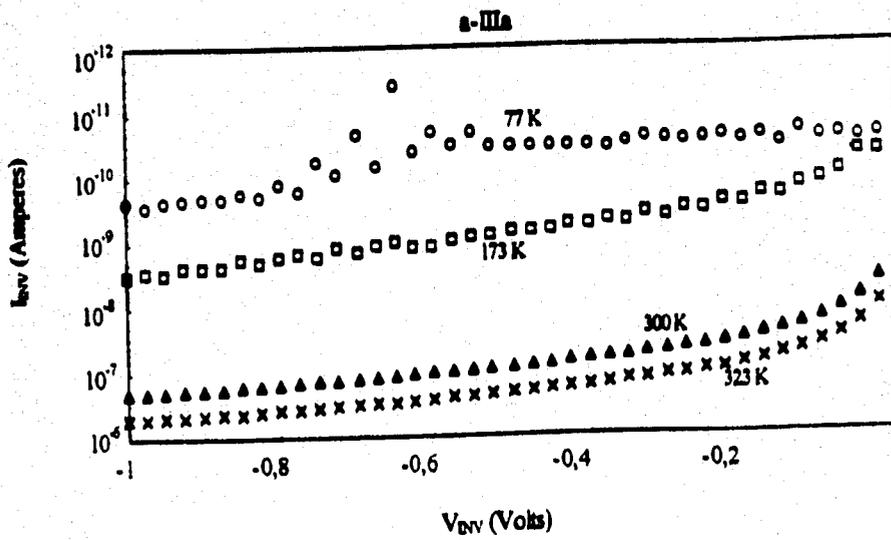
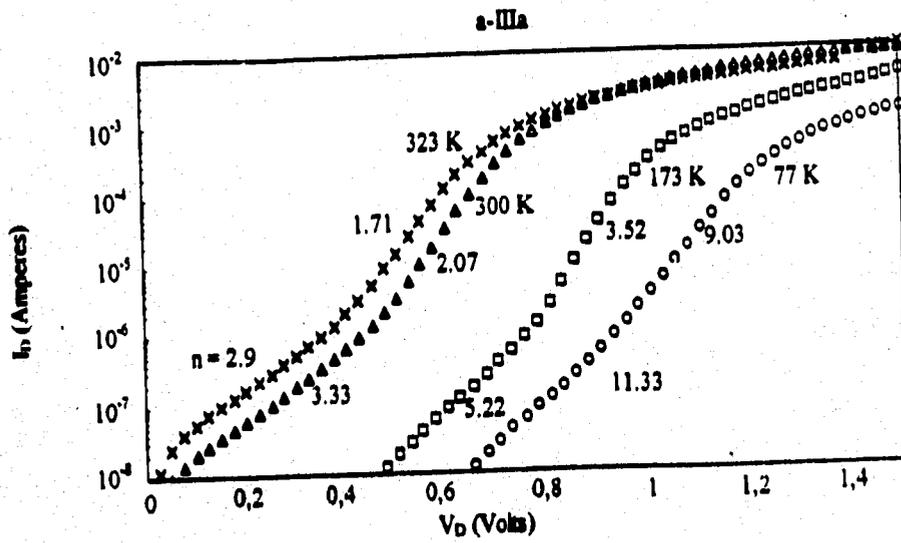


Fig. 4.2g.- Característica I - V - T en directa e inversa.

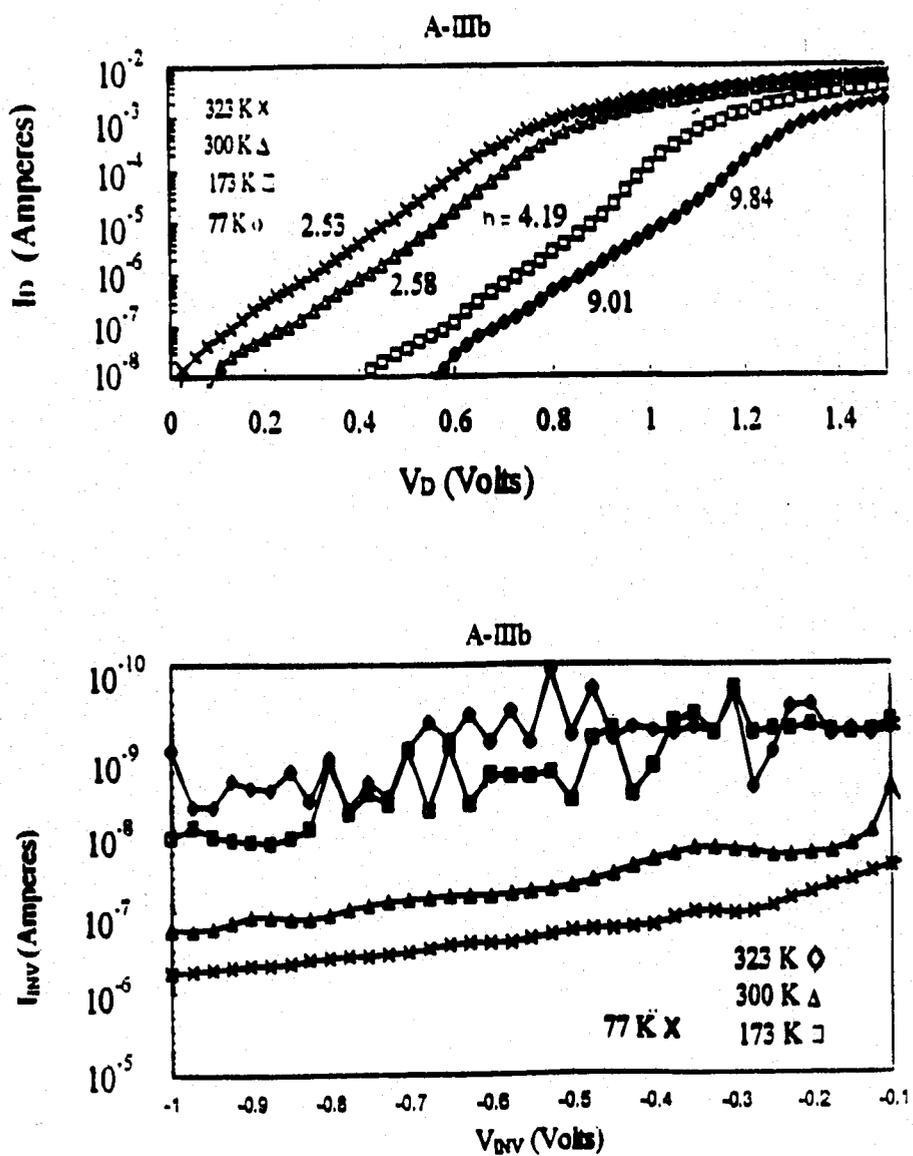


Fig. 4.2h.- Característica $i - V - T$ en directa e inversa.

4.4) Característica $I_{lum} - \lambda$.

Para obtener la característica ($I_{lum} - \lambda$) se uso una configuración equivalente a la anterior excepto que sobre el voltaje de polarización de la unión se aplico un tren de pulsos cuadrados. Ahora lo que se va a medir es la intensidad luminosa contra longitud de onda (Figura 4.3).

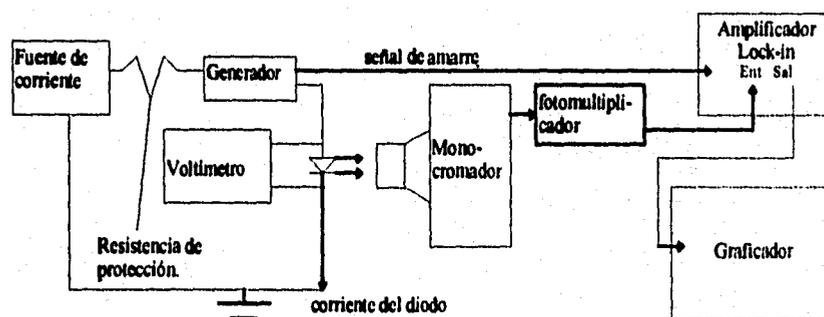


Fig. 4.3.- Diagrama a bloques para la característica $I_{lum} - \lambda$.

Las mediciones se hicieron a temperatura ambiente, sobre el voltaje de polarización se aplico una señal de onda cuadrada de 135×10^{-3} [segundos] de duración con 5 [volts] de V_{pp} (producida por el generador) esta señal de onda sirve como señal de amarre al equipo amplificador lock-in y para tener una potencia de emisión mayor, el tener este periodo de onda cuadrada tan bajo, nos garantiza que durante el voltaje de polarización los portadores minoritarios puedan cruzar la unión del diodo (o lo que es lo mismo $135 \times 10^{-3} s \gg \tau_h$ ver ecuación 1.22), antes que llegue el voltaje inverso, también evita el calentamiento del diodo y su posterior destrucción.

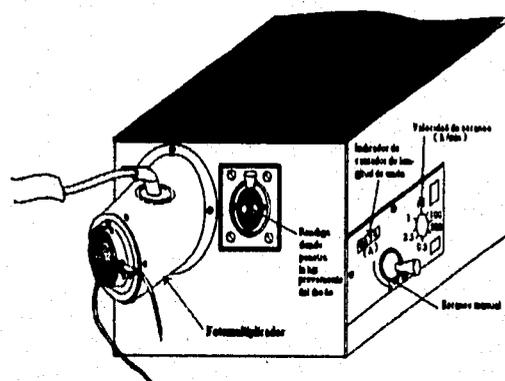
La intensidad luminosa se midió en un intervalo de 800 a 900 [nm] en algunos casos y de 800 a 1100 [nm] en otros.

La intensidad luminosa se mide auxiliándonos de un monocromador que muestra la señal de acuerdo a la longitud de onda. Después de que la señal es captada por el monocromador, esta se dirige a un fotomultiplicador (o preamplificador), obteniéndose así la respuesta espectral.

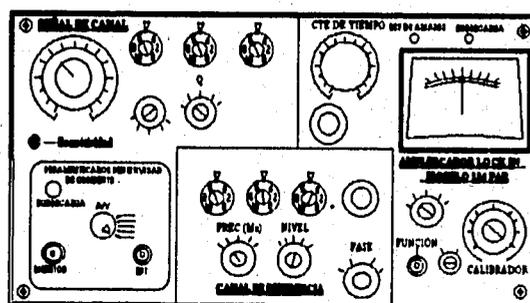
De la señal procesada por el fotomultiplicador ésta se envía al amplificador lock-in, este equipo realiza la función de aumentar en magnitud solo las señales que están en fase con el o sea las señales provenientes de la unión p-n medida (señal de onda cuadrada producida por el generador). De aquí la señal amplificada pasa a un graficador que nos dará finalmente los espectros de emisión.

En las gráficas 4.1 presentamos los equipos utilizados para medir la característica $I_{lum} - \lambda$.

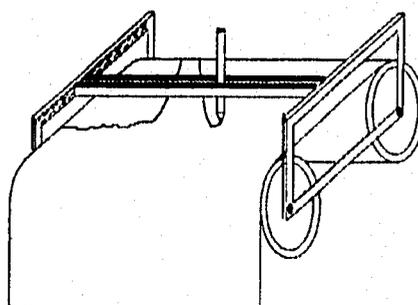
Y en las figuras 4.4 mostramos los espectros de emisión para uniones p-n representativas.



a)



b)



c)

Gráficas 4.1.- Equipos de medición de $I_{lum} - \lambda$, a) monocromador, b) preamplificador y c) graficador.

4.4.1) Resultados.

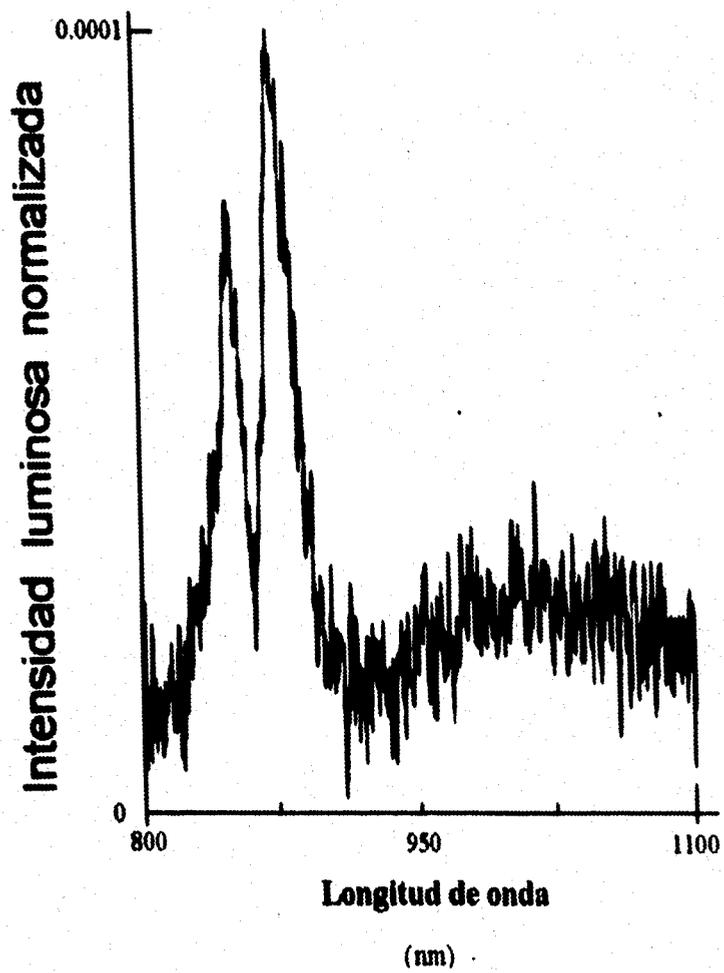


Fig. 4.4a Característica $I_{lum} - \lambda$, para una unión p-n fabricada por la técnica MOCVD.

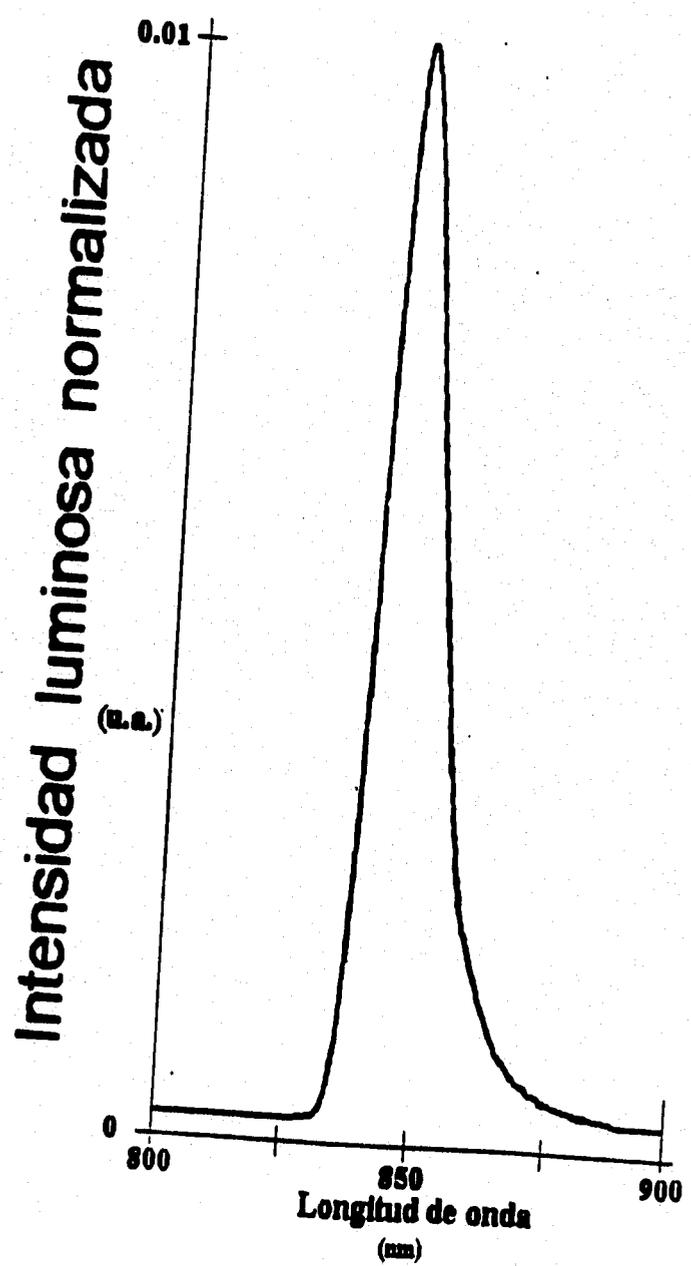


Fig. 4.4b Característica $I_{lum} - \lambda$, para una unión p-n fabricada por la técnica MOCVD.

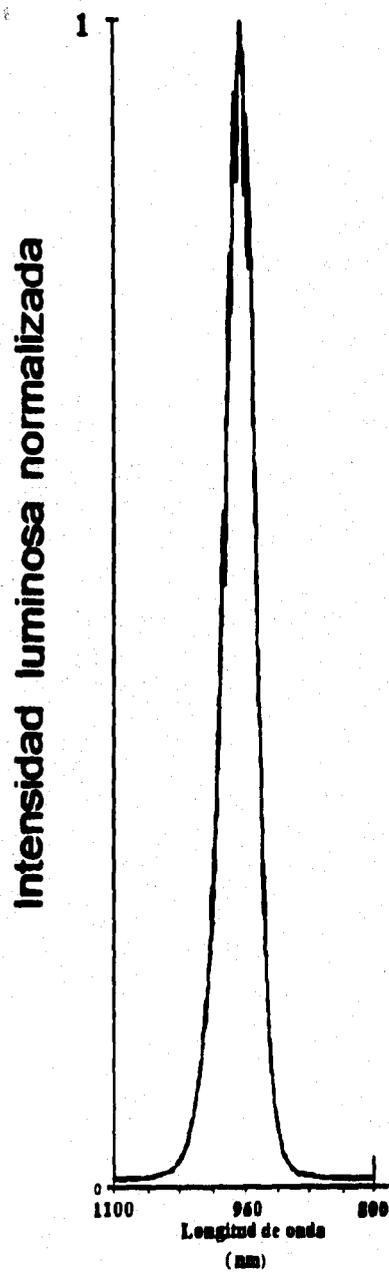


Fig. 4.4c Característica $I_{lum} - \lambda$, para una unión p-n fabricada por la técnica LPE.

4.5) DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

4.5.1) Introducción.

Para caracterizar a los diodos usamos como parámetro auxiliar a la temperatura. Como se ha indicado anteriormente a la temperatura T un semiconductor tiene una energía térmica igual a kT , donde k es la constante de Boltzmann. Esta energía térmica es comparable a la energía de activación de las impurezasceptoras o donadoras en el semiconductor. De esta forma si reducimos la temperatura hasta un valor donde se congelen tales estados, podremos observar el efecto de otros mecanismos como por ejemplo niveles de trampas volumétricas o de superficie. Es por eso que resulta útil tomar como variable a la temperatura para la caracterización de los diodos.

Se hará la discusión de los resultados obtenidos durante la caracterización de los diodos, que son: Característica $I - V - T$ cuyo elemento central de discusión es el modelo del diodo ideal y la característica I_{um} contra λ de ésta es donde se observará el patrón de emisión. Los temas están repartidos de la manera siguiente, 4.5.1 Introducción 4.5.2. Característica $I - V - T$, 4.5.2.1. Polarización directa: aquí se calculará de los datos obtenidos el voltaje de encendido (V), la corriente de saturación (I_s), los mecanismos de conducción y el valor de el factor de idealidad (n), otros mecanismos de conducción que no predice la ecuación del diodo que es la corriente túnel y por último la resistencia serie (R_s). En el subcapítulo 4.5.2.2 Polarización inversa de aquí obtendremos el voltaje de ruptura (V_R). En el 4.5.2.3 se analiza el efecto a temperaturas bajas y en el subcapítulo 4.5.3 se observa la característica $I_{um} - \lambda$.

4.5.2) CARACTERÍSTICA $I - V - T$.

La característica $I - V - T$ en principio nos ayuda a conocer las propiedades eléctricas de la unión $p-n$, en nuestro caso las gráficas se presentaron de la forma $\ln(I) - V - T$, esto con el propósito de observar los diferentes mecanismos de conducción que van apareciendo a diferentes voltajes y a diferentes temperaturas.

4.5.2.1) POLARIZACIÓN DIRECTA (V_D).

El rango de voltaje utilizado fué de 0 a 1.5 [Volts] con intervalos no mayores de 0.05 [Volts] con un error de medición no mayor al 1 %.

4.5.2.1.1) Voltaje de encendido (V).

En general los diodos p^+-n mostraron a temperatura ambiente un voltaje de encendido (V) de aproximadamente de 1.2 [Volts], (cerca al voltaje de encendido del diodo ideal del GaAs de aproximadamente 1.1 [Volt]), este valor se obtuvo de la extrapolación a corriente cero de la parte recta de la curva $I - V$, como se muestra para el caso de la muestra 1041 a figura No. 4.5.

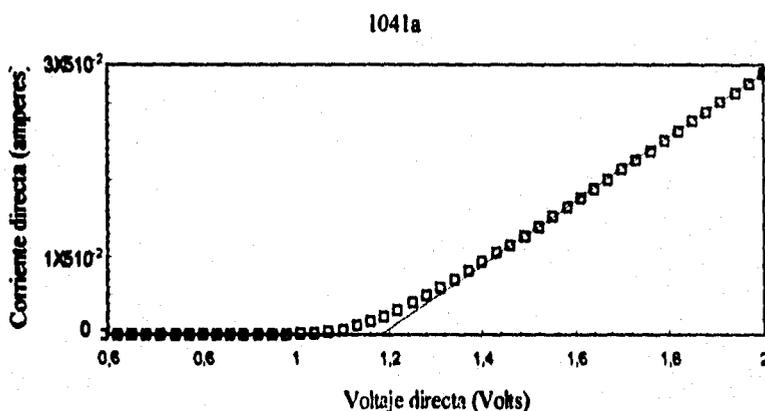


Fig. 4.5.- Característica I - V en directa para la muestra 1041a.

A partir de este valor de voltaje, la corriente en el diodo aumenta exponencialmente según la ecuación general del diodo 4.1.

$$I_{\text{Diodo}} = I_s \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) \quad (4.1)$$

El voltaje de encendido (V) depende de:

1) De la estructura del diodo. La estructura básica del LED es la del diodo plano² en donde la unión se consigue formando una región tipo p, crecimiento epitaxial de GaAs con impurezas que darán el carácter tipo p, sobre un sustrato tipo n, en este caso impurificado con Si. Por este método se pueden conseguir perfiles abruptos o lineales, esto depende de como varíe el perfil de impurezas la unión p-n. De modo que el voltaje de encendido depende del perfil de impurezas que se tenga en la unión.

2) De las características propias del tipo de material. Entre mayor sea el ancho de la banda prohibida el voltaje de encendido tenderá a valores mayores.

3) De la situación de la superficie del material. En una superficie libre o que esta en contacto directo con el medio ambiente, esta tenderá a interactuar, debido a que existen enlaces sueltos, formando niveles permitidos en la banda prohibida en una zona cercana a la superficie. Estos niveles prohibidos según su naturaleza formaran una zona de vaciamiento o de acumulación de carga en una delgada capa, que a la vez forma un campo eléctrico y por consecuencia un voltaje interconstruido. Este voltaje hay que añadirlo al voltaje interconstruido de la RCE (V_{bi}), para aminorar este efecto hay que pasivar la superficie con una capa que reduzca estas cargas a un valor aceptable³.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

4) Del grado de impurificación de uno o ambos lados de la unión. El voltaje interconstruido depende del grado de impurificación, siendo mayor a concentraciones menores.

4.5.2.1.2) Corriente de saturación (I_s).

La corriente de saturación (I_s) depende de los procesos de fabricación usados en el diodo como tipo de material, concentración de impurezas y concentración de defectos. Esta corriente depende de la temperatura, puesto que (I_s) varía cuadráticamente con la concentración de portadores intrínsecos (n_i) de la forma $p_{no} = n_i^2/n_{no}$. Para el caso del GaAs, por cada 6 °C (n_i) dobla su magnitud, entonces entre menor sea la temperatura mayor será el voltaje de encendido, como se observa en las gráficas de $\text{Log}(I_s) - V$. Esto último debido a que disminuye la corriente de saturación. Para nuestros diodos I, a 323 [Kelvin] varió de 1×10^{-7} a 3×10^{-9} [Amperes] a 300 [Kelvin] varió de 3×10^{-8} a 6×10^{-10} a 173 [Kelvin] varió de 5×10^{-9} a 2×10^{-12} [Amperes] y a 77 [Kelvin] varió de 2×10^{-9} a 2×10^{-13} [Amperes].

Para un LED comercial el valor de I_s es 1×10^{-10} [Amperes] a 300 [Kelvin].

Para que un diodo sea eficiente, su característica $I - V$, debe de acercarse a la ecuación 4.1, o sea: i) la corriente debe de dispararse a un voltaje bien definido en directa y ii) la pendiente de la corriente debe de ser lo mas pronunciada posible. Para el primer requisito se necesita que la corriente de saturación I_s , ecuación 4.2.

$$I_s = qA \left(\frac{D_p p_{no}}{L_p} + \frac{D_n n_{po}}{L_n} \right) \quad (4.2)$$

sea lo mas pequeña posible, esto se consigue de diferentes formas; a saber aumentando el nivel de impurificación o aumentando la longitud de difusión ($L_{p,n}$), esto último se consigue con un buen proceso de fabricación. Existe un compromiso entre estos 2 factores porque entre mayor concentración de impurezas $N_{A,D}$ se tenga, menor será el coeficiente de difusión $D_{n,p}$ (y por lo consiguiente menor $L_{p,n}$). Con una corriente de saturación baja se consigue que el diodo consuma menor potencia. Los diodos con ancho de banda grande tiene una corriente de saturación baja como los de GaAs pero como mencionamos el tener un ancho de banda grande también involucra tener una gran cantidad de defectos lo cual aumentara tal corriente.

Para el requisito segundo se necesita que el factor de idealidad n en la ecuación del diodo sea aproximadamente 1, este último es difícil de cumplir puesto que el GaAs tiene un gran ancho de banda [1.41 electrónVolt] permitiendo la aparición de infinidad de trampas en el material, lo cual es común en semiconductores con ancho de banda grande.

La presencia de trampas en la banda prohibida provoca que el factor de idealidad n tienda a 2 como se discutió en el capítulo 1, por lo tanto la pendiente de la curva $I - V$ será menos pronunciada.

4.5.2.1.3) factor de idealidad (n).

Examinando el comportamiento del factor de idealidad n , se pueden conocer que mecanismos de conducción están actuando. De los datos experimentales, n se obtuvo ajustando la pendiente de la curva experimental con la curva teórica, en la cual n es la variable de ajuste. De acuerdo a lo expuesto en el capítulo 2, cuando $n \approx 1$ el mecanismo de conducción predominante será difusión (recombinación solamente en las regiones neutras), si $n \approx 2$ será recombinación solamente en la RCE y si $1 < n < 2$ estarán compitiendo los dos mecanismos de conducción mencionados.

Para el caso de que $n \geq 2$ aparte de que pudiera estar ocurriendo recombinación en las regiones neutras y en la RCE puede indicar que hay recombinación en otros sitios, como sería en la superficie del material debido a la presencia de los estados superficiales (enlaces sueltos) los que a temperaturas bajas son más eficientes⁷. Para evitar que los portadores se recombinen en la superficie debido a estos enlaces sueltos, se puede colocar una capa delgada de algún material que haga la función de completar estos estados sueltos. Para el caso de que nos ocupa esto no se realizó, sin embargo por el comportamiento general de las curvas I - V - T, la superficie no juega un papel preponderante en los mecanismos de conducción.

Para nuestros diodos, n estuvo entre 1.7 y 2.83 a 323 [Kelvin] a temperatura ambiente entre 1.86 a 3.1, a 173 [Kelvin] aumento de 2 a 10 y a 77 [Kelvin] de 5.83 a 27 manteniéndose en un intervalo de 2 a 3 décadas de corriente el valor de n a las tres temperaturas.

4.5.2.1.4) Mecanismos de conducción.

Los valores de n obtenidos en el subcapítulo 4.5.2.1.3. sugieren la presencia de conducción por túneleo (ver subcapítulo 1.9), este mecanismo puede ser: 1) Túneleo directo y 2) Túneleo vía trampas. Para el primer caso esa corriente no depende de la temperatura y está dada por la ecuación siguiente⁶.

$$J_{\text{túnel}} = \frac{\sqrt{2m^*} q^3 eV}{4\pi^2 \hbar E_g^{1/2}} \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m^*} E_g^{1/2}}{3qe\hbar}\right) \quad (4.3)$$

Donde E_g es el valor del ancho de la banda prohibida, m^* masa efectiva de tunelamiento y e campo eléctrico. La probabilidad de tunelamiento esta dado por la exponencial y como se observa entre mayor sea E_g menor será la probabilidad de tunelamiento y a mayor campo eléctrico (e) mayor corriente túnel. En los diodos que están impurificados altamente es más probable que exista corriente debido a tunelamiento⁷. Como se observa de esta ecuación la corriente de tunelamiento depende muy poco de la temperatura, básicamente por los cambios que se puedan tener en E_g . De manera que puede decirse que este mecanismo no influye demasiado en las características de los diodos reportados (ver figura 4.3).

Para el caso segundo tunelamiento via trampas la corriente si depende de la temperatura y está dada por

$$J_{\text{tuncl}} = AD_{if}M_{if}P_t \quad (4.4)$$

donde A es una constante insensible a la temperatura y al voltaje, D_{if} contiene la densidad de ocupación de estados inicial y final, M_{if} es la matriz que enlaza los estados final e inicial y P_t es la probabilidad de tunelamiento. Como mencionamos anteriormente el estado de ocupación de los estados permitidos esta en función de la temperatura del diodo.

Las corrientes de tunelamiento directo se caracterizan por presentar exceso de corriente a voltajes bajos (menores al voltaje de encendido y son casi independiente de la temperatura (ecuación 4.3), estas corrientes se dan en uniones muy impurificadas. Para el caso de tunelamiento indirecto o via trampas se identifica por valores de n mayores a 2 y que aumenta conforme la temperatura baja como lo presentan algunos de los diodos medidos.

A diferencia del tunelamiento directo, el tunelamiento indirecto depende de la temperatura y se puede dar en muestras con grado de impurificación alto o bajo en las regiones p y/o n , puesto que estas corrientes dependen del estado de ocupación de las trampas y estas ocupaciones son a la vez función de la temperatura (ver figura 4.2).

4.5.2.1.5) Resistencia serie (R_s).

A la resistencia serie (R_s) de las uniones contribuye la resistividad en las capas p y n de los diodos y la resistencia de los contactos óhmicos. La resistividad de las capas n y p , puede estimarse de:

$$R_s = \rho \times W \quad (4.5)$$

donde W es el ancho del diodo y la resistividad (ρ) está dada por:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(\mu_n n_{no} + \mu_p p_{po})} \quad (4.6)$$

Donde p_{po} es N_A y n_{no} es N_D .

Ya como estructura, el efecto de R_s depende de la magnitud la corriente que circula por el diodo. La resistencia serie empieza a dominar en la característica $I - V$ en el momento que I_{Diodo} tiende a un valor grande. Considerando en la ecuación del diodo el efecto de la resistencia serie R_s , la ecuación queda como sigue:

$$I_{\text{Diodo}} = I_s \left(\exp \left(\frac{qV - I_{\text{Diodo}} R_s}{kT} \right) - 1 \right) \quad (4.7)$$

En general los diodos presentaron un marcado efecto de la resistencia serie a partir de 1×10^{-4} [Amperes] y su magnitud se calculo de la ecuación (4.7) dando para la muestra a-IIIb a 323, 300, 150 y a 77 [Kelvin] un valor de aproximadamente 1 [Ω]. Como comparación un LED comercial normalmente tiene un valor de R_s de 1 [Ω].

4.5.2.2) Polarización inversa (V_{INV}).

Esta medición se realiza con el objeto de conocer por ejemplo el voltaje de ruptura (voltaje que produce un campo eléctrico suficiente para destruir la unión). Las mediciones se realizaron en el intervalo de -1 a 0 [Volt].

4.5.2.2.1) Voltaje de ruptura (V_R).

Puesto que los diodos caracterizados se construyeron con una concentración de donadores del orden de 10^{18} [cm^{-3}], el voltaje de rompimiento lo podemos estimar con la ecuación.

$$V_R = \frac{E_m W}{2} \quad (4.8)$$

donde E_m es el campo eléctrico máximo en la unión y W es el ancho de la RCE. Para nuestros valores substituyendo, V_R da un valor de aproximadamente 4 [Volts], este valor no esta de acuerdo con el experimental que da de aproximadamente 1 como lo muestra la figura 4.5 que representa $I_{INV} - V_{INV}$ para la muestra A-IIIb.

Esto supone que: Las muestras están realmente mas impurificadas o que existen otros mecanismos que provocan la ruptura prematura como tunelamiento banda-banda. Para muestras con un V_R cercano a 1 [volts] le corresponde una impurificación de cerca de 4×10^{19} [cm^{-3}].

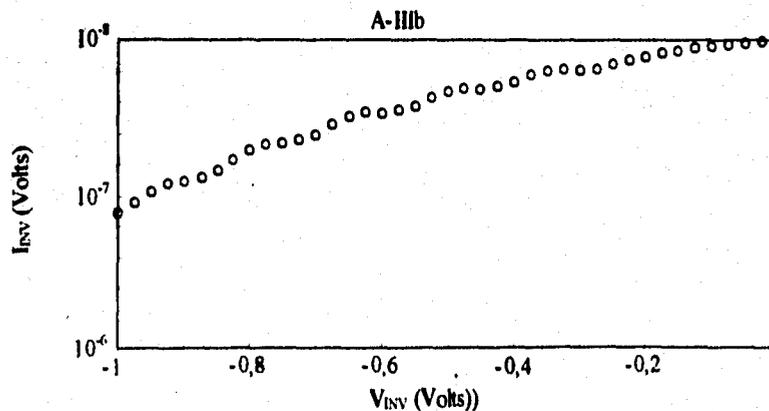


Fig. 4.6.- Característica $I_{INV} - V_{INV}$ en inversa para la muestra A-IIIb.

4.5.2.3) EFECTO DE TEMPERATURAS BAJAS.

El efecto inmediato de las temperaturas bajas sobre las uniones p-n es la disminución de la corriente de saturación ecuación 4.2, al disminuir esta corriente deja al descubierto otros mecanismos de conducción que estaban apantallados por esta corriente a temperatura ambiente.

4.5.2.3.1) Polarización directa.

Se caracterizaron las muestras a temperaturas de 173 y 77 [Kelvin].

La corriente de saturación inversa disminuye conforme disminuía la temperatura, idealmente debería ser proporcional al cuadrado de la concentración intrínseca n_i^2 esto no se observó para todos los diodos (ver figura 4.2).

Para los diodos en que domina la recombinación en las RN, la I_s varía principalmente con la temperatura según la ecuación 4.2 por $I_s \approx n_i^2(T)$.

Para los diodos en que domina la recombinación en la RCE como los nuestros, la I_s variará según las condiciones de estado las trampas con respecto a la temperatura.

En general al disminuir la temperatura, el efecto de las trampas disminuye puesto que se desionizan, entonces estudiando el comportamiento de I_s en función de la temperatura se puede encontrar la energía de activación del mecanismo dominante, por ejemplo haciendo sus gráficas en $\ln(I_s)$ contra $10^3/T$, esto nos dará la energía de activación correspondiente.

En la figura 4.5 se muestran los datos para $\ln(I_s)$ en función de $10^3/T$. De estos se obtiene que la energía de activación E_{act} para la muestra a-iiiia es de 0.374 [electrónVolts] de 3.09 a 5.78 ($10^3/T$) y de 0.032 [electrónVolts] de 5.78 a 12.96 ($10^3/T$) lo que nos sugiere que a temperaturas bajas domina recombinación banda-impureza y que al ir aumentando la temperatura de medición se van desocupando niveles permitidos E_i cercanos al nivel intrínseco E_i , aumentando la energía de activación, y por lo tanto dominando la recombinación banda-niveles permitidos (trampas).

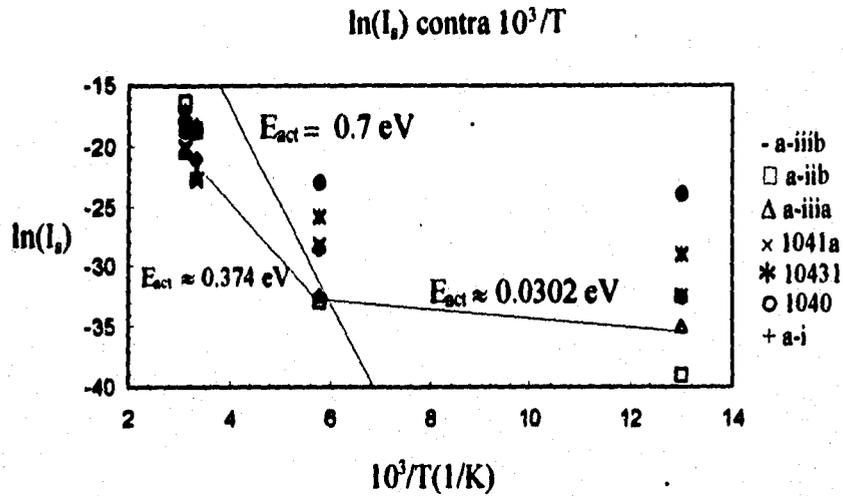


Fig. 4.7.- $\ln(I_s)$ contra $10^3/T$.

4.5.2.3.2) Polarización inversa.

En todos los diodos a voltajes negativos la corriente de saturación disminuye conforme disminuye el voltaje y la temperatura. El VR aumenta poco conforme disminuye la temperatura esto es debido a que hay pocos portadores generados térmicamente que favorezcan el rompimiento por avalancha.

Si el voltaje de rompimiento de la ecuación (4.8) es menor a $4E_g/q$ el rompimiento es provocado por tunelamiento, para nuestro caso esta magnitud da aproximadamente -1 [Volt] y según los datos de nuestros diodos estarán rompiendo por tunelamiento.

5.3) CARACTERÍSTICA $J_{lum} - \lambda$.

Para tener una eficiencia alta en un LED se debe tener una estructura del dispositivo tal que se aproveche al máximo la emisión espontánea. Para eso se necesita de las llamadas heteroestructuras que son la unión de dos diferentes materiales con parecida constante de red, estructura cristalina, etc. Para nuestro caso solo se tiene una estructura simple GaAs(n)-GaAs(p). En caso de que se incorpore una heterounión de GaAlAs se conseguirá: Una mayor localización de la región donde se da la recombinación (en la capa activa) debido a que los portadores se están recombinando en esa capa, y no en la segunda puesto que los portadores inyectados no pueden pasar a la segunda capa por tener mayor E_g , lográndose esencialmente disminuir la corriente de fuga.

En el caso último los fotones emitidos saldrán preferencialmente a través de la capa segunda por tener un mayor E_g y por lo cual no son absorbidos.

En el caso de una homounión para conseguir eficiencia buena, la capa segunda deberá ser muy delgada $W \ll \alpha$ (α es el coeficiente de absorción) para evitar absorción. Con esto conseguirá mayor intensidad de iluminación.

En los LED's caracterizados, a niveles de inyección bajos gran parte de los portadores inyectados se están recombinando en la RCE (en centros no radiativos) que en las regiones neutras aledañas a la RCE, entonces la intensidad de emisión del LED será muy tenue y la longitud de onda del máximo del patrón de emisión estará según la relación $\lambda = 1240/E_g \text{ GaAs}$ en 837 [nm]. Si aumentamos la concentración en la capa activa la longitud de emisión se recorrerá a valores más pequeños debido a que se están llenando estados por encima del fondo de la banda de conducción y vaciando estados por abajo del tope de la banda de valencia⁹.

En la figura 4.6 se muestra un espectro de emisión típico en los diodos de GaAs. Como comparación se muestra un espectro de un diodo que incorpora una capa activa de GaAlAs.

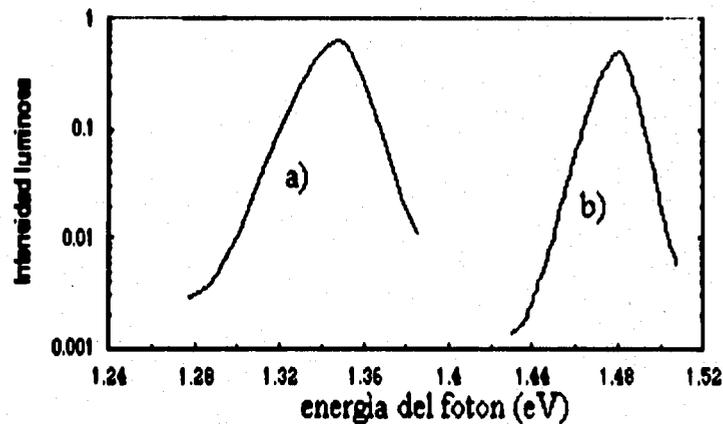


Fig. 4.8.- Espectro de emisión de (a) GaAs. y (b) $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$.

4.5.3.1) Espectros de emisión.

Para que exista emisión radiativa se necesita que el LED este fuera de equilibrio o excitado, a este fenómeno se le conoce como electroluminiscencia. la electroluminiscencia involucra un campo eléctrico, el que al ser aplicado a las terminales de la unión p-n genera una corriente, la que a su vez da lugar a la emisión.

La electroluminiscencia produce luz debido a que con el campo eléctrico aplicado se inyectan portadores de carga a través de la RCE y posteriormente se recombinan radiativamente (Fig. 1.14). Las transiciones radiativas solo se dan en ciertos niveles de

energía (Fig. 1.15). La emisión obtenida la analizaremos usando los espectros típicos de emisión presentados en el capítulo 4.4.1.

4.5.3.2) Análisis de la característica I_{lum} contra λ .

Se presentan 3 espectros de emisión etiquetados con los números 1, 2 y 3. Las mediciones fueron hechas a 300 [Kelvin], los espectros No 1 y 2 obtenidos de uniones fueron fabricadas por la técnica de MOCVD y en el caso del espectro No 3 la estructura se obtuvo por LPE.

Las escalas que se presentan están normalizadas al diodo que entrego la señal mayor, a este se le corresponde la unidad, el equipo amplificador y preamplificador para observar con detalle a los espectros fue para el espectro No 1 de 2 [miliVolts] y 10^{-9} [Amperes/Volt] respectivamente, para el espectro No 2 de 5×10^{-3} [Volts] y 10^{-7} [Amperes/Volt] y para el espectro No 3 de 20×10^{-3} [Volts] y 10^{-5} [Amperes/Volt], la corriente a través de las uniones 1, 2 y 3 fueron de 50×10^{-3} [Amperes] 150×10^{-3} [Amperes] y 16.4×10^{-3} [Amperes] respectivamente.

El espectro No 1, presenta tres máximos en su espectro de emisión, el pico a menor longitud de onda tiene su emisión máxima en 1.465 [electrónVolt], esta energía es un poco mayor a la energía de la banda prohibida del GaAs el cual es de aproximadamente 1.424 [electrónVolt], esta sugiere transiciones de banda-banda (Fig. 1.15.1.a), el otro pico esta a una energía menor a 1.424 [electrónVolt], correspondiendo a transiciones banda-impureza, este pico que es relativamente mas grande lo cual indica que las transiciones a través de estos estados son dominantes. A mas energías bajas se observa otra emisión con características muy diferentes a las anteriores, esta es de menor intensidad luminosa, centrado a 1.2 [electrónVolt] y de mayor ancho de espectro de emisión. Este estas transiciones corresponden posiblemente a un estado profundo que normalmente es un complejo de impurezas-defectos¹⁰. Un complejo tiene la propiedad de cambiar su nivel de energía con la captación o emisión de portadores de carga¹¹ de ahí lo ancho de emisión con respecto a las dos primeras.

Para el espectro No 2, presenta solo un pico centrado en 1.465 [electrónVolt] y con ancho medio de 13.0 [electrónVolt], correspondiendo a transiciones banda-banda. Como se observa el pico no es simétrico es decir el lado así energías altas cae mas rápido. Esto indica que en el lado donde se esta emitiendo preferencialmente es bastante gruesa absorbiendo principalmente a los fotones de energía alta.

Para el espectro No 3 con un solo pico de emisión en 1.309 [electrónVolt] y con un ancho medio de 40 [electrónVolt], las transiciones son también banda-banda, pero el pico es simétrico lo cual indica que la estructura esta adecuadamente diseñada.

El primer espectro fue fabricado por la técnica MOCVD, este presentada una intensidad luminosa muy baja característico por la presencia del nivel de ruido alto, la intensidad luminosa baja se debe a que el LED contiene diversos defectos, uno de ellos es el complejo que se observa a energías bajas (de aproximadamente 1.2 [electrónVolt]) con un ancho espectro. Este defecto complejo puede deberse a la falta de estequiometría del material¹².

El espectro segundo tiene fue fabricado por la técnica MOCVD, y presenta características mejores que el anterior por tener una intensidad luminosa mayor y por

presentar solamente un solo pico. Esta estructura involucra todas las películas necesarias como por ejemplo: capa colchón y capas de contacto impurificado altamente.

El espectro último fabricado por la técnica de LPE, presenta las mejores características por tener la intensidad luminosa mayor, lo cual comprueba que en la técnica LPE introduce en el momento de la fabricación menos defectos.

Referencias:

- 1) P. Goldberg, De., *Luminescence of Inorganic Solids*, Academic, New York, 1966.
- 2) S. Gage, D. Evans, M. Hodapp, y H. Sorenson, *Optoelectronics Applications Manual*, McGraw-Hill, New York, 1977.
- 3) Shockley and Person Modulation of conductance of thin films of semiconductor by surface charges Bell telephone laboratories June pp. 232-233.
- 4) Manual de Texas Instruments.
- 5) C. G. B. Garret y W. H. Brattain, "Physical Theory of Semiconductor Surfaces," *Phys. Rev.*, **99**(1955)376.
- 6) Para una discusión mayor ver J. L. Moll, *Physics of Semiconductor*, McGraw-Hill, New York, 1964.
- 7) D. K. Roy, "On the prediction of tunnel Diode I - V Characteristics," *Solid state Electron.*, **14**(1971)520.
- 8) Burstein, E., Anomalous optical absorption limit in InSb, *Phys. Rev.* **93**(1954)632; Moss, T. S. The interpretation of the properties of indium antimonide, *Proc. Phys. Soc B67*, **02**(1954)775:
- 9) Light Emitting Diodes of Bergh and Dean pp. 159.
- 10) E. W. William and P. M. Blacknall, *Trans. TMS-AIME* **307**(1967)239.
- 11) Radiation Damage and Defects in semiconductors, Conference series No. 16 of the Institute of Physics London and Bristol session 4. Defect complex and interactions.
- 12) M. Hansen and K. Anderson, *Constitution of Binary Alloys*, McGraw-Hill, New York, 1985.

CONCLUSIONES

Los objetivos planteados en la introducción general del trabajo son:

- 1.- Realizar uniones p-n con la técnica (MOCVD).
- 2.- Medir las características I - V - T y $I_{lum} - \lambda$:
- 3.- Identificar los posibles problemas durante el proceso de fabricación de la unión p-n, y recomendar las soluciones apropiadas.

Las conclusiones generales del trabajo son:

- 1.- Se fabricaron uniones p⁺-n de GaAs con la técnica MOCVD en el sistema de crecimiento que se cuenta en la S.E.E.S. - I.E.
- 2.- Debido a que el sistema es capaz de cambiar la conductividad de tipo p a tipo n con el cambio del impurificante, el sistema permite realizar estructuras mas complejas como: Láseres, transistores, MESFET, Tiristores, entre otras.
- 3.- Se obtuvieron sus características I - V - T. Estas características resultan ser similares para todas las uniones que se fabricaron, esto comprueba en principio la repetibilidad del proceso. Sin embargo existen particularidades en su comportamiento, las cuales son:

a.- El valor del factor de idealidad (n) obtenido del ajuste de la curva I - V experimental con la curva teórica del diodo ideal estuvo en el intervalo de 1.7 a 2.83 a 323 [Kelvin], de 1.86 a 3.1 a temperatura ambiente, para 150 [Kelvin] estuvo en el intervalo de 2 a 10, y a 77 [Kelvin] de 5.83 a 27.

Este valor que es superior al factor $n = 2$, presupone que la mayoría de los portadores de carga que se están inyectando desde el lado p al lado n, y desde el lado n al p, se están recombinando preferencialmente en la RCE. Puesto que el factor de idealidad n calculado va aumentando conforme disminuye la temperatura de medición nos sugiere la presencia del mecanismo de conducción de tunelamiento banda-impureza o proceso en cascada.

b.- El valor de la corriente de saturación en algunas uniones disminuyo en casi 6 décadas en el intervalo de temperaturas de 323 a 77 [Kelvin], lo cual nos sugiere que no existe tunelamiento banda-banda.

c.- Se presento en una forma notoria la resistencia serie R_s , la cual empezó a dominar a partir de 1×10^{-3} y 1×10^{-4} [amperes], esto se debe a la concentración baja de huecos en el lado p y de electrones en lado n, por medio de cálculos hechos por programas de computadora como el Mathcad la R_s resulto ser de aproximadamente 1 ohms.

d.- De la gráfica I - V, el voltaje de ruptura fué de 1 a 2 [Volts], este valor esta por debajo del voltaje teórico que le corresponde a uniones impurificadas de aproximadamente 10^{18} [cm⁻³] como, las nuestras. Para uniones impurificadas con este valor, el voltaje de ruptura seria de 4 [Volts], por lo tanto se esta presentando otro mecanismo adicional que provoca la ruptura prematura de la unión, este podría ser efecto de tunelamiento o que realmente las uniones resultan estar mas impurificadas.

4.- Se obtuvieron características $I_{lum} - \lambda$ (espectros de emisión) aceptables en las uniones fabricadas, lo cual indica la funcionalidad de las uniones como diodos electroluminiscentes, dichas características son las siguientes:

a.- Se pudo observar emisión en las uniones fabricadas y esta resulto ser menor en lo que se refiere a potencia de emisión.

b.- El máximo de emisión se situó en 1.46 [electrónVolts] y para la unión mas impurificada a 1.3 [electrónVolts], lo cual comprueba el corrimiento que tiene el ancho de banda E_g debido al aumento de la impurificación.

c.- La presencia de una capa colchón antes de crecer las capas siguientes que formaran la unión ó zona activa mejora las propiedades ópticas.

La realización de este trabajo como todo lo relacionado a él, me ayudó a conocer un poco más del vasto conocimiento que existe en los semiconductores así como en mi formación como profesional.

Como toda tesis contiene aportaciones y el de mi tesis es mostrar para los lectores interesados en este campo mis resultados de las mediciones hechas en los LED's fabricados en la S.E.E.S. - I.E del CINVESTAV - I.P.N. y presento mis propias conclusiones acerca del funcionamiento del sistema MOCVD.

Las recomendaciones que propongo para mejorar de alguna manera la fabricación de las uniones son: Aumentar la temperatura de crecimiento (por arriba de los 800 [°C]), de esta manera se podrían quitar los defectos o desperfectos en las películas, esta recomendación se da porque por lo general a temperatura mayor de crecimiento se tienen películas mejores, la otra recomendación es aumentar la impurificación en ambos lados de la unión (arriba de los 10^{18} [cm⁻³]) para así disminuir la resistencia serie y hacerlo mas eficiente puesto que se estaría trabajando con menos voltaje aplicado y con mayor corriente.

Lista de abreviaciones y signos

Símbolo	Descripción	Unidades
A	Área	m ²
c	Velocidad de la luz	m/s
C _l	Concentración del soluto en fase líquida	moléculas/cm ³
C _i	Concentración en equilibrio del soluto	moléculas/cm ³
D _e	Coefficiente de difusión de electrones	
dE	Diferencia de Energía	
D _h	Coefficiente de difusión de huecos	cm ² /s
D _i	Densidad de ocupación de estados inicial y final	estados/cm ³
δ	Ancho de la capa frontera	cm
E	Nivel de energía	eV
e	Campo eléctrico	V/m
E _{ACT}	Energía de activación	eV
E _A	Nivel de energía aceptor	eV
E _c	Nivel de energía de la banda de conducción	eV
E _D	Nivel de energía donador	eV
E _f	Nivel de energía de Fermi	eV
E _{fA}	Nivel de energía de Fermi aceptor	eV
E _{fD}	Nivel de energía de Fermi donador	eV
E _g	Ancho de la banda prohibida	eV
E _i	Nivel de energía intrínseco	eV
ε ₀	permitividad del vacío	F/cm
ε _s	permitividad del semiconductor	F/cm
E _m	Campo máximo	V/m
E _t	Nivel de energía de las trampas	eV
eV	electrónVolt	
E _v	Nivel de energía de la banda de valencia	eV
f	Frecuencia	Hz (cps)
f(E)	Función de distribución	
f _e (E)	función de distribución de electrones	
FET	Transistor de Efecto de Campo	
φ _n	Cuasi-niveles de Fermi de electrones	eV
φ _p	Cuasi-niveles de Fermi de huecos	eV
f _h (E)	función de distribución de huecos	
g	Estado base de degeneración	
GaAlAs	Arseniuro de Galio Aluminio	
GaAs	Arseniuro de Galio	

Símbolo	Descripción	Unidades
GaAsP	Fosforo de Galio Arsénico	
GaInP	Fosforo de Galio Indio	
GaP	Fosforo de Galio	
$G_{th}(T)$	Cantidad de pares electrón-hueco generados	Pares (h-e)/s
h	Constante de Planck	J-s
I_{DIODO}	Corriente del diodo.	Amperes
I_{INV}	Corriente en inversa	Amperes
IMPATT	Tiempo de Transición de Avalancha Ionización por Impacto	
I_{LUM}	Intensidad luminosa	Lumen/Área del diodo
InSb	Antimoniuro de Indio	
I_s	Corriente de saturación.	Amperes
J	Joule	N-m
J_D	Densidad de corriente en directa	Amperes/Área
JFET	Transistor de Efecto de Campo de Unión	
J_{gen}	Densidad de corriente de generación	Amperes/Área
J_{inv}	Densidad de corriente en inversa	Amperes/Área
J_n	Densidad de corriente de electrones	Amperes/Área
J_p	Densidad de corriente de huecos	Amperes/Área
J_{sat}	Densidad de corriente de saturación	Amperes/Área
J_{tunnel}	Densidad de corriente tunel	Amperes/Área
k	Constante de Boltzmann	J/k
K	Temperatura en Kelvins	
kT	Energía térmica	eV
λ	Longitud de Onda	nm
LASER	Luz Amplificada por Emisión Estimulada de Radiación	
L_n	Longitud de difusión de electrones	m
LED	Diodo Emisor de Luz	
L_h	Longitud de difusión de huecos	m
LPE	Epitaxia en Fase Líquida	
MBE	Epitaxia por Haces Moleculares	
M_c	Número mínimo equivalente en la banda de conducción	electrones ² /T ^{3/2}
M_{de}	Masa efectiva de electrones	Kg
m_{e^*}	Masa efectiva del electrón	Kg
MESFET	Transistor de Efecto de Campo Metal semiconductor	
m_{h^*}	Masa efectiva del hueco	Kg
M_{if}	matriz de estados inicial y final	
m_0	Masa del electrón libre	Kg
MOCVD	Depósito Químico en Fase Vapor con OrganoMetálicos	
n	Semiconductor tipo n	

Símbolo	Descripción	Unidades
n^*	Semiconductor tipo n altamente impurificado	
$N(E)$	Distribución de estados en función de la energía	Estados/energía
$n(x)$	Distribución de electrones en función de la distancia	Electrones/x
N_A	Concentración de impurezasceptoras	Electrones/cm ³
N_A^+	Concentración de átomos aceptores ionizados	Átomos/cm ³
N_C	Densidad de estados en la banda de conducción	Estados/cm ³
N_D	Concentración de impurezas donadoras	Impurezas/cm ³
N_D^+	Densidad de estados en la banda de valencia	Estados/cm ³
N_D^+	Concentración de átomos donadores ionizados	Átomos/cm ³
N_g	Concentración en fase gaseosa	Impurezas/cm ³
N_i	Concentración de impurezas	Impurezas/cm ³
n_i	Concentración de electrones intrínsecos	Electrones/cm ³
n_n	Concentración de electrones fuera de equilibrio	Estados/cm ³
n_{n0}	Concentración de electrones en equilibrio	Electrones/cm ³
n_0	Electrones en equilibrio	Electrones/cm ³
N_0	Concentración en la superficie del sustrato	Impurezas/cm ³
N_t	Concentración de trampas	Electrones/cm ³
p	Semiconductor tipo p	
p^*	Semiconductor tipo p altamente impurificado	
$p(x)$	Distribución de huecos en función de la distancia	Huecos/x
p_0	Huecos en equilibrio	Huecos/cm ³
p_p	Concentración de huecos fuera de equilibrio	Huecos/cm ³
p_{p0}	Concentración de huecos en equilibrio	Huecos/cm ³
P_t	Probabilidad de tunelamiento	%
q	Carga eléctrica	Coulombs
ρ	Densidad de carga	Coulombs/cm ³
RCE	Región de Carga Espacial	
$R_{ih}(T)$	Cantidad de pares electrón-hueco recombinados	Pares(h-e)/s
RN	Región neutra	
R_s	Resistencia serie	Ohms
s_e	Sección transversal de captura de electrones	cm ²
s_h	Sección transversal de captura de huecos	cm ²
Si	silicio	
T	Temperatura	K
τ_e	Tiempo de vida o tiempo de decaimiento de electrones	s
τ_h	Tiempo de vida o tiempo de decaimiento de huecos	s

Símbolo	Descripción	Unidades
t_r	Tiempo de recombinación no radiativa	s
t_r	Tiempo de recombinación radiativa	s
U	Velocidad de generación-recombinación	Pares(h-e)/s
V	Potencial eléctrico	Volts
V_D	Voltaje en directa	Volts
V_{bi}	Potencial interconstruido o potencial de difusión	Volts
V_{INV}	Voltaje en inversa	V
V_R	Voltaje de ruptura	Volts
v_h	Velocidad térmica	m/s
W	Ancho de la Región de carga del espacio	cm
Ω	Ohm	