



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

PROPUESTA DE MODELO DE LA LUMINISCENCIA ESTIMULADA  
ÓPTICAMENTE (LEO) PARA LA FIBRA ÓPTICA DE SiO<sub>2</sub> AMORFO  
CON IMPUREZAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**FÍSICO**

PRESENTA:

LUIS DAVID RIVERA URIÓSTEGUI

TUTOR:

DR. GUILLERMO ESPINOSA GARCÍA



MÉXICO, D.F.

2008



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

## Hoja de Datos del Jurado

### 1. Datos del alumno

Rivera  
Urióstegui  
Luis David  
56 07 96 74  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Física  
400006121

### 2. Datos del tutor

Dr  
Guillermo  
Espinosa  
García

### 3. Datos del sinodal 1

Dr  
Horacio  
Martínez  
Valencia

### 4. Datos del sinodal 2

M en C  
Manuel René  
Garduño  
López

### 5. Datos del sinodal 3

M en C  
Jesús Armando  
Lara  
Velázquez

### 6. Datos del sinodal 4

Fís  
René  
Ortega  
Alvarado

### 7. Datos del trabajo escrito.

Propuesta de modelo de la luminiscencia estimulada ópticamente (LEO) para la fibra óptica de SiO<sub>2</sub> amorfo con impurezas  
66 p  
2008

## Agradecimientos:

Al doctor Guillermo Espinosa García. Por invitarme a elaborar esta tesis, a partir de los datos experimentales de la LEO de la fibra óptica (curvas de intensidad de la LEO como función del tiempo), que obtuvo durante su estancia en Oak Ridge National Laboratory.

A mis revisores Jesús Armando Lara Velázquez, Manuel René Garduño López, René Ortega Alvarado y Horacio Martínez Valencia. Por hacerme saber en que puntos tenía que hablar con mayor claridad.

Al físico José Ignacio Golzarri y Moreno. Por el derroche de recursos humanos que tuvo hacia mi persona durante la etapa de investigación del tema y elaboración del manuscrito, así como por las facilidades que me brindó con los recursos materiales puestos a su disposición en el Instituto de Física de la UNAM.

Al doctor Ramiro García García. Por el interés que mostró en la versión preliminar de esta tesis, la cual revisó y aprobó.

Al doctor Miguel Ávalos Borja. Por el interés que mostró en el tema antes de que escribiera la versión preliminar y de la cual, se hizo partícipe al llevar a cabo el análisis de la composición de la fibra óptica. También por la revisión del capítulo III de la versión preliminar, el cual aprobó.

Al doctor Carlos Vázquez López. Por mostrarme en su laboratorio, la difícil tarea que resulta la implantación de cobre en la fibra óptica (motivo por el cual resultaba poco probable que se hubiera llevado a cabo en ella esta implantación o de otro metal), ayudándome así en la etapa de investigación del tema, a descartar otros “mecanismos” existentes utilizados para explicar por qué se lleva a cabo la LEO en esta fibra.

Dedico esta tesis

A mi madre

y

a todas las personas que me estiman.

## ÍNDICE

Agradecimientos .....	i
Índice .....	ii
Lista de tablas .....	iv
Lista de figuras .....	v
INTRODUCCIÓN .....	1
Capítulo	
I Aspectos Básicos .....	5
I.1 La fibra óptica .....	5
I.1.1 Descripción de la fibra óptica .....	5
I.1.2 Análisis de microscopía de la fibra óptica empleada en la LEO .....	9
I.1.3 Fabricación de la fibra óptica .....	12
I.2 Los sólidos cristalinos y los sólidos amorfos .....	13
I.2.1 El SiO <sub>2</sub> cristalino puro .....	14
I.2.2 El SiO <sub>2</sub> amorfo puro .....	17
I.2.3 El SiO <sub>2</sub> cristalino con impurezas de germanio .....	18
I.2.4 El SiO <sub>2</sub> amorfo con impurezas de germanio .....	21
I.3 La radiación ionizante .....	23
I.3.1 La radiación ionizante beta menos .....	23
I.3.2 Interacción de la radiación ionizante beta menos con el SiO <sub>2</sub> amorfo puro .....	24
II Luminiscencia Estimulada Ópticamente (LEO) .....	26
II.1 El fenómeno de la luminiscencia .....	26
II.1.1 Fluorescencia y fosforescencia .....	26
II.2 Teoría de bandas .....	27
II.2.1 Niveles de energía .....	27
II.2.2 Bandas de energía .....	29
II.2.3 Luminiscencia de los sólidos cristalinos .....	31
II.2.4 Métodos de estimulación de la LEO .....	37
II.3 Luminiscencia estimulada ópticamente (LEO) en los sólidos cristalinos .....	39

II.3.1 Modelo de la LEO de una trampa y un centro de recombinación .....	40
III Modelo de la LEO de la fibra óptica de SiO <sub>2</sub> amorfo con impurezas de germanio .....	44
III.1 Bandas de energía en el SiO <sub>2</sub> amorfo con impurezas de germanio .....	44
III.2 Profundidad de los niveles de energía discretos del SiO <sub>2</sub> amorfo con impurezas de germanio .....	47
III.3 Análisis de los datos de la LEO de la fibra óptica de SiO <sub>2</sub> amorfo con impurezas de germanio .....	51
III.4 Modelo propuesto de la LEO de la fibra óptica de SiO <sub>2</sub> amorfo con impurezas de germanio .....	55
Conclusiones .....	58
BIBLIOGRAFÍA .....	61

## Lista de tablas

### Tabla

I.1.1.1. Dimensiones del diámetro de la fibra óptica .....	6
I.1.2.1. Diámetro de la fibra óptica desgastada .....	11
I.2.1.1. Propiedades estructurales del SiO <sub>2</sub> .....	16
III.1.1 Niveles de energía discretos reportados respecto a la banda de valencia .....	45
III.2.1 Profundidad de los niveles de energía discretos con E = 10.2eV .....	47
III.2.2 Profundidad de los niveles de energía discretos con E = 10.5eV .....	48
III.2.3 Longitud de onda asociada a E <sub>2</sub> experimental con E = 10.2eV .....	49
III.2.4 Longitud de onda asociada a E <sub>2</sub> experimental con E = 10.5eV .....	49
III.3.1 Radiación ionizante beta menos aplicada a la fibra óptica de a-SiO <sub>2</sub> :Ge .....	51

## Lista de figuras

### Figura

I.1.1.1 Vista longitudinal de las partes que constituyen la fibra óptica .....	5
I.1.1.2 Propagación de un rayo de luz en la fibra óptica de índice escalonado .....	7
I.1.1.3 Incidencia de luz a través del recubrimiento. El ángulo $\theta$ es menor o igual que el ángulo crítico $\theta_c$ .....	7
I.1.1.4 Incidencia de luz a través del recubrimiento. El ángulo $\theta$ es mayor que el ángulo crítico .....	8
I.1.1.5 Emisión de luz de la fibra óptica debido al proceso de estimulación óptica .....	8
I.1.1.6 Variación del índice de refracción del $\text{SiO}_2$ debido a la concentración de otros óxidos utilizados como mezclas (llamados impurezas). Caso a) Impurezas de germanio.....	9
I.1.2.1 Espectro de la fibra óptica con $D_r = (124.0 \pm 0.05) \mu\text{m}$ .....	12
I.1.3.1 Procesos de fabricación de la fibra óptica .....	13
I.2.1.1 Estructura interna del $\text{SiO}_2$ cristalino .....	15
I.2.1.2 Diagrama de fases del $\text{SiO}_4$ .....	15
I.2.1.3 Defectos puntuales de los sólidos cristalinos .....	16
I.2.3.1 Estructura cristalina de átomos de silicio .....	19
I.2.3.2 Estructura cristalina de átomos de silicio con una impureza de arsénico .....	19
I.2.3.3 Estructura cristalina de átomos de silicio con una impureza de galio .....	20
I.2.3.4 Estructura cristalina del $\text{SiO}_2$ puro en dos dimensiones .....	20
I.2.4.1 Estructura amorfa del $\text{SiO}_2$ .....	23
I.3.1.1 Trayectoria de la radiación ionizante beta menos en un sólido en general .....	24
II.2.1.1 Niveles de energía de cada átomo de hidrógeno. La separación entre los dos átomos es lo suficientemente grande .....	27
II.2.1.2 Niveles de energía de cada átomo de hidrógeno. La separación entre los dos átomos va disminuyendo .....	28
II.2.1.3 Niveles de energía de cada átomo de hidrógeno cuando se encuentran cerca los seis cerca uno del otro .....	28
II.2.2.1 Niveles de energía de los sólidos cristalinos .....	29
II.2.2.2 Bandas de energía de los sólidos cristalinos .....	30
II.2.2.3 Pequeñas distorsiones en las bandas debido a los defectos .....	30
II.2.2.4 Formación de niveles de energía discretos debido a los defectos .....	31

II.2.3.1 Transición “a”. El electrón pasa de la banda de valencia a la de conducción debido a la radiación ionizante .....	32
II.2.3.2 Transición “b”. El electrón pasa de la banda de conducción a una trampa .....	33
II.2.3.3 Transición “c”. El hueco pasa de la banda de valencia a un centro de recombinación .....	33
II.2.3.4 Transición “d”. El electrón es estimulado por medio de alguna forma de energía externa y sale de la trampa .....	34
II.2.3.5 Transición “e”. El electrón desentrapado que se mueve en la banda de conducción, se encuentra con un hueco localizado en un centro de recombinación .....	34
II.2.3.6 Transición “f”. El electrón se recombina con un hueco al pasar de la banda de conducción a la de valencia y se emite luz .....	36
II.2.3.7 Transición “g”. Es poco probable que se lleve a cabo .....	36
II.2.3.8 Transición “h”. Es poco probable que se lleve a cabo .....	37
II.2.4.1 LEO-CW .....	38
II.2.4.2 LEO-LM .....	39
II.2.4.3 LEO-P .....	39
II.3.2.1 Modelo de la LEO de una trampa y un centro de recombinación sin re-entrapado de electrones .....	40
III.1.1 Bandas y niveles de energía discretos del a-SiO <sub>2</sub> :Ge para el caso en que el ancho de la banda prohibida sea de 10.2eV .....	46
III.1.2 Ángulo que define los valores de los niveles de energía discretos obtenidos mediante MINDO/3 .....	46
III.2.1 Modelo de la LEO de la fibra óptica de a-SiO <sub>2</sub> :Ge de una trampa y un centro de recombinación sin re-entrapado de electrones .....	51
III.4.1 Modelo propuesto de la LEO de la fibra óptica de a-SiO <sub>2</sub> :Ge de una trampa y un centro de recombinación sin re-entrapado de electrones .....	56

## INTRODUCCION

El objetivo del presente trabajo es el de proponer un modelo teórico que explique por qué se da la luminiscencia estimulada ópticamente (LEO) en la fibra óptica de  $\text{SiO}_2$  que tiene impurezas de germanio y estructura interna amorfa (no cristalina).

La LEO es la emisión de luz que se lleva a cabo en algunos materiales aislantes y semiconductores, debido a que en ellos se incide luz de una longitud de onda adecuada (para estimular tal efecto), una vez que han sido expuestos a la radiación ionizante. La emisión de luz se lleva a cabo en el momento o poco después de que ocurrió la incidencia de luz y es posible diferenciar la luz incidente de la luz de la LEO, por su longitud de onda, ya que son diferentes [1].

Para explicar por qué se da la LEO en algunos materiales sólidos (aislantes y semiconductores) que tienen estructura interna cristalina e impurezas (u otros defectos), se emplea el modelo teórico llamado de una trampa y un centro de recombinación [1]. Este modelo se basa en la teoría de bandas de los sólidos, ya que estudia el movimiento de los electrones en los sólidos que tienen estructura interna cristalina, mediante bandas de energía (banda de valencia, banda prohibida y banda de conducción) y niveles de energía discretos localizados dentro de la banda prohibida, los cuales se asocian a estos sólidos con la finalidad de no hacer el estudio directamente en su estructura. Luego, para explicar porqué se lleva a cabo la LEO mediante este modelo, se utilizan las bandas mencionadas y dos niveles de energía discretos (una trampa y un centro de recombinación), a partir de los cuales se establecen las relaciones: entre la interacción de la radiación ionizante (con los electrones de los materiales sólidos mencionados) y la expulsión de los electrones de la banda de valencia (estos electrones quedan luego en las trampas), entre la estimulación óptica y el desentrampado de electrones y entre la emisión de luz y la recombinación de los electrones desentrampados con los “huecos” que dejan los electrones al salir de la banda de valencia (estos huecos pasan de la banda de valencia a los centros de recombinación y es ahí donde se lleva la recombinación electrón-hueco). Este modelo predice un decaimiento exponencial de la intensidad de la LEO como función del tiempo.

El modelo propuesto de la LEO de la fibra óptica de  $\text{SiO}_2$  que tiene impurezas de germanio y estructura interna amorfa (que considera que la longitud de onda de la luz de la LEO es mayor que la de estimulación óptica), se basó en el modelo de una trampa y un centro de recombinación por

dos razones. La primera razón tiene que ver con que esta fibra, también tiene asociada las mismas bandas de energía que se asocian a los sólidos que tienen estructura interna cristalina [2], por lo que se determinó hacer uso de ellas en el modelo propuesto, no obstante la existencia de ciertas diferencias entre los niveles de energía discretos de unos y otros; pues para el caso cristalino, su formación se debe a la presencia de las impurezas (y otros defectos), los cuales a la vez determinan qué nivel realiza la función de trampa y qué nivel la de centro de recombinación, mientras que para el caso de este sólido amorfo, los niveles se deben a los elementos que forman ciertos enlaces y a la vez la estructura interna del sólido y de los cuales, no se tiene conocimiento acerca de si pueden realizar la función de trampa o de centro de recombinación. La segunda razón por la cual el modelo propuesto se basó en el modelo de una trampa y un centro de recombinación, se debe a la existencia de dos niveles de energía discretos particulares de la banda prohibida asociada al SiO<sub>2</sub> amorfo con impurezas de germanio. De uno de ellos se podría desentrampar un electrón al estimularlo ópticamente con luz de longitud de onda de casi la misma magnitud que la utilizada ( $\lambda=480\text{nm}$ ) por quienes obtuvieron la LEO\*. Esto así sería, si este nivel tuviera la capacidad de atrapar un electrón. Mientras que del otro nivel se emitiría luz (LEO) con una longitud de onda mayor que 480nm (este valor es desconocido experimentalmente y se encuentra de manera teórica en este trabajo), si se llevara a cabo en él la recombinación electrón–hueco. De esta manera al sugerir que el primer nivel se comporta como trampa y el segundo como centro de recombinación, se propuso que la LEO de la fibra óptica mencionada (para el caso en que la longitud de onda de la luz de la LEO es mayor que la de la luz de estimulación óptica), puede describirse de manera análoga a como se hace en algunas estructuras cristalinas mediante el modelo de una trampa y un centro de recombinación, para así predecir el decaimiento exponencial de la intensidad de la LEO como función del tiempo. Sin embargo, los datos experimentales adquiridos de la LEO de esta fibra óptica, muestran que el decaimiento es potencial. En este punto, el problema se resolvió de manera puramente matemática al “ajustar” la ecuación que involucra el desentrapado de electrones (esta ecuación sirve de base para encontrar de manera teórica el decaimiento exponencial ya que a la vez define a la LEO en forma matemática), a una ecuación que describe el decaimiento potencial de la LEO, por lo que se tuvo que analizar las consecuencias que de ello se derivan.

En el capítulo I se describió las partes que constituyen la fibra óptica y el papel que desempeña cada una de ellas al momento de propagarse la luz por su interior, con la finalidad de mostrar que la estimulación óptica y la emisión de luz (LEO) se llevan a cabo en cada una de las partes que la constituyen. Se dedujo, de manera teórica, que la estructura interna de la fibra óptica de SiO<sub>2</sub> con

impurezas de germanio utilizada para este trabajo es amorfa y que tal estructura fue adquirida durante \*La obtención de la LEO se llevó a cabo en Oak Ridge National Laboratory en el año 2005 por los doctores G. Espinosa y J. Bogart. su fabricación. Se presentó el análisis de microscopía (EDS) realizado a la fibra óptica que muestra que el silicio, el oxígeno y el germanio son los únicos elementos que la constituyen, por lo cual así quedó establecido, que esta fibra óptica cumple con los requisitos que se piden (en [2]), para que a este sólido se le asocien las bandas y niveles de energía discretos mencionados. Además, se describió en el SiO<sub>2</sub> qué tipo de enlace se forma cuando la estructura interna es cristalina (para el caso en que se encuentre puro y para el caso en que tenga impurezas de germanio) y se describió también qué tipo de enlaces se presentan cuando el SiO<sub>2</sub> tiene estructura interna amorfa (para los mismos dos casos). Esto se hizo con la finalidad de mostrar que no existe gran diferencia en la forma de la estructura cristalina pura y la cristalina que tiene impurezas de germanio, debido a que no hay una perturbación significativa por la presencia de estas impurezas y como consecuencia, tampoco existe gran diferencia entre la estructura amorfa pura y la amorfa con impurezas de germanio, ya que a partir de la estructura cristalina se obtiene también, la amorfa. Así, resulta válido entonces, la utilización de algunos resultados experimentales obtenidos para los casos puros, en los casos con impurezas de germanio; en particular, el relacionado con la emisión exoelectrónica estimulada térmicamente (EEE-T) que se presenta en el SiO<sub>2</sub> amorfo puro, por medio del cual, se puede asociar a la banda prohibida de este material, al menos una trampa. Por último, se describió los “cambios químicos” que la radiación ionizante beta menos produce en esta fibra, para mostrar (en el capítulo III) que no afectan la obtención de la LEO.

En el capítulo II se presentó de manera informal, a partir del arreglo ordenado de los átomos de los sólidos con estructura interna cristalina, la formación de las bandas de energía asociadas a ellas y también, a partir de la presencia de las impurezas y otros defectos en las mismas estructuras, la formación de los niveles de energía discretos dentro de la banda prohibida. Esto se hizo con la finalidad de mostrar que la formación de los niveles, se debe a la perturbación del arreglo ordenado por parte de las impurezas y otros defectos y en particular, a la perturbación de la energía potencial de sus átomos vecinos; justificando así a los elementos que forman ciertos enlaces y a la vez la estructura interna del SiO<sub>2</sub> amorfo con impurezas de germanio (considerada como una estructura sin ningún arreglo ordenado), como posibles responsables de la formación de los niveles de energía discretos de la banda prohibida que se les asocia. Se mostró las transiciones permitidas (y no permitidas) de los electrones entre las bandas y niveles de energía discretos y la relación entre la longitud de onda y la energía necesaria para desentrampar a un electrón de cada nivel discreto. Por último, se presentó el modelo de una trampa y un centro de recombinación (para estructuras

cristalinas), junto con el planteamiento matemático que da lugar a la descripción exponencial decreciente de la intensidad de la LEO como función del tiempo, que posteriormente se tomó como base para proponer el modelo de la LEO de la fibra óptica de SiO<sub>2</sub> amorfo con impurezas de germanio.

En el capítulo III se mostró las bandas de energía (banda de valencia, banda prohibida y banda de conducción) asociadas al SiO<sub>2</sub> amorfo con impurezas de germanio, salvo que en lugar de presentar los niveles de energía discretos tal y como aparecen en la referencia [2] (los cuales fueron encontrados de manera teórica por un método semiempírico conocido como MINDO/3), se hace con los obtenidos de manera experimental reportados en un artículo [4]. Sin embargo, como la energía de cada nivel discreto reportado experimentalmente se encuentra expresada en la banda prohibida respecto de la banda de valencia y no respecto de la de conducción (en la cual se basan en este modelo los procesos de desentrapado de electrones y emisión de luz), fue necesario expresar a la energía de cada nivel en estos términos, para lo cual, fue indispensable conocer el valor del ancho de la banda prohibida para luego relacionarla con la energía de los niveles. Además, en base a la energía necesaria para desentrapar a un electrón y la energía asociada a la luz emitida (LEO), se sugirió al nivel que podría realizar la función de trampa y al nivel que podría realizar la de centro de recombinación; es decir, se sugirió cuál elemento (junto con su enlace) puede realizar la función de trampa y cuál la de centro de recombinación. Una vez hecho esto se propuso el modelo de la LEO de una trampa y un centro de recombinación de la fibra óptica de SiO<sub>2</sub> amorfo con impurezas de germanio y la expresión matemática que describe el comportamiento potencial decreciente de los datos adquiridos, para lo cual, se conservó la forma general de la ecuación diferencial que se plantea (para estructuras cristalinas), que describe la disminución de la concentración de los electrones atrapados y se ajustó uno de sus parámetros para que el comportamiento de la LEO sea potencial en lugar de exponencial.

# CAPITULO I

## Aspectos Básicos

### I.1 La fibra óptica.

Existe una gran variedad de aplicaciones de la fibra óptica donde se hace uso de una o varias de sus propiedades físicas, ya sean estas últimas de carácter óptico (como la transparencia), de carácter mecánico (como la flexibilidad) o de carácter químico (casi químicamente inerte) por mencionar algunas. La fibra óptica se usa como un dispositivo con el que se puede iluminar mediante una fibra y obtener imágenes mediante otra, en lugares de difícil acceso como lo es el interior del cuerpo humano (medicina). Se usa también para iluminar lugares de alto riesgo de explosión (industria minera y petrolera) ayudando así a evitar incendios relacionados con cortocircuitos. Sin embargo, la aplicación más común que tiene, es la de servir como una vía de comunicación entre equipos electrónicos que intercambian información en forma de luz codificada analógica o digitalmente [5]. Recientemente [6] se ha caracterizado a la fibra óptica para darle un nuevo uso: como dosímetro termoluminiscente de la radiación ionizante. Se sigue investigando su empleo en dosimetría para hacer uso en ella de otra técnica más novedosa como lo es la Luminiscencia Estimulada Ópticamente (LEO).

#### I.1.1 Descripción de la fibra óptica.

La fibra óptica está constituida de dos cilindros concéntricos de material dieléctrico transparente. Figura I.1.1.1. El cilindro interno se llama núcleo de la fibra óptica mientras que el cilindro externo cubierta o recubrimiento.

$n_1 \equiv$  Índice de refracción de núcleo.

$n_2 \equiv$  Índice de refracción del recubrimiento.

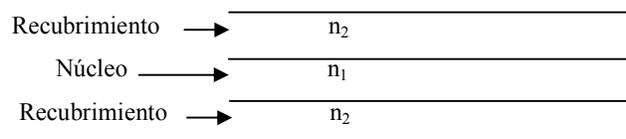


Fig. I.1.1.1. Vista longitudinal de las partes que constituyen la fibra óptica [5].

En la tabla I.1.1.1 se muestran las dimensiones típicas del diámetro del núcleo ( $D_n$ ) de la fibra óptica y del diámetro del núcleo más el recubrimiento ( $D_r$ ).

Tabla I.1.1.1. Dimensiones del diámetro de la fibra óptica [7].

Tipo de fibra	$D_n$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_r$ ( $\mu\text{m}$ )
Unimodal de índice escalonado	6-8	125
Multimodal de índice gradual	50	125
Multimodal de índice escalonado	10-200	150-200

El núcleo y el recubrimiento de la fibra óptica de índice escalonado (tanto la unimodal como la multimodal), tienen índice de refracción constante y solo se experimenta un cambio de índice, cuando se pasa del núcleo al recubrimiento o viceversa. En cambio, el núcleo de la fibra óptica de índice gradual tiene índice de refracción que no es constante, sino que disminuye gradualmente a partir del centro al recubrimiento.

En la fibra óptica de índice escalonado (tanto en la unimodal como en la multimodal), el núcleo desempeña la función de ser un medio transparente por el cual se pueda propagar un haz (en la multimodal) o un rayo (en la unimodal) de luz, mientras que la función que desempeña el recubrimiento, es la de ser otro medio transparente de índice de refracción menor que el núcleo, el cual contribuya a que se cumpla la condición de reflexión total interna (la cual pide que la incidencia del haz o rayo en la interfaz núcleo-recubrimiento se lleve a cabo con un ángulo mayor o igual que el crítico) cuando el haz (o rayo) va del núcleo al recubrimiento, con la finalidad de que el haz (o un rayo) de luz se propague mediante múltiples reflexiones por el núcleo. Figura I.1.1.2. Además, el recubrimiento sirve como medio protector de la superficie del núcleo para evitar que se dañe por la intemperie y en particular, para evitar que se produzcan fisuras, las cuales pueden hacer que el haz (o el rayo) de luz ya no incida en la interfaz con un ángulo mayor o igual que el ángulo crítico y como consecuencia, el haz o el rayo se refracte y abandone el núcleo o incluso la misma fibra.

La fibra óptica permanece firme y no se deforma (a menos que se aplique una fuerza de compresión en sus extremos), si las dimensiones de su longitud no exceden unos cuantos milímetros como son los 5mm que tiene cada fibra que utilizaron para obtener los datos de la LEO.

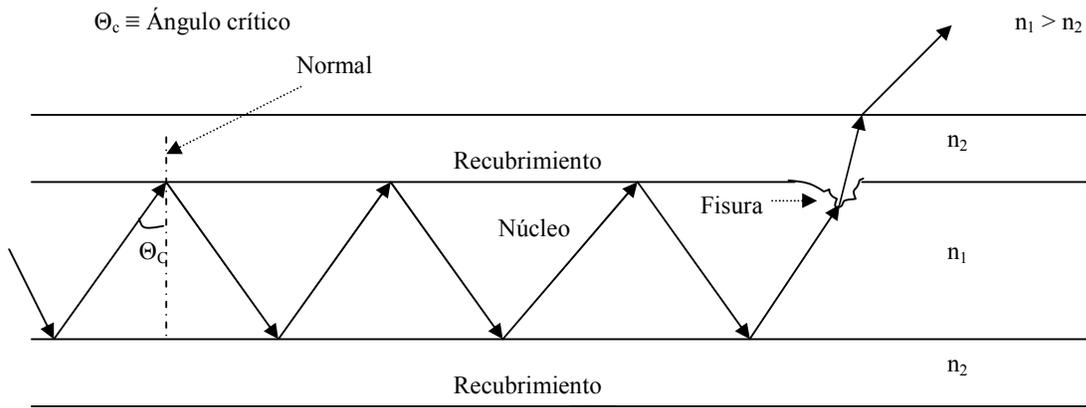


Fig. I.1.1.2. Propagación de un rayo de luz en la fibra óptica de índice escalonado [5].

Así, al incidir un haz de luz en la superficie del recubrimiento de una fibra óptica (figura I.1.1.3) de índice escalonado (de 5mm de longitud), de manera que forme un ángulo perpendicular o un ángulo menor que el ángulo crítico (cuando el haz va en la dirección del núcleo al recubrimiento), el haz atravesará la fibra llevándose a cabo las refracciones en las interfaces, las cuales se describen mediante la ley de Snell.

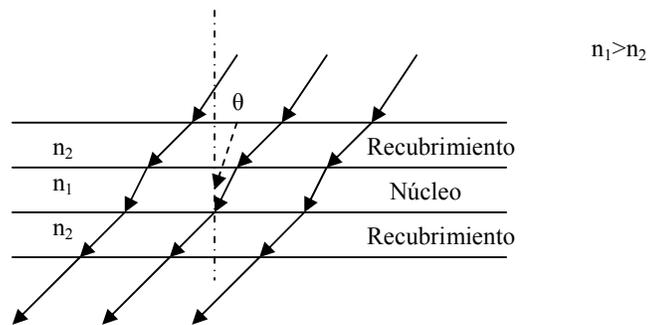


Fig. I.1.1.3. Incidencia de luz a través del recubrimiento. El ángulo  $\theta$  es menor o igual que el ángulo crítico  $\theta_c$ .

Pero al incidir el haz de luz en la superficie de tal manera que se cumpla la condición de reflexión total interna (cuando el haz de luz va en la dirección del núcleo al recubrimiento), entonces el haz puede realizar múltiples reflexiones dentro del núcleo como las que muestra la figura I.1.1.4.

$$n_1 > n_2$$

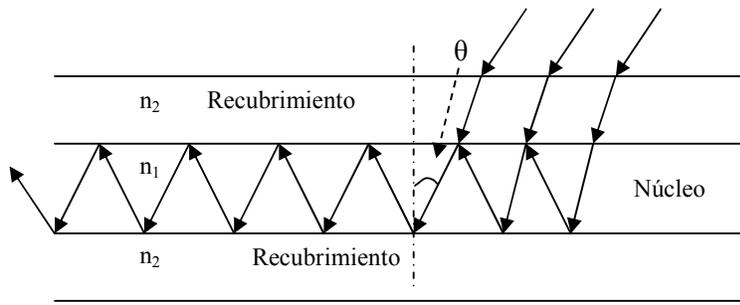
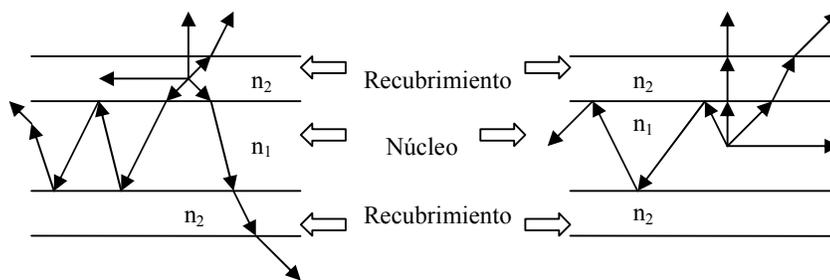


Fig. I.1.1.4. Incidencia de luz a través del recubrimiento. El ángulo  $\theta$  es mayor que el ángulo crítico.

De esta manera, la luz que se utiliza para estimular ópticamente a la fibra óptica de índice escalonado, incide como se muestra en la figura I.1.1.3 o como se muestra en la figura I.1.1.4; pero en cualquiera de los dos casos, se tiene que la estimulación óptica ocurre en el núcleo y en el recubrimiento, aunque es posible que en este último no ocurra en su totalidad, sino solo en el “lado” por donde incidió el haz (o el rayo) de luz.

Además, al analizar la emisión de luz del material (debido a la estimulación óptica) a partir de “fuentes puntuales” localizadas en el interior de la fibra, se tiene que no importa si es en el núcleo o en el recubrimiento donde se encuentran tales “fuentes”, ya que de todas formas la luz saldrá al exterior de la fibra para así ser monitoreada su intensidad como función del tiempo. La figura I.1.1.5 ilustra las diferentes maneras en que se puede emitir la luz cuando la “fuente puntual” se encuentra en el núcleo y cuando se encuentra en el recubrimiento. En cualquiera de estos dos casos, si la luz forma un ángulo menor que el crítico cuando se propaga en la dirección del núcleo hacia el recubrimiento, saldrá al exterior mediante una o varias refracciones, pero para el caso en que forme un ángulo mayor o igual que el crítico lo hará mediante múltiples reflexiones y por el núcleo.



(a) Emisión de luz desde el recubrimiento.

(b) Emisión de luz desde el núcleo.

Fig. I.1.1.5. Emisión de luz de la fibra óptica debido al proceso de estimulación óptica.

El núcleo de la fibra óptica está constituido por uno o varios de los siguientes óxidos:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{As}_2\text{O}_3$  y  $\text{SbO}_3$ . [7]. Sin embargo, se utiliza con más frecuencia el  $\text{SiO}_2$  debido a que es el más abundante en la naturaleza en la forma de  $\text{SiO}_4$ .

El recubrimiento también puede estar constituido por cualquiera de los óxidos mencionados. Para el caso en que tanto el núcleo como el recubrimiento estén constituidos por el mismo óxido (o mezcla de ellos), deben de tener concentraciones diferentes para evitar que el índice de refracción sea el mismo (figura I.1.1.6) y como consecuencia, el haz de luz pase del núcleo al recubrimiento en lugar de realizar múltiples reflexiones en la interfaz núcleo-recubrimiento.

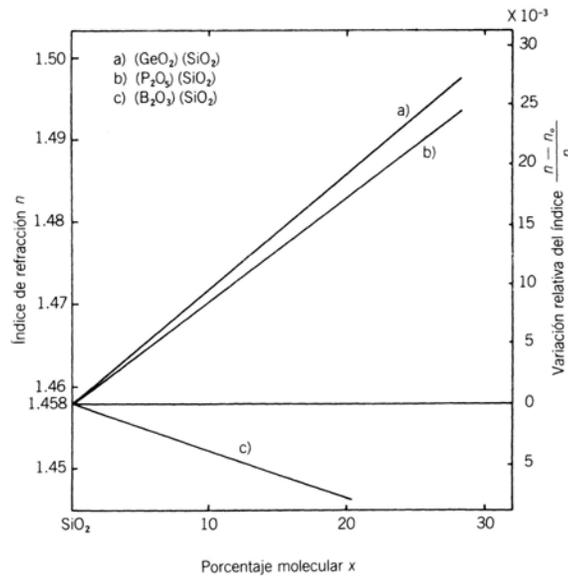


Fig. I.1.1.6. Variación del índice de refracción del  $\text{SiO}_2$  debido a la concentración de otros óxidos utilizados como mezclas (llamados impurezas).  
Caso a) Impurezas de germanio [7].

Además en el núcleo pueden estar presentes iones de metales de transición como: cromo, vanadio, manganeso, hierro, cobalto, cobre o níquel [7].

### I.1.2 Análisis de microscopía de la fibra óptica empleada en la LEO.

Antes de analizar a la fibra óptica mediante rayos X con microscopio electrónico mediante Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), se llevó a cabo su observación mediante un microscopio óptico para determinar si tiene algún tipo de suciedad en la superficie (polvo), cuya composición

aparezca en los resultados del análisis y de paso, determinar las dimensiones del diámetro del núcleo ( $D_n$ ) y del diámetro del núcleo más el recubrimiento ( $D_r$ ), con la intención de conocer (en base a sus dimensiones) que tipo de fibra se utilizó para obtener la LEO. Luego, el análisis al que se sometió la fibra óptica (mediante EDS), es para determinar los elementos que la constituyen.

En el primer caso se colocó la fibra en el portaobjetos de tal manera que la observación del núcleo y del recubrimiento, se hizo a través de la sección longitudinal. Esta observación fue posible hacerse ya que las dos partes que constituyen a la fibra óptica aparecen semitransparentes (el recubrimiento aparece más claro), aunque el borde del recubrimiento no aparece completamente definido. Al medir los diámetros del núcleo ( $D_n$ ) y del núcleo más el recubrimiento ( $D_r$ ) se obtuvo:

$$D_r = (124.0 \pm 0.05) \mu\text{m}$$

$$D_n = (8.0 \pm 0.05) \mu\text{m}$$

Al comparar estos diámetros con los de la tabla I.1.1, se puede decir que se trata de una fibra óptica unimodal de índice escalonado, a pesar de que el valor teórico no queda comprendido dentro de la incertidumbre del valor experimental, lo cual se puede atribuir a la falta de definición de los bordes. Así, el núcleo tiene índice de refracción constante y lo mismo ocurre con el recubrimiento. Además, se puede afirmar que la propagación de la luz puede llevarse a cabo en esta fibra óptica mediante múltiples reflexiones y en particular, emitirse de la fibra como se muestra en la figura I.1.1.5.

En el segundo caso una vez que se confirmó que la superficie de la fibra óptica estaba libre de suciedad, se mandó analizar al Centro de Ciencias de la Materia Condensada de la UNAM.\* Como este análisis determina los elementos presentes en la superficie de los sólidos, entonces al analizar la fibra óptica (de  $124.0 \pm 0.05$ ) $\mu\text{m}$  se puede saber de inmediato, que elementos están presentes en la superficie del recubrimiento. Luego, para conocer los elementos presentes tanto en el interior del recubrimiento como del núcleo, se adelgazó la fibra óptica mediante ácido fluorhídrico (HF) con el fin de repetir el mismo análisis. El diámetro mínimo que se obtuvo de la fibra adelgazada fue de  $(6.4 \pm 0.05)$  $\mu\text{m}$ , por lo que se asegura en este caso, que la parte de la fibra óptica que se analizará es solamente el núcleo. Los demás diámetros que se tomaron para hacerles el análisis de EDS son los que se obtuvieron cada determinados minutos de estar sumergidos en el HF, a diferencia del diámetro de  $(6.4 \pm 0.05)$  $\mu\text{m}$  el cual se obtuvo una vez llegado al diámetro de  $10\mu\text{m}$  (aproximadamente), al introducir de manera intermitente la fibra óptica en el HF.

\*El análisis lo realizaron el Dr. Miguel Ávalos y el Técnico Académico Israel Gradilla.

En la Tabla I.1.2.1 se muestran los valores obtenidos donde D es el diámetro de la fibra y T el tiempo de ataque.

Tabla I.1.2.1. Diámetro de la fibra óptica desgastada.

$D \pm 0.05$ ( $\mu\text{m}$ )	$T \pm 0.5$ (min)
124.0	0
107.1	30
88.5	60
35.7	120
57.1	180
14.3	230
6.4	NO DETERMINADO

En todos los casos en que se realizó el análisis de EDS se obtuvo el mismo resultado. Los elementos presentes en la superficie de la fibra óptica analizada son: silicio, oxígeno y germanio [8]. Figura I.1.2.1.

Esto implica que estos tres elementos se encuentran presentes en el núcleo y en el recubrimiento, pero por tratarse de una fibra óptica unimodal de índice escalonado, tienen que estar en el núcleo bajo una concentración y en el recubrimiento bajo otra.

Con el análisis de EDS no es posible saber si la estructura interna que forman el silicio, el oxígeno y el germanio en la fibra óptica es cristalina o amorfa. Para resolver este problema se recurre al conocimiento referente a la formación de la estructura amorfa del  $\text{SiO}_2$ , a partir de su estructura cristalina al elevar la temperatura a  $1200^\circ\text{C}$  [7]. Temperatura que es incluso superada durante el proceso de fabricación de la fibra óptica y que resulta en nuestro caso, la información relevante por conocer de tal proceso.

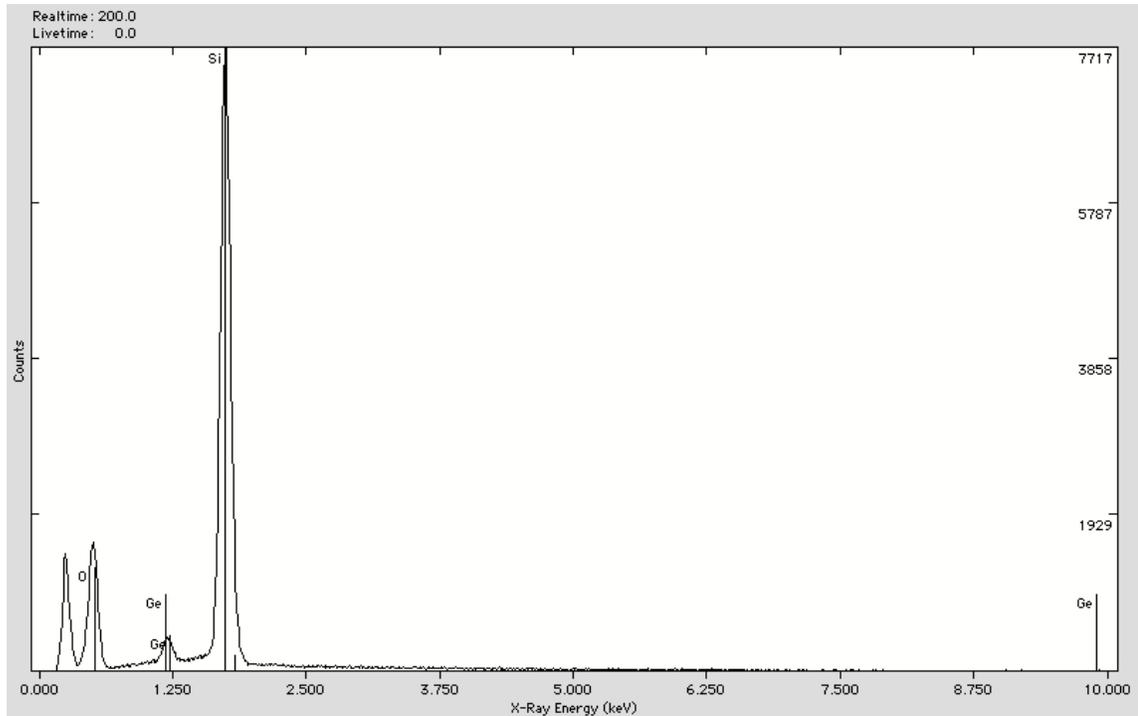


Fig. I.1.2.1. Espectro de la fibra óptica con  $D_r = (124.0 \pm 0.05) \mu\text{m}$  [8].

### I.1.3 Fabricación de la fibra óptica.

Los procesos de fabricación de la fibra óptica de  $\text{SiO}_2$  son principalmente dos: el doble crisol y el preforma [5]. Figura I.1.3.1. La técnica de doble crisol parte de dos crisoles concéntricos que tienen cada uno  $\text{SiO}_2$  pulverizado mezclado con sus impurezas (también pulverizadas) con concentraciones diferentes. Estas mezclas se calientan hasta lograr la fase líquida (de  $2000^\circ\text{C}$  a  $2100^\circ\text{C}$ ). Luego escurren por la parte inferior y al contacto con el aire frío, se solidifican quedando el núcleo y el recubrimiento formados con sus dimensiones requeridas. La técnica de preforma parte de una barra cilíndrica que prefigura la geometría de la fibra. Esta barra tiene por lo regular aproximadamente dos metros de longitud y dos centímetros de diámetro con el núcleo y el recubrimiento ya formados y que por el calentamiento de un extremo, se logran las dimensiones requeridas de la fibra óptica. Para la obtención de la preforma se involucra dos procesos diferentes que originan a la vez, dos técnicas distintas: la deposición de vapores químicos (CVD) y la deposición axial de vapores (VAD) [5]. La técnica de CVD admite diferentes variantes: la oxidación interior en fase de vapor (IPVD), la oxidación exterior en fase de vapor (OPVD), la

deposición de vapores químicos modificado (MCVD) y la deposición de vapores químicos activado por plasma (PCVD) [5]. En las dos primeras variantes, la preforma se obtiene en dos etapas siendo en la segunda de ellas donde se involucra una temperatura de 1500°C, mientras que en las dos últimas, en su proceso la temperatura alcanza los 1900°C. En el proceso VAD también se involucra a la temperatura para la realización de la preforma y dicho valor corresponde a 1500°C.

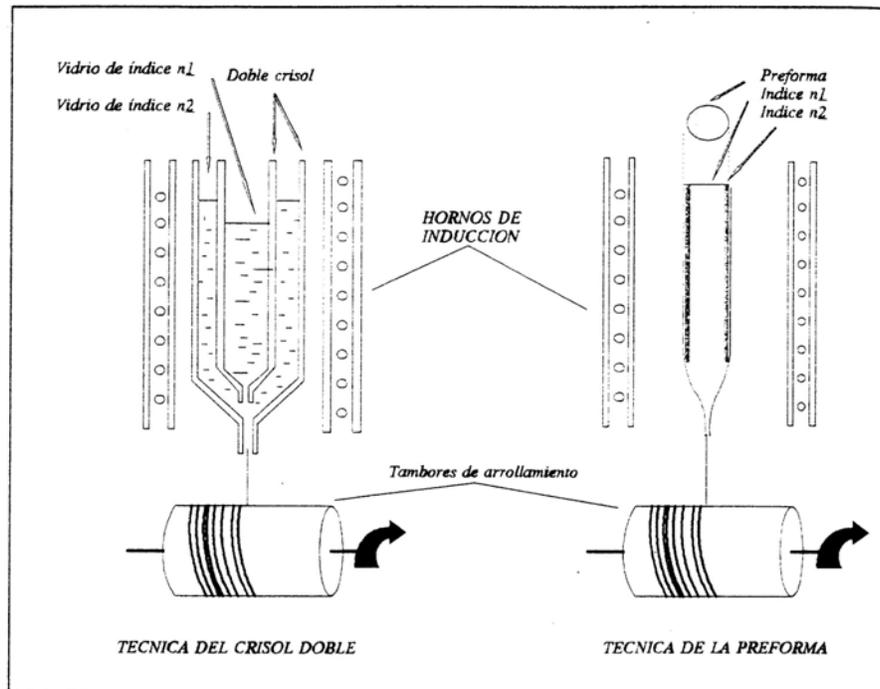


Fig. I.1.3.1. Procesos de fabricación de la fibra óptica [5].

Por lo tanto, si el  $\text{SiO}_2$  utilizado para la fabricación de la fibra óptica tiene estructura interna cristalina, entonces no importa cual sea el método o técnica empleada en la fabricación, ya que la fibra óptica adquirirá estructura interna amorfa.

Dado que se puede decir que la fibra óptica tiene como elementos al silicio (Si), al oxígeno (O) y al germanio (Ge) y además estructura interna amorfa, entonces ahora hay que mostrar la manera en como se enlazan estos elementos.

## I.2 Los sólidos cristalinos y los sólidos amorfos.

Los sólidos en general se caracterizan externamente por tener forma propia. Los átomos de los sólidos han perdido la facultad que tienen de moverse libremente como lo hacen en los líquidos y sobre todo en los gases y no conservan más que el movimiento vibratorio a uno y otro lado de una posición de equilibrio determinada. Los sólidos se clasifican en base a su estructura interna como: cristalinos y amorfos. La estructura interna de los primeros adopta formas poliédricas mientras que la de los segundos no. Los sólidos amorfos carecen de punto de fusión bien definido debido a que los enlaces que los forman, presentan múltiples variaciones (como por ejemplo diferente distancia interatómica o diferente ángulo de enlace), lo que da lugar a que no se produzca la misma agitación térmica entre los átomos y como consecuencia no se produzca la ruptura de los enlaces al mismo tiempo.

### I.2.1 El $\text{SiO}_2$ cristalino puro.

La estructura interna cristalina se caracteriza porque los átomos que la forman, adoptan una distribución tridimensional periódica; es decir, al trasladarse paralelamente en cualquiera de sus tres dimensiones, el aspecto que se tiene de la estructura, es el mismo que se tenía antes de producirse la traslación.

La estructura interna del  $\text{SiO}_2$  cristalino puro (denotado simplemente como  $\text{SiO}_2$  [2]), se basa en la forma tetraédrica de la molécula de  $\text{SiO}_4$ , en la que se agrupan entre sí las moléculas de  $\text{SiO}_2$ .  
Figura I.2.1.1.

Los tetraedros de  $\text{SiO}_4$  se agrupan en diferentes configuraciones que dependen de la temperatura y presión a la que se someten. Estas configuraciones se presentan en lo que se conoce como: cuarzo de baja temperatura (cuarzo- $\alpha$ ), cuarzo de alta temperatura (cuarzo- $\beta$ ), tridimita y coesita.

La dependencia de la temperatura y la presión del  $\text{SiO}_4$  se muestran mediante el diagrama de fases de la figura I.2.1.2. Además en la tabla I.2.1.1 se indican algunas propiedades estructurales del  $\text{SiO}_4$ .

Sin embargo, cada una de estas formas (configuraciones) que puede tener el  $\text{SiO}_2$ , solo representan el caso ideal de su estructura. En realidad en la estructura interna del  $\text{SiO}_2$  existen defectos que son los responsables de que se pierda la periodicidad en toda la estructura y solo se conserve en pequeñas regiones o incluso en ninguna. De acuerdo a consideraciones puramente geométricas los defectos se clasifican como: puntuales, lineales, de superficie y de volumen [10]. Los defectos puntuales se clasifican a la vez como: de Frenkel (vacancias e intersticios) y sustitucionales [10]. Figura I.2.1.3.

Una vacancia es la falta de un átomo en un nodo de la estructura interna del sólido cristalino, mientras que un intersticio, es un átomo externo a la estructura que se “coloca” entre los átomos (y no en un nodo) que constituyen la estructura interna. Un defecto sustitucional (también llamado átomo sustitucional), es un átomo externo que sustituye a uno de la estructura interna del sólido cristalino en un nodo.

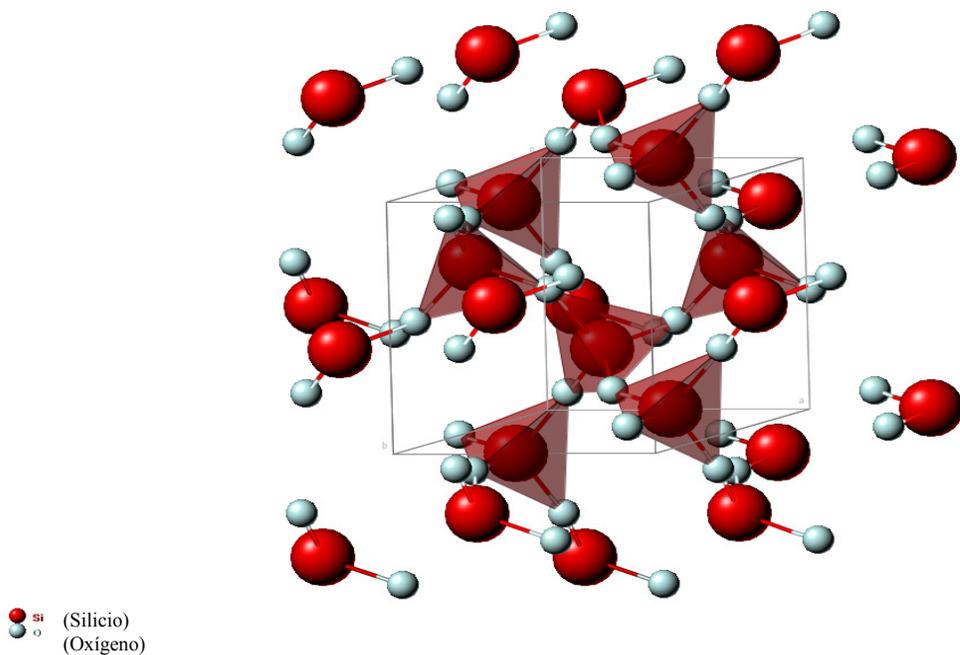


Fig. I.2.1.1. Estructura interna del SiO<sub>2</sub> cristalino\*.

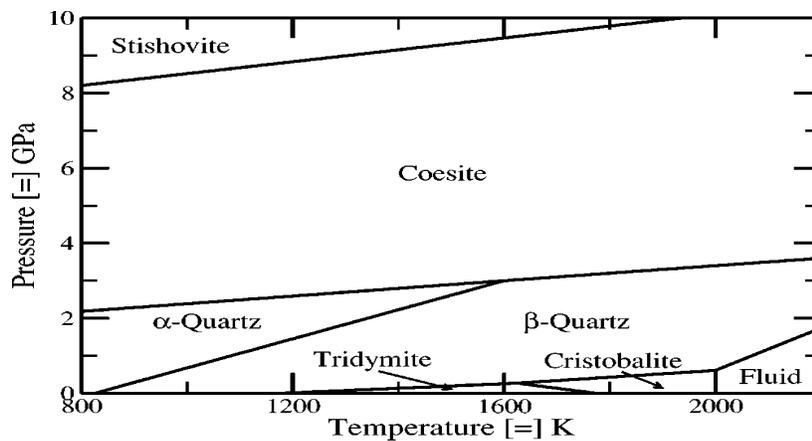


Fig. I.2.1.2. Diagrama de fase del SiO<sub>2</sub> [9].

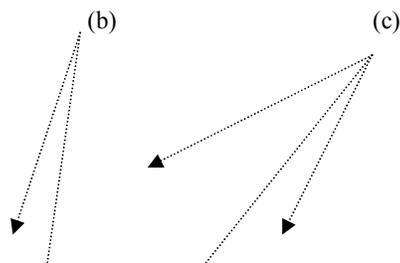
\*Esta figura se tomo de la siguiente dirección electrónica: <http://webmineral.com/data/Quartz.shtml>.

Tabla I.2.1.1. Propiedades estructurales del SiO<sub>2</sub> [2].

Fase	Distancia Si-O (nm)	Distancia O O (nm)	Ángulo de enlace O-Si-O. (grados)
Cuarzo-α (baja temperatura)	0.161	0.260-0.267	144
Cuarzo-β (alta temperatura)	0.162	0.260	144
Tridimita	0.158-0.162	0.263	146
Coesita	0.160-0.163	0.260-0.267	146

En las estructuras con empaquetamiento compacto como la del SiO<sub>2</sub>, los defectos más comunes que se presentan son los sustitucionales [10].

Así, para el caso del SiO<sub>2</sub> una vacancia, un intersticio o un átomo sustitucional tiene que ver con un átomo de silicio o uno de oxígeno de la molécula de SiO<sub>4</sub> que presenta las características que define cualquiera de los defectos puntuales.



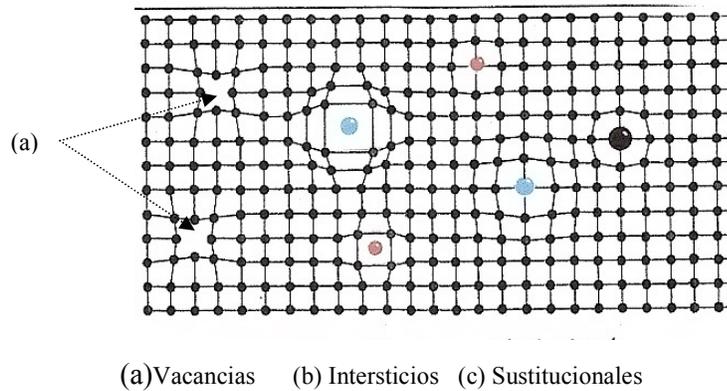


Fig. I.2.1.3. Defectos puntuales de los sólidos cristalinos.

Gubanov y otros [11], demostraron por la vía experimental la existencia de la vacancia de oxígeno en la molécula de  $\text{SiO}_4$ , mientras que de la existencia de la vacancia de silicio no se encontró información. Por otro lado, Roma [12] menciona que mediante un modelo teórico, se predice de la existencia del oxígeno como intersticio (no se encontró información de algún experimento que lo compruebe), mientras que de la existencia del silicio como intersticio, no se encontró ninguna información. Por último, de la existencia de átomos sustitucionales de germanio (por átomos de silicio) se tiene conocimiento a partir de la referencia [2].

### 1.2.2 El $\text{SiO}_2$ amorfo puro.

Nérou menciona en su libro [7] que el  $\text{SiO}_2$  pasa de estructura interna cristalina a estructura interna amorfa al elevar la temperatura a  $1200^\circ\text{C}$ . El  $\text{SiO}_2$  amorfo puro se denota como a- $\text{SiO}_2$  [2]. La característica principal del a- $\text{SiO}_2$  es la pérdida de la periodicidad en toda la estructura [2]. En el a- $\text{SiO}_2$  algunos de los enlaces O-Si-O se desalinean (como consecuencia el ángulo que forman también cambia) mientras otros enlaces se rompen. Aparecen regiones de átomos aislados y regiones enlazadas a la estructura amorfa por medio de un único enlace. Además, la distancia entre los átomos que forman el enlace Si-O también cambia, así como la distancia entre los átomos de oxígeno.

Devine y otros [2] mencionan como defectos del a- $\text{SiO}_2$  equivalentes a los defectos de las estructuras cristalinas (los cuales dan lugar a los niveles de energía discretos), a los elementos enlazados de la siguiente manera:

- i)  $\equiv\text{Si}$  .- Ruptura de un enlace Si-O en una molécula de  $\text{SiO}_4$  quedando el Si enlazado con tres oxígenos.
- ii)  $\equiv\text{Si-Si}\equiv$  .- Ruptura de un enlace Si-O en dos moléculas vecinas de  $\text{SiO}_4$  para ahora enlazarse entre ellas mediante los silicios, donde además, cada silicio queda enlazado con tres oxígenos.
- iii)  $\equiv\text{Si-O}^*$  (NBOHC) .- Pérdida de un electrón en un enlace Si-O de una molécula de  $\text{SiO}_4$ .
- iv)  $\text{O}=\text{O}$  ( $\text{O}_2$ ) .- Ruptura de un enlace Si-O en dos moléculas vecinas de  $\text{SiO}_4$  para ahora enlazarse los oxígenos entre sí pero no con la red.
- v)  $\equiv\text{Si-O-O}^*$  (Radical peróxido) .- Pérdida de dos enlaces Si-O en una molécula de  $\text{SiO}_4$  para dar lugar a la formación de un enlace O-O que se enlaza con la red a través del silicio, perdiendo a la vez el enlace O-O un electrón.
- vi)  $\equiv\text{Si}^*$  (Centro E) .- Ruptura de un enlace Si-O en una molécula de  $\text{SiO}_4$  quedando el silicio enlazado con tres oxígenos y sobre el silicio un electrón.
- vii)  $\text{O}^*$  (Oxígeno Móvil) .- Oxígeno no enlazado a ningún elemento de la estructura.
- viii)  $\text{O}_3^+$  (Ozono ionizado) .- Pérdida de un electrón en un oxígeno que se enlaza con otros dos oxígenos.

### I.2.3 El $\text{SiO}_2$ cristalino con impurezas de germanio.

En el  $\text{SiO}_2$  una impureza de germanio se presenta como un átomo sustitucional [2]. En este caso, un átomo de silicio es sustituido por uno de germanio dentro de la molécula de  $\text{SiO}_4$ . Al  $\text{SiO}_2$  cristalino con impurezas de germanio se le denota como  $\text{SiO}_2:\text{Ge}$  [2].

Para justificar que la estructura cristalina del  $\text{SiO}_2$  no se perturba significativamente debido a la impureza de germanio; es decir, que no se producen cambios significativos en la forma de la estructura del  $\text{SiO}_2$ , ni en la manera en que se “mueven” los electrones en los átomos vecinos a la impureza, primero se ilustrará los cambios que produce una impureza de arsénico en la estructura cristalina formada por átomos de silicio y después, los que produce una impureza de galio en la misma estructura cristalina de silicio.

La estructura cristalina de átomos de silicio (figura I.2.3.1) tiene en cada átomo de silicio, cuatro electrones (de valencia) que forman parte del enlace covalente (en este enlace los electrones “van y vienen” de uno a otro átomo) que mantiene unido a los átomos de silicio.

En tanto en la estructura cristalina de átomos de silicio con una impureza de arsénico (valencia 5) donde el arsénico sustituye a un átomo de silicio (figura I.2.3.2), uno de los cinco electrones de valencia del arsénico no “va y viene” de este átomo a algún otro de silicio más cercano. El electrón

sobrante se queda “orbitando” el átomo de arsénico a cierta distancia del núcleo y se dice que está en un nivel de energía discreto ocupado por el electrón [13].

En la estructura cristalina de átomos de silicio con una impureza de galio (valencia 3) donde el galio sustituye a un átomo de silicio (figura I.2.3.3), los tres electrones de valencia del galio “van y vienen” de este átomo a los de silicio que están más cercanos a él. En cambio, uno de los átomos de silicio cercano al galio no encuentra el electrón con el que debería enlazarse. La ausencia de este electrón se considera como un hueco que se encuentra “orbitando” a la impureza; es decir, se ha formado un nivel de energía discreto el cual se encuentra ocupado por un hueco [13]. Además, tanto el nivel de energía discreto ocupado por un electrón como el ocupado por un hueco, pueden estar desocupados si el electrón o el hueco se “mueven” a través de la estructura.

En el caso del  $\text{SiO}_2$  (figura I.2.3.4) cada átomo de silicio (valencia 4) está enlazado (mediante enlace covalente) con cuatro átomos de oxígeno (valencia 6) y cada átomo de oxígeno se encuentra enlazado con dos átomos de silicio, por lo que, tanto los átomos de silicio como los de oxígeno no tienen electrones ni huecos que los “orbiten”, ni electrones ni huecos que se muevan por la estructura.

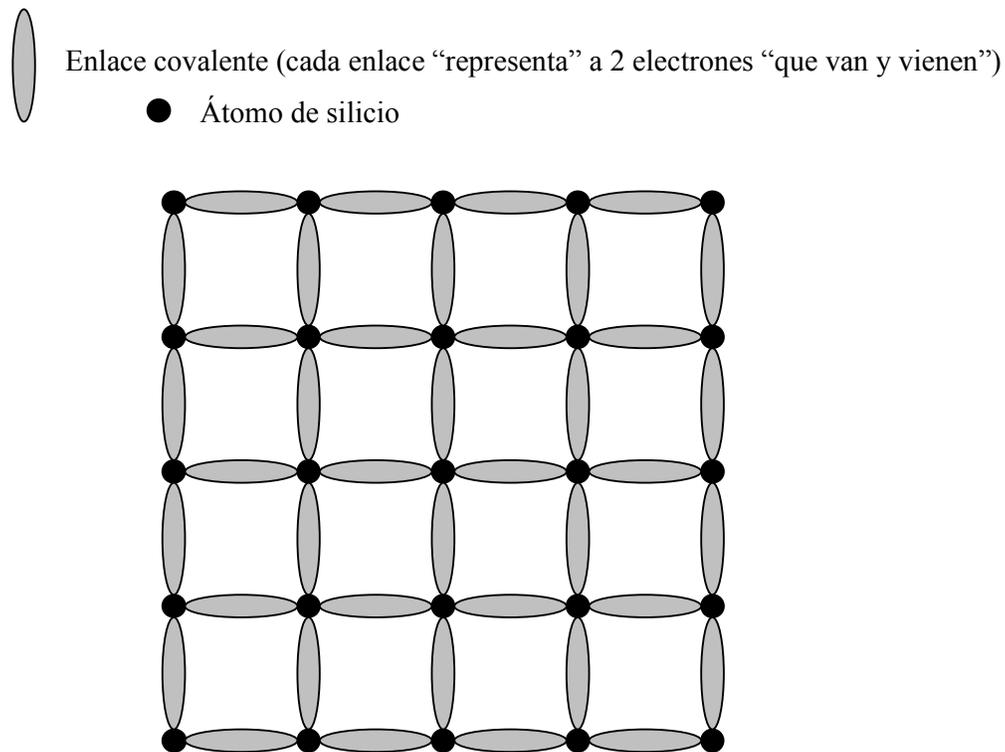
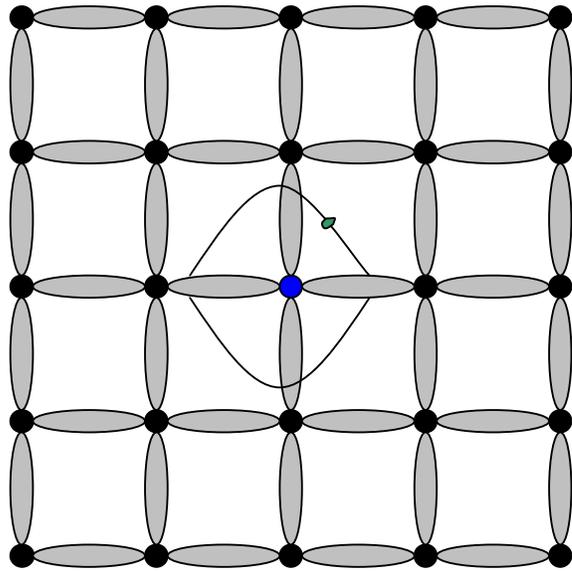


Fig. I.2.3.1. Estructura cristalina de átomos de silicio.

● Átomo de silicio      ● Átomo de arsénico      ● Electrón sobrante



+

Fig. I.2.3.2. Estructura cristalina de átomos de silicio con una impureza de arsénico [13].

● Átomo de silicio      ● Átomo de galio      ● Hueco orbitando

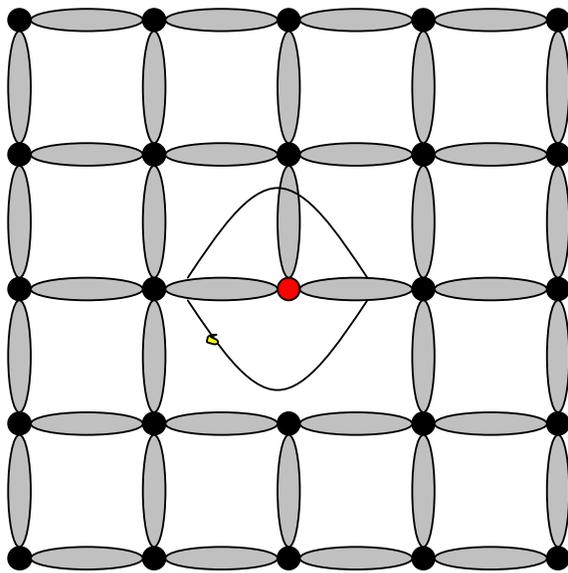


Fig. I. 2.3.3. Estructura cristalina de átomos de silicio con una impureza de galio [13].

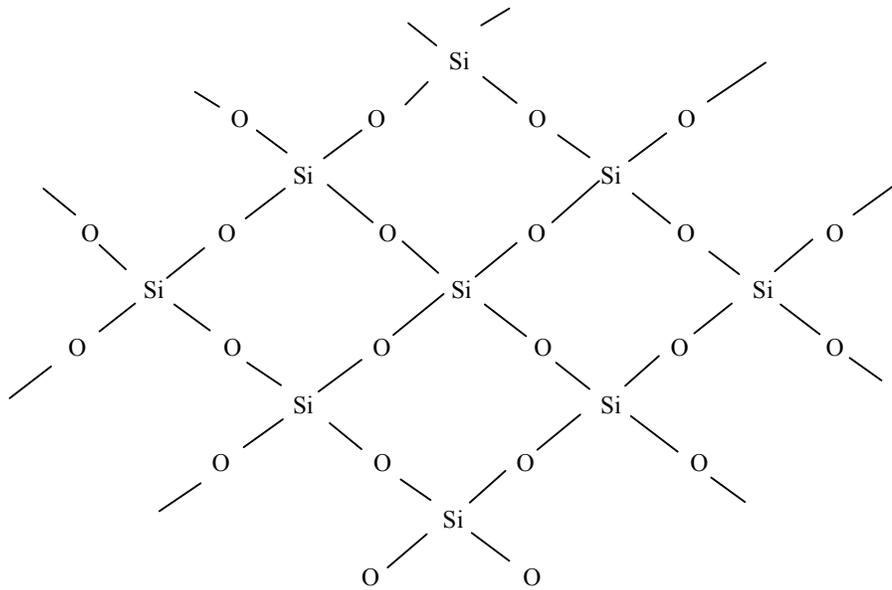


Fig. I.2.3.4. Estructura cristalina del  $\text{SiO}_2$  puro en dos dimensiones [2].

Luego, al introducir una impureza de germanio en el  $\text{SiO}_2$ , no “orbitan” ni electrones ni huecos en la impureza ya que tiene la misma cantidad de electrones de valencia que el silicio. Por lo que la presencia del germanio no da lugar a la existencia de niveles de energía discretos; es decir, no se “perturba” significativamente a la red cristalina del  $\text{SiO}_2$ .

Así, la estructura interna del  $\text{SiO}_2:\text{Ge}$  para propósitos de describir la LEO se puede considerar que es muy parecida a la del  $\text{SiO}_2$  ya que además el radio atómico del silicio (118pm) y del germanio (112pm) [14] también son parecidos en comparación con los radios atómicos del resto de los elementos de la tabla periódica.

#### I.2.4 El $\text{SiO}_2$ amorfo con impurezas de germanio.

Las impurezas en un sólido cristalino como el  $\text{SiO}_2$  constituyen la proporción menor de átomos (del orden de partes por millón) que forman parte de la estructura interna. Por esta razón, si al elevar la temperatura del  $\text{SiO}_2$  a  $1200^\circ\text{C}$  la estructura interna pasa de cristalina a amorfa, entonces también se debe pasar la estructura interna del  $\text{SiO}:\text{Ge}$  a estructura amorfa a una temperatura muy cercana (si no es que a la misma) que la utilizada para el  $\text{SiO}_2$ . El  $\text{SiO}_2:\text{Ge}$  bajo estructura amorfa se denota como: a- $\text{SiO}_2:\text{Ge}$  [2].

En el a- $\text{SiO}_2:\text{Ge}$  se pierde toda la periodicidad que tenía el  $\text{SiO}_2:\text{Ge}$  en su estructura interna. Los defectos en el a- $\text{SiO}_2:\text{Ge}$  son los mismos que se presentan en el a- $\text{SiO}_2$  y hay que agregar aquellos

formados por las impurezas de germanio, los cuales al presentarse como átomos sustitucionales, son semejantes a aquellos defectos en donde participa el silicio; es decir, hay que agregar al conjunto de defectos, aquellos en donde en lugar del silicio aparece el germanio. Así, todos los defectos presentes en el a-SiO:Ge son:

- 1)  $\equiv\text{Si} \cdot$  .- Ruptura de un enlace Si-O en una molécula de  $\text{SiO}_4$  quedando el Si enlazado con tres oxígenos.
- 2)  $\equiv\text{Si-Si}\equiv$  .- Ruptura de un enlace Si-O en dos moléculas vecinas de  $\text{SiO}_4$  para ahora enlazarse entre ellas mediante los silicios, donde además, cada silicio queda enlazado con tres oxígenos.
- 3)  $\equiv\text{Si-O}^*$  (NBOHC) .- Pérdida de un electrón en un enlace Si-O de una molécula de  $\text{SiO}_4$ .
- 4)  $\text{O}=\text{O}$  ( $\text{O}_2$ ) .- Ruptura de un enlace Si-O en dos moléculas vecinas de  $\text{SiO}_4$  para ahora enlazarse los oxígenos entre sí pero no con la red.
- 5)  $\equiv\text{Si-O-O}^*$  (Radical peróxido) .- Pérdida de dos enlaces Si-O en una molécula de  $\text{SiO}_4$  para dar lugar a la formación de un enlace O-O que se enlaza con la red a través del silicio, perdiendo a la vez el enlace O-O un electrón.
- 6)  $\equiv\text{Si}^*$  (centro E) .- Ruptura de un enlace Si-O en una molécula de  $\text{SiO}_4$  quedando el silicio enlazado con tres oxígenos y sobre el silicio un electrón.
- 7)  $\text{O}^*$  (Oxígeno móvil) .- Oxígeno no enlazado a ningún elemento de la estructura.
- 8)  $\text{O}_3^+$  (Ozono ionizado) .- Pérdida de un electrón en un oxígeno que se enlaza con otros dos oxígenos.
- 9)  $\equiv\text{Ge} \cdot$  .- Ruptura de un enlace Ge-O en una molécula de  $\text{GeO}_4$  quedando el Ge enlazado con tres oxígenos.
- 10)  $\equiv\text{Ge-Ge}\equiv$  .- Ruptura de un enlace Ge-O en dos moléculas vecinas de  $\text{GeO}_4$  para ahora enlazarse entre ellas mediante los germanios, donde además, cada germanio queda enlazado con tres oxígenos.
- 11)  $\equiv\text{Si-Ge}\equiv$  .- Ruptura de un enlace Si-O y de un Ge-O en dos moléculas vecinas de  $\text{SiO}_4$  y  $\text{GeO}_4$  para ahora enlazarse entre ellas mediante el silicio y el germanio, donde además, el silicio y el germanio quedan enlazados con tres oxígenos.
- 12)  $\equiv\text{Ge-O}^*$  .- Pérdida de un electrón en un enlace Ge-O de una molécula de  $\text{GeO}_4$ .
- 13)  $\equiv\text{Ge-O-O}^*$  .- Pérdida de dos enlaces Ge-O en una molécula de  $\text{GeO}_4$  para dar lugar a la formación de un enlace O-O que se enlaza con la red a través del germanio, perdiendo a la vez el enlace O-O un electrón.

14)  $\equiv\text{Ge}^*$  .- Ruptura de un enlace Ge-O en una molécula de  $\text{GeO}_4$  quedando el germanio enlazado con tres oxígenos y sobre el silicio un electrón.

De esta manera la estructura interna del  $\alpha\text{-SiO}_2\text{:Ge}$  está formada por los defectos presentes que se enlazan en cadenas de diferentes tamaños, en donde algunas no están enlazadas a la “red” amorfa sino aislados. En la figura I.2.4.1 se muestra la forma que puede llegar a tomar la estructura amorfa en alguna de sus partes.

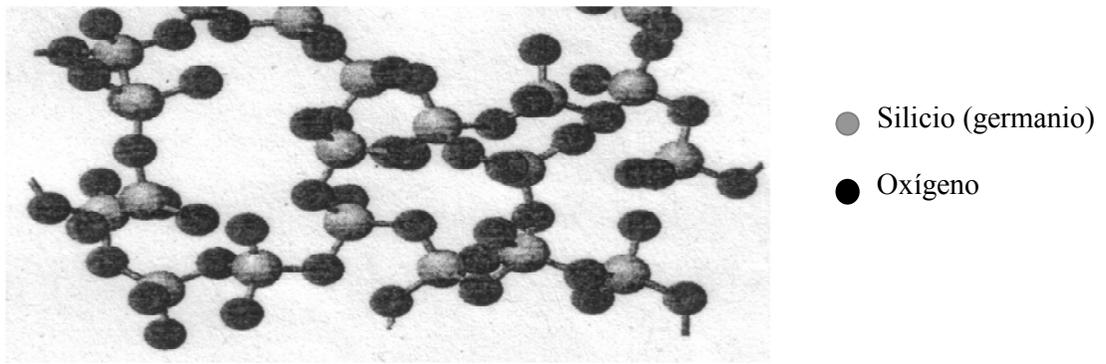


Fig. I.2.4.1. Estructura amorfa del  $\text{SiO}_2$  [14].

### I.3 La radiación ionizante.

Se da el nombre de radiación ionizante a las partículas cargadas (betas, alfas, protones y otras) que provienen de ciertos núcleos atómicos y que ionizan a los átomos de la materia en la cual penetran. Para que ello ocurra, es necesario que la energía de estas partículas cargadas sea superior a la energía de ionización de los átomos. Esta condición siempre se cumple porque las energías de ionización de los átomos son del orden de electrón-volts (eV), mientras que las energías de las radiaciones nucleares son del orden de kiloelectrón-volts (KeV) o incluso megaelectrón-volts (MeV) [15]. Las partículas ionizantes actúan directamente sobre los átomos que encuentran en su camino. La radiación ionizante separa completamente a un electrón del resto del átomo. Como los electrones que se encuentran más cercanos al núcleo están ligados a él más fuertemente en comparación con los más alejados; así, los primeros electrones necesitan más energía para ser ionizados, mientras que los segundos necesitan menos, por lo que en ocasiones los primeros solo

son excitados. La característica básica de la radiación ionizante es que su energía está concentrada en espacios muy pequeños, a diferencia de la radiación electromagnética cuya energía se encuentra en espacios grandes.

### I.3.1 La radiación ionizante beta menos.

Los núcleos de algunos átomos (núcleos donde el número de neutrones es mayor que el número atómico), pueden decaer espontáneamente y producir radiación ionizante. Esta radiación se puede presentar como radiación beta. La radiación beta consiste de partículas individuales cargadas eléctricamente de masa extremadamente pequeña, las cuales son emitidas a velocidades cercanas a la de la luz. La radiación beta puede ser de dos tipos: beta menos y beta más. Las betas menos, son iguales a los electrones de los átomos de la materia en la cual penetran e idénticas entre sí, mientras que las betas más, son positrones, o sea, partículas con la misma masa que el electrón pero con carga positiva. Las betas menos van avanzando en el material en el que penetran, en trayectorias que no son rectas e incluso pueden retrodispersarse y salir del material antes de frenarse totalmente, así como se ilustra en la figura I.3.1.1, por lo que su alcance no está bien definido y no es el mismo para cada beta menos. Cuando una beta menos ha perdido toda su energía y se detiene dentro del material constituye una carga eléctrica extra.

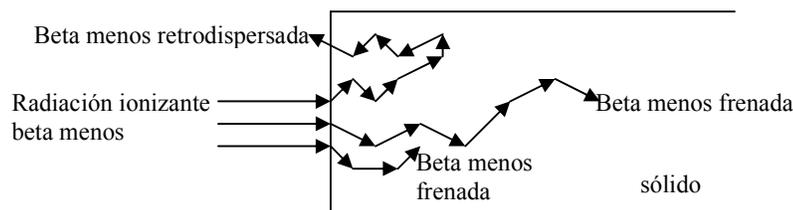


Fig. I.3.1.1. Trayectoria de la radiación beta menos en un sólido en general [16].

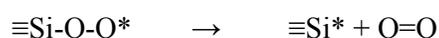
Por tal motivo, no se puede conocer con precisión cuanto penetra la radiación beta menos (proporcionada por una fuente de  $^{90}\text{Sr}$ ), la superficie de la fibra óptica de  $\text{a-SiO}_2\text{:Ge}$ . Las betas menos de la fuente de  $^{90}\text{Sr}$  tienen una energía de 546KeV [17]. El paso de las betas menos a través de la materia también se manifiesta en forma de calor en virtud de la energía cinética que se disipa.

La radiación beta menos puede también producir ciertas “reacciones químicas”, lo que se manifiesta como cambios en la estructura interna del material [18]. La radiación beta menos puede

ser detectada y medida su intensidad en base a la ionización que produce en los sólidos aislantes y semiconductores (como ocurre en la LEO), por lo que estos últimos se utilizan como detectores.

### I.3.2 Interacción de la radiación ionizante beta menos con el SiO<sub>2</sub> amorfo puro.

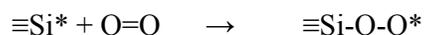
Uchino y otros [18], encontraron experimentalmente que la radiación ionizante, aparte de producir iones y cargas atrapadas, produce centros E y otros defectos en el a-SiO<sub>2</sub>. Los centros E son los defectos que se producen en mayor cantidad y esto ocurre cuando interacciona la radiación beta menos con el a-SiO<sub>2</sub> y se lleva a cabo lo siguiente [18]:



Puede ocurrir una ligera variante en la formación del centro E y en lugar de presentarse como en la reacción anterior, se presenta sin el electrón enlazado; es decir, con el silicio ionizado.



Aunque en menor proporción, también es posible que se lleve a cabo la forma inversa [18]; es decir, que se lleve a cabo:



De esta manera si el SiO<sub>2</sub> y el SiO<sub>2</sub>:Ge son muy parecidos, para los fines que se persiguen (describir la LEO de la fibra óptica), entonces las “reacciones” anteriores deben de llevarse a cabo también en el a-SiO<sub>2</sub>:Ge.

Por otro lado, Uchino y otros [18] también encontraron experimentalmente en el a:SiO<sub>2</sub> que la radiación beta menos está relacionada con la emisión de exoelectrones; es decir, con electrones que salen expulsados del sólido amorfo una vez que se eleva la temperatura a dicho sólido (previamente expuesto a la radiación ionizante). En particular, a esta forma de obtener exoelectrones se le llama emisión exoelectrónica estimulada térmicamente (EEE-T) y se asegura [18] que los electrones de la EEE-T provienen de los defectos del a-SiO<sub>2</sub>. Además, no se observan exoelectrones si el a-SiO<sub>2</sub> no es expuesto a la radiación ionizante mencionada lo cual se cree se debe a la ausencia de electrones atrapados en los defectos.

Como algunos exoelectrones salen casi espontáneamente del  $\alpha$ -SiO<sub>2</sub> una vez expuestos a la radiación beta menos [18]; es decir, sin necesidad de elevar tanto la temperatura, esto significa que se necesita poca energía, para expulsar a los electrones atrapados. La presencia de estos posibles niveles, posteriormente se verá (capítulo III) que resultan de utilidad a la hora de exponer el modelo.

## CAPITULO II

### Luminiscencia Estimulada Ópticamente (LEO)

#### II.1 El fenómeno de la luminiscencia.

La luminiscencia es la emisión de luz de los materiales aislantes o semiconductores, a partir de la energía procedente de la radiación ionizante que se encuentra “almacenada” y se manifiesta de esta manera, cuando otra forma de energía externa estimula la emisión de luz; es decir, la luminiscencia no tiene que ver con la incandescencia, la cual está relacionada con la temperatura a la que el material emite luz. Para especificar en la luminiscencia el tipo de energía externa que se utiliza para estimularla, se acostumbra agregar el prefijo respectivo. Así, por mencionar algunos ejemplos, se tiene que si la energía externa proviene del bombardeo de electrones entonces se llama catodoluminiscencia; si proviene de una campo magnético, magnetoluminiscencia; si lo hace de la temperatura, termoluminiscencia, aunque esta última se puede llamar luminiscencia estimulada térmicamente y si proviene de la luz, luminiscencia estimulada ópticamente (LEO). La fotoluminiscencia es otro fenómeno diferente al de la LEO que consiste en la emisión de luz pero mediante otro mecanismo (excitación).

#### II.1.1 Fluorescencia y fosforescencia.

Los materiales luminiscentes se clasifican como: fluorescentes y fosforescentes. Se dice que es fluorescente si la luminiscencia se interrumpe en el mismo momento en que se interrumpe la energía externa que la estimula; más precisamente, si tarda menos de  $1 \times 10^{-8}$  segundos en interrumpirse la luminiscencia después de hacerlo la energía que la estimula. Se dice fosforescente si tarda en interrumpirse más que este tiempo. Conviene explicar porqué se da la fluorescencia y la fosforescencia en los sólidos (cristalinos) mediante la teoría de bandas de los sólidos, ya que resulta adecuada para ilustrar el efecto que produce la radiación ionizante en los electrones de valencia del sólido, así como el efecto que produce la energía externa que estimula la emisión de luz; pero principalmente, porque se pueden representar los niveles de energía discretos de tal manera que se puede relacionar con ellos, la cantidad de energía requerida para estimular la emisión de luz y porque es posible calcular en base a los niveles de energía discretos, la longitud de onda de la luz emitida.

## II.2 Teoría de bandas.

La teoría de bandas es una teoría mecánico-cuántica que estudia el movimiento de los electrones en los sólidos cristalinos. Esta teoría predice que las energías que el electrón puede tener, están restringidas a ciertos límites o bandas. Las bandas de energía permisibles que tienen los electrones algunas veces se superponen y otras se encuentran separadas. En el caso en que las bandas se encuentren separadas, los electrones cambian de banda al ionizarse; esto es, pueden realizar transiciones de una banda a otra, para después ir de una banda a un nivel de energía discreto. La manera en como ocurren estas transiciones se analizará más adelante (en II.2.3).

### II.2.1 Niveles de energía.

Los niveles de energía de un átomo representan a las regiones alrededor del núcleo en donde se puede “localizar” a los electrones. Átomos iguales separados una distancia lo suficientemente grande para que no sientan su presencia mutua, tienen los mismos niveles de energía discretos; sin embargo, la presencia de un átomo en la cercanía del otro, es motivo suficiente para que los niveles de energía se alteren. Dicho cambio es gradual y es debido a que cuando los átomos están muy cercanos, los electrones constituyen un sistema único de electrones comunes que cumplen el principio de exclusión de Pauli; es decir, que cada uno tiene su propio estado cuántico (el cual representa la región más probable en donde se “localice” cada electrón).

Así, para el caso de un átomo de hidrógeno separado de otro átomo de hidrógeno una distancia lo suficientemente grande, los niveles de energía que tienen (cada uno) se muestran en la figura II.2.1.1.

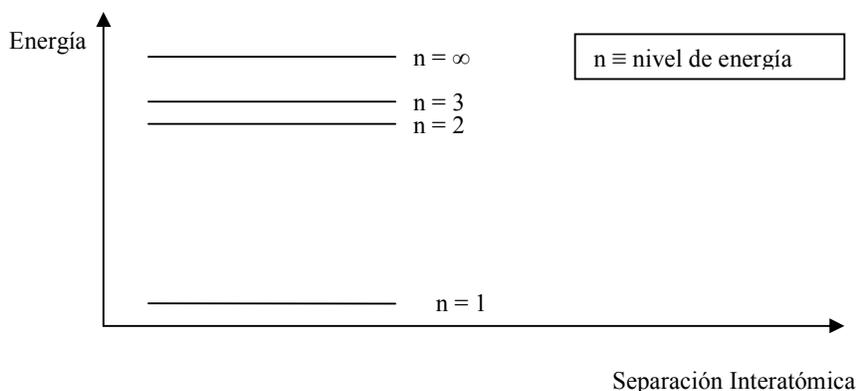


Fig. II.2.1.1 Niveles de energía de cada átomo de hidrógeno. La separación entre los dos átomos es lo suficientemente grande. [13].

Para el caso de un átomo de hidrógeno en la cercanía de otro, los niveles de energía se muestran en la figura II.2.1.2.

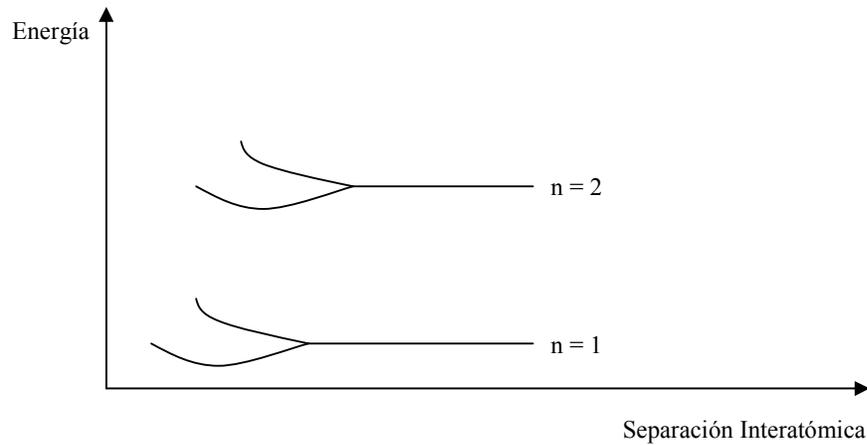


Fig. II.2.1.2. Niveles de energía de cada átomo de hidrógeno. La separación entre los dos átomos va disminuyendo. [13].

Para seis átomos de hidrógeno en cercanía uno del otro, cada nivel se separa en seis niveles como lo muestra la figura II.2.1.3 y para el caso de  $n$  átomos de hidrógeno el comportamiento es similar.

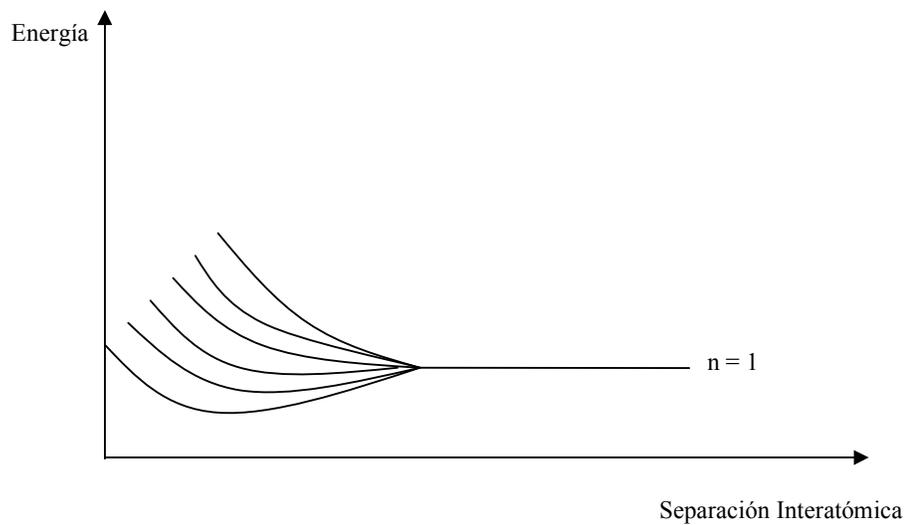
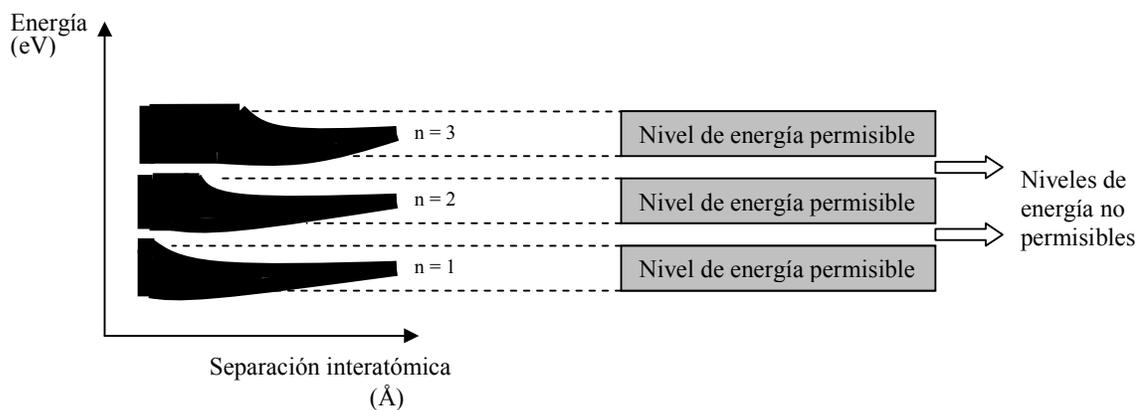


Fig. II.2.1.3 Niveles de energía de cada átomo de hidrógeno cuando se encuentran los seis cerca uno del otro [13].

## II.2.2 Bandas de energía.

Si se considera a un sólido cristalino como una molécula compuesta de  $N$  átomos (iguales), entonces cada nivel de energía de los átomos se divide en  $N$  estados [19]. Figura II.2.2.1(a). En este caso, cada nivel se encuentra muy junto uno del otro y se dice que forman un continuo de niveles llamado banda de energía. Es costumbre representar estas bandas de forma horizontal separadas por espacios en blanco que representan las energías no permisibles que tienen los electrones. Figura II.2.2.1 (b). De esta manera cuando los electrones pasan de una banda de energía a otra debido a su interacción con alguna forma de energía externa, atraviesan las bandas de energía no permisibles.



(a). Niveles de energía de  $N$  átomos iguales.

(b). Bandas de energía de los  $N$  átomos iguales.

Fig. II.2.2.1. Niveles de energía de los sólidos cristalinos [19].

En los sólidos cristalinos los electrones se ubican en el nivel más bajo de energía permisible y cuando este se llena, se ubican en el siguiente más bajo y así sucesivamente hasta que todos los electrones están acomodados [19]. La última banda de energía llena se llama banda de valencia y la siguiente banda que puede estar parcialmente llena o completamente vacía, banda de conducción. Figura II.2.2.2. Al nivel de energía no permisible ubicado entre la banda de valencia y la banda de conducción se le acostumbra llamar banda prohibida. La separación entre la banda de valencia y la de conducción; es decir, el ancho de la banda prohibida, se expresa por lo regular en unidades de electrón-volts (eV).

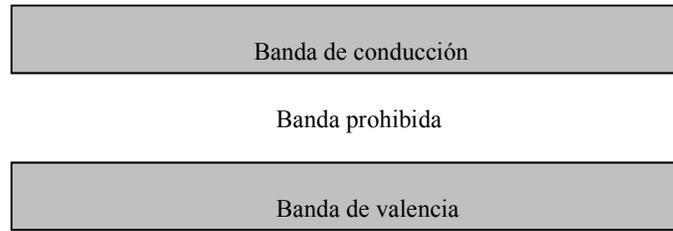


Fig. II.2.2.2 Bandas de energía de los sólidos cristalinos [19].

Cuando los defectos (vacancias, intersticios o átomos sustitucionales) ocasionan pequeñas perturbaciones a la red cristalina y específicamente a los átomos que tienen por primeros vecinos (o lo que es lo mismo, a la energía potencial de los átomos), aparecen pequeñas distorsiones en la banda de valencia y en la de conducción [10]. Figura II.2.2.3.

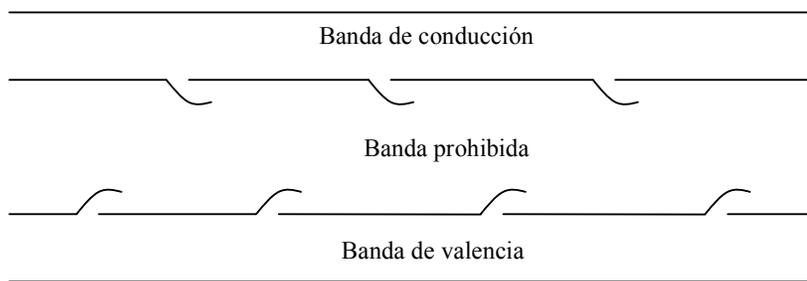


Fig. II.2.2.3. Pequeñas distorsiones en las bandas debido a los defectos [10].

En cambio, cuando los mismos defectos ocasionan grandes perturbaciones a la energía potencial de sus átomos vecinos, no aparecen grandes distorsiones en las bandas sino niveles de energía discretos que se localizan dentro de la banda prohibida [10]. Figura II.2.2.4.

La posición que ocupa cada nivel de energía discreto dentro de la banda prohibida, depende del sólido cristalino de que se trate y se determina teóricamente utilizando la ecuación de Schödinger, al introducir la variación del potencial y calcular la energía asociada a esta variación [10].

Se define como trampa a aquel nivel de energía discreto localizado en la banda prohibida, que tiene la capacidad de inmovilizar a los electrones que se encuentran realizando transiciones y que puede liberarlos un tiempo posterior, mediante alguna forma de estimulación, mientras que se define como centro de recombinación a aquel nivel de energía discreto que tiene la capacidad de inmovilizar huecos en movimiento; es decir, de inmovilizar partículas ficticias cargadas positivamente que tienen

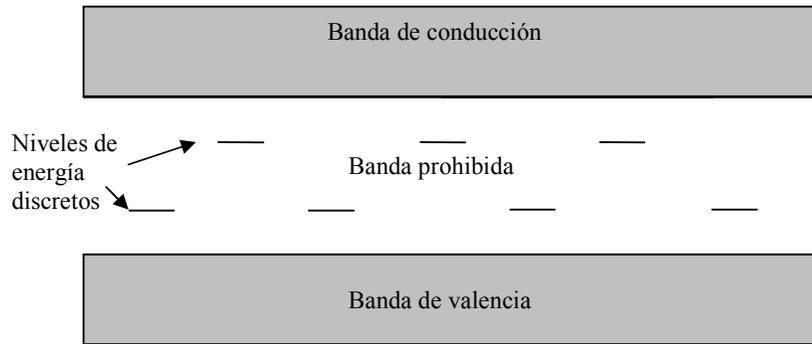


Fig. II.2.2.4. Formación de niveles de energía discretos debido a los defectos [10].

la misma masa que el electrón y que se originan cuando un electrón abandona la banda de valencia.

La posición de las trampas como de los centros de recombinación dentro de la banda prohibida, se especifica respecto al nivel superior de la banda de valencia, pero se puede tomar también, el nivel inferior de la banda de conducción, lo que da lugar a hablar en este último caso, de la profundidad de la trampa o del centro de recombinación, como la separación que existe entre el nivel inferior de la banda de conducción y la trampa o el centro de recombinación, según sea el caso. Si el ancho de la banda prohibida es grande; es decir, mayor o igual que 1.2eV [10] y las trampas se encuentran ubicadas por arriba de la mitad de la banda prohibida entonces las trampas se llaman poco profundas, pero si se encuentran por debajo de la mitad entonces se llaman trampas profundas [20]. Análogamente ocurre con los centros de recombinación. La profundidad de la trampa y de los centros de recombinación también se expresa en unidades de electrón-volts si el ancho de la banda prohibida se expresa en estas unidades.

### II.2.3 Luminiscencia de los sólidos cristalinos.

Para explicar mediante la teoría de bandas porqué se da la luminiscencia en algunos sólidos (aislantes y semiconductores) que tienen estructura interna cristalina e impurezas (u otros defectos puntuales), se necesita mostrar las transiciones que pueden llevar a cabo los electrones y los huecos a través de las bandas y niveles de energía discretos, así como el tipo de energía externa que se requiere para producirlas.

En primer lugar se muestra la transición “a” (figura II.2.3.1) que se lleva a cabo cuando la radiación ionizante expulsa a un electrón de valencia de un átomo; es decir, cuando se ioniza al

átomo. El electrón una vez que deja el nivel de energía permitido (banda de valencia), se mueve por ciertos

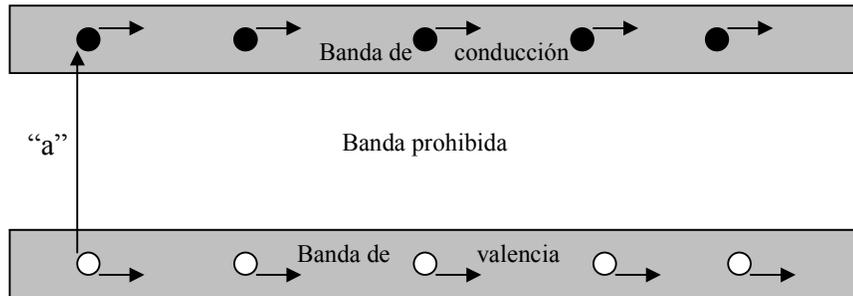


Fig. II.2.3.1. Transición “a”. El electrón pasa de la banda de valencia a la de conducción debido a la radiación ionizante [21].

“espacios” que hay entre los átomos (banda de conducción). No forma parte de otro átomo como electrón de valencia, a menos que alguno de ellos no tenga el número de electrones de valencia que le corresponde, lo que da lugar a que en los enlaces, falte un electrón y sea el electrón que se mueve el que ocupe ese lugar.

Mientras, el hueco que queda en el átomo ionizado puede ser ocupado por un electrón de valencia de un átomo vecino. Este electrón al salir del átomo para ocupar el lugar del hueco, deja ahora un hueco que puede ser ocupado por un electrón de valencia de otro átomo vecino y así sucesivamente se continúa el “movimiento” de los huecos por los lugares que dejan vacíos los electrones de valencia, lo cual da lugar a decir que los huecos se mueven por la banda de valencia. Por otro lado, los electrones al moverse dentro de la estructura real (por la banda de conducción), pueden encontrarse con algunos defectos (trampas) y por consiguiente detener su movimiento.

La ionización mediante luz; es decir, la transición “a” a partir de luz, no es posible que se lleve a cabo en materiales con banda prohibida ancha como la del  $\alpha\text{-SiO}_2\text{:Ge}$ .\*

La transición “b” (figura II.2.3.2) ocurre cuando el electrón que se mueve en la banda de conducción se encuentra con una trampa desocupada. Al pasar el electrón de la banda de conducción a la trampa, pierde energía que se manifiesta en forma de calor [20]. Este electrón permanece atrapado hasta que se aplique una forma de energía externa (como por ejemplo de la luz), de la misma magnitud que la profundidad de la trampa. Al desentramarse, el electrón regresa a la banda de conducción y se sigue moviendo a menos que de nuevo se entrampe. Por otro lado, el “llenado” de las trampas de diferentes profundidades es un problema que está fuera del objetivo de este trabajo, por lo que no se analizará.

\* Este argumento se menciona en la referencia [1] para el caso del  $\text{SiO}_2$ , el cual tiene un ancho de banda prohibida de  $9\text{eV}$  y se extiende para el caso del  $\text{a-SiO}_2\text{:Ge}$ , el cual tiene un ancho de banda mayor que este valor.

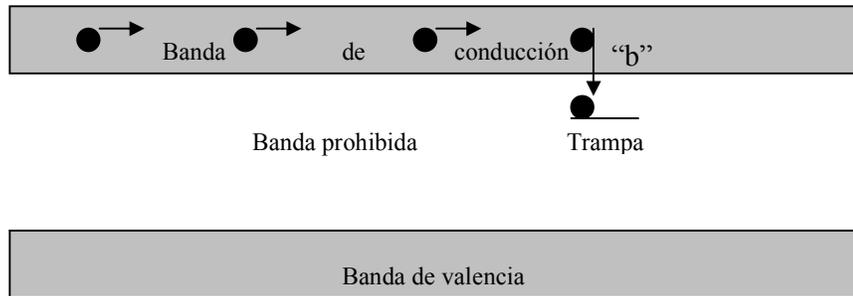


Fig. II.2.3.2. Transición "b". El electrón pasa de la banda de conducción a una trampa [21].

La transición "c" (figura II.2.3.3) ocurre cuando el hueco se mueve en la banda de valencia, se encuentra con un centro de recombinación desocupado que lo atrapa. Este hueco permanece en el centro de recombinación y no sale expulsado al aplicar alguna forma de energía externa de la profundidad del centro de recombinación.

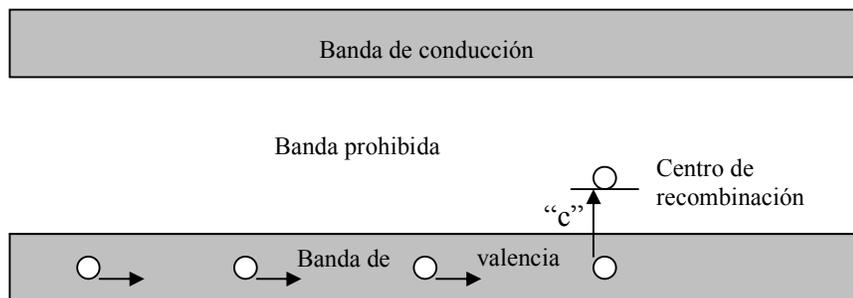


Fig. II.2.3.3. Transición "c". El hueco pasa de la banda de valencia a un centro de recombinación [21].

La transición "d" (figura II.2.3.4) ocurre cuando se aplica energía externa de la misma magnitud que la profundidad de la trampa y se lleva a cabo el desentrapado del electrón; es decir, cuando se estimula al electrón. El electrón se mueve de nuevo en la banda de conducción.

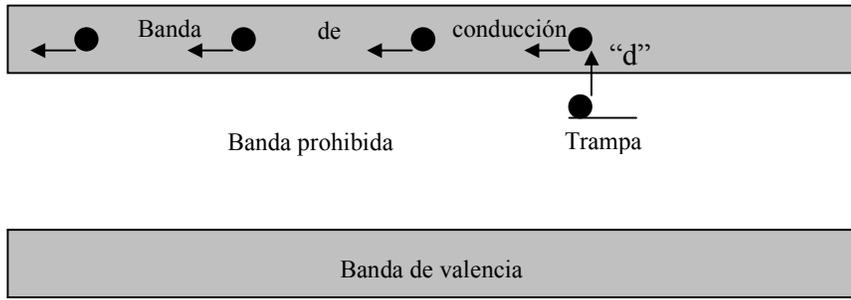


Fig. II.2.3.4. Transición “d”. El electrón es estimulado por medio de alguna forma de energía externa y sale de la trampa [21].

La transición “e” (figura II.2.3.5) ocurre cuando el electrón desentrapado (que realizó la transición “d”), se encuentra con un centro de recombinación y se produce la recombinación electrón –hueco, momento en el cual se lleva a cabo la emisión de luz.

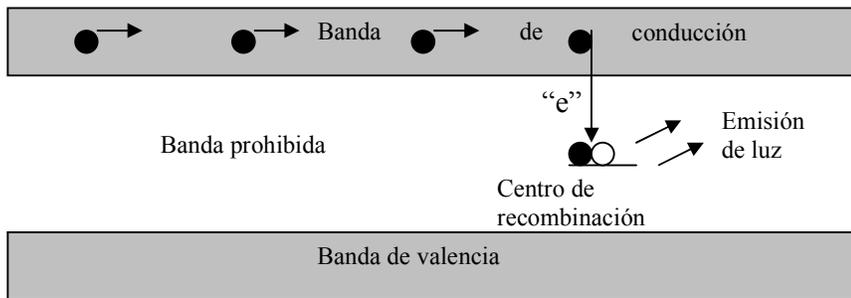


Fig. II.2.3.5. Transición “e”. El electrón desentrapado que se mueve en la banda de conducción, se encuentra con un hueco localizado en un centro de recombinación [21].

La energía (E) que pierde el electrón por pasar de la banda de conducción al centro de recombinación, es de la misma magnitud que la energía de la luz que se emite por la recombinación electrón-hueco, la cual está dada por la expresión de la cuantización de la energía de Planck:

$$E = h\nu \dots\dots\dots (1)$$

donde:

$E \equiv$  Energía de un fotón.

$h \equiv$  Constante de Planck

$\nu \equiv$  Frecuencia de la luz emitida.

Pero como:

$$\lambda \nu = c$$

donde

$\lambda \equiv$  Longitud de onda de la luz emitida.

$c \equiv$  Velocidad de la luz en el vacío.

en otras palabras como:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \dots\dots\dots (2)$$

Entonces al sustituir (2) en (1) y despejar  $\lambda$  se tiene que:

$$\lambda = \frac{hc}{E} \dots\dots\dots (3)$$

Así, de la expresión (3), se ve que si es conocida la profundidad del centro de recombinación, es posible conocer la longitud de onda de la luz emitida, asociada con el electrón que perdió energía por pasar de la banda de conducción al centro de recombinación y se recombinó con un hueco.

Por otro lado, la ecuación (3) se utiliza también en la transición “d”, cuando el desentrampado del electrón se lleva a cabo mediante estimulación óptica, ya que al conocer la profundidad de la trampa, también se puede conocer la longitud de onda de la luz de estimulación.

La transición “f” (figura II.2.3.6) ocurre cuando el electrón realizó la transición “a” y antes de encontrarse con una trampa, se encuentra con un hueco que todavía no ha sido atrapado por un centro de recombinación y se mueve por la banda de valencia. El electrón pasa de la banda de conducción a la de valencia y la recombinación electrón-hueco da lugar a la emisión de luz, cuya longitud de onda se encuentra mediante la expresión matemática (3). Esta es la transición que da lugar a la fluorescencia.

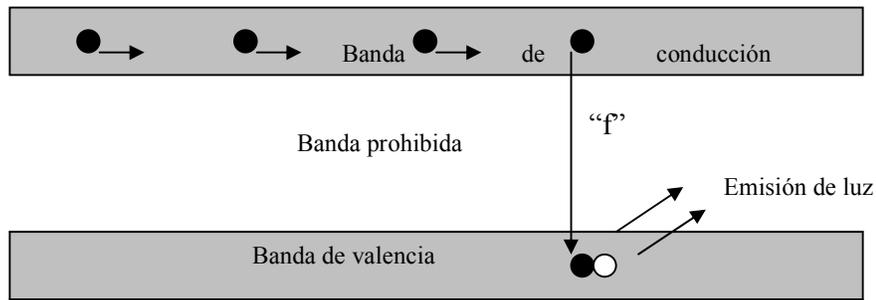


Fig. II.2.3.6. Transición “f”. El electrón se recombina con un hueco al pasar de la banda de conducción a la de valencia y se emite luz [21].

La transición “g” (figura II.2.3.7) es poco probable que se lleve a cabo, ya que es poco probable que los huecos todavía se muevan en la banda de valencia, al momento del desentrapado del electrón por alguna forma de estimulación.

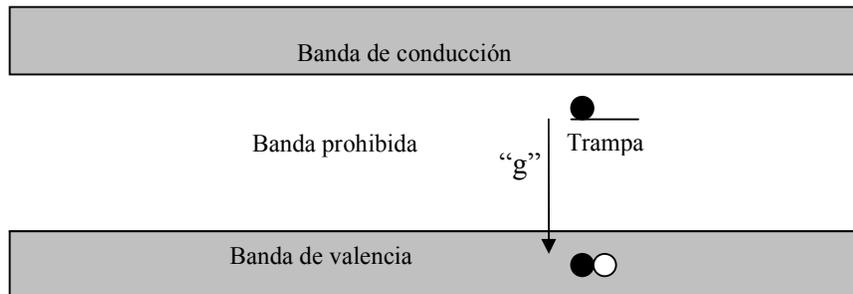


Fig. II.2.3.7. Transición “g”. Es poco probable que se lleve a cabo [21].

También es poco probable que se lleve a cabo la transición “h” (figura II.2.3.8); es decir, que al aplicar alguna forma de energía externa, el hueco se desentrapa y regrese a la banda de valencia.

A todo esto hay que agregar que si el desentrapado de un electrón no ocurre inmediatamente después de ser expuesto a estimulación óptica, es porque un electrón presenta la siguiente probabilidad de desentraparse [1]:

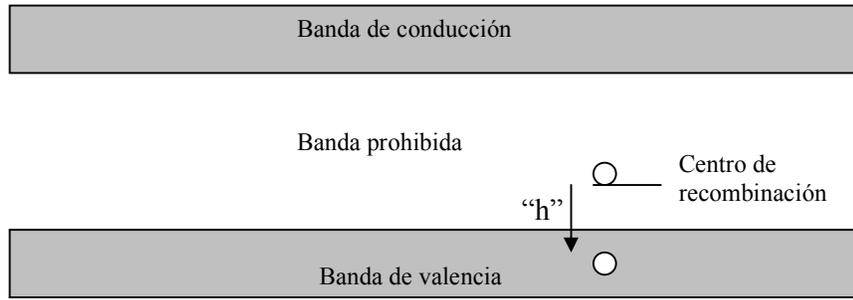


Fig. II.2.3.8. Transición “h”. Es poco probable que se lleve a cabo [21].

$$P(E) = \sigma(t)\Phi(t)$$

donde

$P(E) \equiv$  Probabilidad de desentrapar a un electrón mediante estimulación óptica.

$\sigma(t) \equiv$  Sección transversal de fotoionización.

$\Phi(t) \equiv$  Intensidad de la luz de estimulación.

$E \equiv$  Energía del fotón.

Respecto a la sección transversal de fotoionización, se puede decir que es en sí el parámetro que involucra el desentrapado de electrones durante la estimulación óptica.

Respecto a la intensidad de la luz de estimulación se puede decir que existen tres maneras (también llamados métodos) en que se puede presentar.

#### II.2.4 Métodos de estimulación de la LEO.

La intensidad de la luz que estimula el desentrapado de electrones en algunos sólidos (aislantes y semiconductores) se presenta de tres maneras distintas:

- i) Constante.- Proporcionada sin interrupciones con una misma magnitud. Se expresa como:

$$\Phi_0 = \text{constante} = \text{cte}$$

y su representación esquemática se muestra en la figura II.2.4.1.

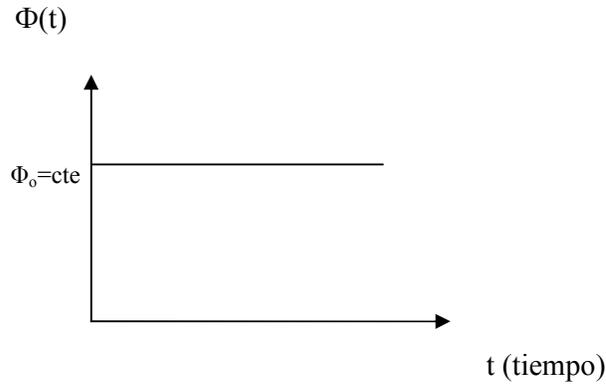


Fig. II.2.4.1. LEO-CW [1].

Este método de obtener la LEO se conoce como LEO-CW o LEO de onda continua.

- ii) Variable.- Proporcionada sin interrupciones con una magnitud que varía linealmente. Se expresa como:

$$\Phi(t) = mt + \Phi_0$$

donde

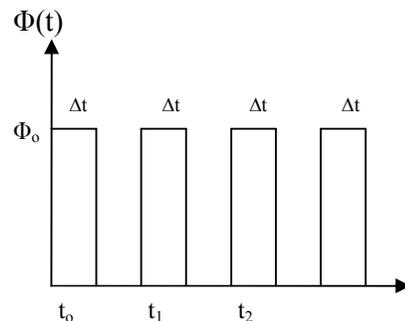
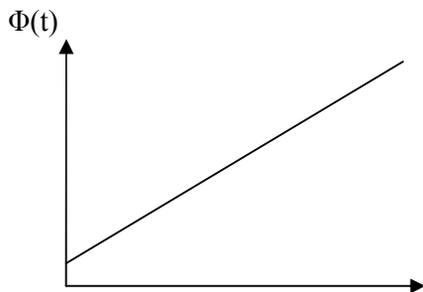
$t \equiv$  tiempo de estimulación óptica.

$\Phi_0 \equiv$  Intensidad inicial (de luz).

y su representación esquemática se muestra en la figura II.2.4.2. Este método de obtener la LEO se conoce como LEO-LM o LEO de “modulación” lineal.

- iii) Constante con interrupciones.- Proporcionada en forma de pulsos de la misma magnitud. Se expresa como:

$$\Phi(t) = \begin{cases} \Phi_0 & ; \quad t_i \leq t \leq t_i + \Delta t & ; \quad i = 0, 1, 2, \dots \\ 0 & ; \quad t_i + \Delta t < t < t_j & ; \quad j = i + 1 \end{cases}$$



t (tiempo)

t

(tiempo)

Fig. II.2.4.2. LEO-LM [1].

Fig. II.2.4.3. LEO-P [1].

y su representación esquemática se muestra en la figura II.2.4.3. Este método de obtener la LEO se conoce como LEO-P o LEO de pulsos.

La LEO-CW fue el método que utilizaron para proporcionar la intensidad de la luz que estimula la LEO de la fibra óptica mencionada. La importancia de utilizar este método se encuentra en el hecho de que determina de manera explícita, la variación de la concentración de los electrones en las trampas (lo que no se analizará por lo extenso que resulta), o lo que es lo mismo, la forma continua de las curvas de la intensidad de la LEO como función del tiempo que obtienen.

### II.3 Luminiscencia estimulada ópticamente (LEO) en los sólidos cristalinos.

La luminiscencia estimulada ópticamente (LEO) es la luz emitida por los aislantes y semiconductores sólidos (expuestos previamente a la radiación ionizante), cuando incide en ellos luz de una longitud de onda adecuada (es decir, cuando incide luz de una determinada energía). Debido a que la exposición a la radiación ionizante constituye una etapa para la obtención de la LEO que está relacionada con la misma LEO (emisión de luz), entonces se establece la relación entre la energía depositada por la radiación ionizante y la intensidad de la luz de la LEO. Esta relación puede ser lineal o no lineal y deja en claro, que en cualquier caso a mayor cantidad de exposición a la radiación ionizante, mayor es el número de electrones en las trampas que participan después en la recombinación electrón-hueco. Ya que la relación lineal es la relación más sencilla, es la que se supone que existe en la mayoría de los casos en que se establece tal relación. La expresión matemática que describe la evolución de la intensidad de la luz emitida en la LEO se obtiene a partir del desentrapado de los electrones.

#### II.3.1. Modelo de la LEO de una trampa y un centro de recombinación.

El modelo de la LEO de una trampa y un centro de recombinación sirve para explicar porqué se lleva a cabo este fenómeno en un material sólido particular (aislante o semiconductor), que tiene estructura interna cristalina e impurezas (u otros defectos), capaces de dar lugar a una trampa y un centro de recombinación. Pero una trampa y un centro de recombinación no representa la cantidad

de trampas y centros de recombinación asociados al sólido, sino todas las trampas que están a una misma profundidad y todos los centros de recombinación que también están a una misma profundidad.

El modelo de una trampa y un centro de recombinación, hace uso de las transiciones que se pueden llevar a cabo en un sólido con estructura interna cristalina y en un mismo esquema, se muestran las dos etapas que se involucran en la LEO: la exposición a la radiación ionizante y la estimulación óptica. Figura II.3.1.1. Como existe la posibilidad de que algunos electrones desentrampados se re-entrapen, este modelo se presenta en dos variantes: con re-entrapado de electrones y sin re-entrapado de electrones

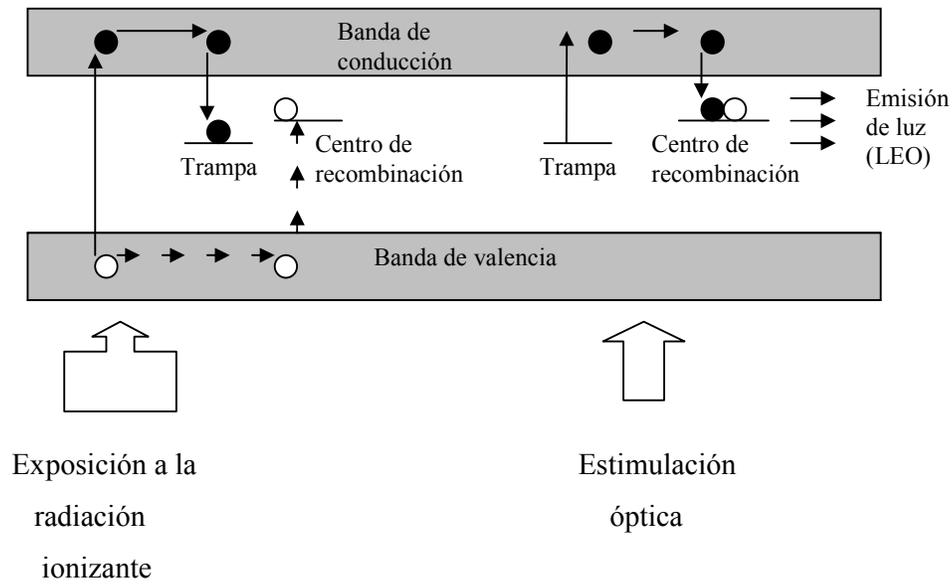


Fig. II.3.1.1. Modelo de la LEO de una trampa y un centro de recombinación sin re-entrapado de electrones.

En la etapa de exposición a la radiación ionizante se llevan a cabo las transiciones “a”, “b” y “c” vistas anteriormente, mientras que en la etapa de estimulación óptica se dan las transiciones “d” y “e”.

El planteamiento matemático que describe la evolución de la intensidad de la LEO como función del tiempo, se hace en la etapa correspondiente a la estimulación óptica, ya que es ahí donde se lleva a cabo la recombinación electrón-hueco, la cual es la responsable de la emisión de luz del sólido.

Para realizar el planteamiento matemático mencionado es necesario realizar las siguientes definiciones:

$n_c \equiv$  Concentración de electrones en la banda de conducción.

$n_0 \equiv$  Concentración inicial de electrones en las trampas.

$n \equiv$  Concentración de electrones en las trampas.

$m \equiv$  Concentración de huecos en los centros de recombinación.

$t \equiv$  Tiempo promedio que tarda en recombinarse un electrón liberado.

$p \equiv$  Porcentaje de electrones estimulados.

$A \equiv$  Probabilidad de atrapar un electrón desentrampado por la misma trampa u otra.

$A_m \equiv$  Probabilidad de que ocurra la recombinación de un electrón desentrampado con un centro de recombinación.

$N \equiv$  Concentración de trampas disponibles.

Cuando se lleva a cabo la recombinación electrón-hueco (y por consiguiente la LEO), la concentración de huecos en los centros de recombinación va disminuyendo, al igual que lo hace la intensidad de la LEO. Esto se expresa [1] mediante la ecuación:

$$I_{LEO} = - \frac{dm}{dt}$$

Entonces resulta obvio que durante la LEO si disminuye la concentración de huecos, es porque disminuye a la vez la concentración de electrones en las trampas.

Expresando de forma explícita tanto la variación de huecos como de electrones desentrampados se tiene [1]:

$$\frac{dm}{dt} = - n_c A_m m \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{dn}{dt} = -np + n_c A(N-n) \dots\dots\dots (5)$$

Por otro lado, al tomar en cuenta la conservación de la neutralidad de la carga (eléctrica) durante la estimulación óptica, se obtiene [1] la expresión:

$$n_c + n = m \dots\dots\dots (6)$$

la cual al derivarla respecto al tiempo se tiene:

$$\frac{dn_c}{dt} + \frac{dn}{dt} = \frac{dm}{dt} \dots\dots\dots (7)$$

Así, las ecuaciones (4), (5) y (7) forman el sistema de ecuaciones que se utiliza para describir la evolución de la intensidad de la LEO (de manera teórica).

Pero si durante la estimulación óptica  $n_c \ll n$  y  $n_c \ll m$ , entonces al derivarlas respecto al tiempo se obtiene:

$$\frac{dn_c}{dt} \ll \frac{dn}{dt} \dots\dots\dots (8)$$

y

$$\frac{dn_c}{dt} \ll \frac{dm}{dt} \dots\dots\dots (9)$$

y al considerar en la ecuación (7) las consideraciones (8) y (9), la ecuación que se obtiene es:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dm}{dt} \dots\dots\dots (10)$$

Lo que lleva a decir, que basta con que se resuelva la ecuación (4) o la (5) para obtener la solución teórica de la respuesta de la LEO. En otras palabras, en lugar de resolver el sistema simultáneo dado por las ecuaciones (4), (5) y (7), es suficiente con que se resuelva alguna de estas dos ecuaciones. Sin embargo, al observar la expresión general de la ecuación (4) y la expresión general de la ecuación (5), se nota que entre ambas hay una pequeña diferencia. La ecuación (5) tiene un término más que la ecuación (4) (el término es  $n_c A(N-n)$ ), por lo que para estar seguros de que es indiferente cual de las dos ecuaciones se resuelva ((4) o (5)), antes hay que tomar en cuenta este término.

Al considerar que el re-entrampado de electrones es tan pequeño como para no tomarse en cuenta (caso sin re-entrampado de electrones); esto es, que A es tan pequeña como para que el

término en donde aparece como factor no se tome en cuenta. Entonces la ecuación (5) toma la forma:

$$\frac{dn}{dt} = -np \dots\dots\dots (5')$$

y en este caso, ya es indiferente si es la ecuación (4) o la (5') la que se tenga que resolver ya que la expresión general es la misma.

Así, la solución de (5') está dada como:

$$n = e^{-pt+C} \dots\dots\dots (11)$$

donde C es la constante de integración cuyo valor se encuentra al tomar las condiciones iniciales del problema; específicamente, al evaluar el tiempo en que empieza a llevarse a cabo la LEO.

Por lo tanto, la expresión matemática que se plantea para describir la evolución de la intensidad de la LEO, mediante el modelo de una trampa y un centro de recombinación en donde no se considera el re-entrapado de electrones, se expresa como:

$$I_{LEO} = - \frac{dn}{dt} = np \dots\dots\dots (12)$$

cuya solución es la ecuación (11). Por lo que la expresión que describe la LEO es:

$$I_{LEO} = pe^{-pt+C}$$

El caso del modelo de una trampa y un centro de recombinación que no considera el re-entrapado de los electrones, es el que se tomará como base para proponer el modelo de la LEO de la fibra óptica de a-SiO<sub>2</sub>: Ge. Esto es, se partirá de que la expresión matemática que se plantea está dada por la ecuación (12) y se buscará la expresión que debe tener n para que la solución sea potencial en lugar de exponencial.

## CAPÍTULO III

### Modelo de la LEO de la fibra óptica de $\text{SiO}_2$ amorfo con impurezas de germanio.

El modelo teórico de la LEO de una trampa y un centro de recombinación que no considera el re-entrapado de electrones, es el modelo más sencillo que existe para explicar la evolución de la intensidad de la LEO de algunos sólidos aislantes y semiconductores que tienen estructura interna cristalina e impurezas (u otros defectos con la capacidad de dar lugar a una trampa y un centro de recombinación). Por tal motivo, es conveniente investigar si resulta posible hacer uso de este modelo para explicar porqué se lleva a cabo la LEO en la fibra óptica de  $\text{a-SiO}_2\text{:Ge}$ . Para ello, primero hay que averiguar si se puede asociar al  $\text{a-SiO}_2\text{:Ge}$ , las bandas y niveles de energía discretos que se asocian con los sólidos que tienen estructura interna cristalina (e impurezas u otros defectos), para en segundo término, determinar si un nivel discreto puede realizar la función de trampa y otro la de centro de recombinación, de tal manera que se dé el desentrapado de electrones bajo estimulación óptica con luz de 480nm de longitud de onda y la emisión de luz (del  $\text{a-SiO}_2\text{:Ge}$ ) con luz de longitud de onda mayor que este valor; para así, por último, ver si la ecuación matemática que describe la evolución de la intensidad de la LEO (cuando la estructura es cristalina), se puede utilizar también para describir el comportamiento de los datos experimentales adquiridos.

#### III.1 Bandas de energía en el $\text{SiO}_2$ amorfo con impurezas de germanio.

En [2] se reporta que han encontrado de manera teórica que a un sólido amorfo como el  $\text{a-SiO}_2\text{:Ge}$ , es posible asociarle las bandas de energía, así como los niveles de energía discretos localizados dentro de la banda prohibida que se asocian a los sólidos que tienen estructura interna cristalina. Cada nivel de energía discreto asociado al  $\text{a-SiO}_2\text{:Ge}$ , representa a cada defecto que forma la estructura interna de este sólido, por lo que aquellos defectos equivalentes; es decir, aquellos defectos en donde el germanio sustituye al silicio, tienen además asociada la misma profundidad dentro de la banda prohibida. Debido a que no se conoce el valor preciso del ancho de la banda prohibida (Pantelides [22] lo reporta de 10.2eV, mientras que Robertson [2] de 10.5eV), los niveles de energía discretos son reportados (en [2] y [4]) respecto al nivel superior de la banda de valencia, en lugar de reportarlos en términos de la profundidad; es decir, son reportados respecto al nivel que se utiliza como referencia para especificar las dimensiones del ancho de la banda prohibida, en lugar de hacerlo respecto a la banda de conducción en la cual se basan los procesos de estimulación óptica y de la LEO.

Además, en [2] para encontrar de manera teórica, el valor de cada nivel de energía discreto del a-SiO<sub>2</sub>:Ge, han utilizado el método semiempírico llamado tigh-binding (enlace fuerte) o el Modified Intermediate Neglect of Differential Overlap/3 (Modificación intermedia de las diferencias de la superposición; mejor conocido como MINDO/3).

En la tabla III.1.1 se escriben los valores teóricos obtenidos por uno y otro método, así como los valores obtenidos más recientemente de manera experimental [4].

Tabla III.1.1. Niveles de energía discretos reportados respecto a la banda de valencia [2], [4].

Defecto	Tigth-binding (eV)	MINDO/3 (eV)	Experimental (eV)
≡Si , ≡Ge	5.0	5.8	5.7
≡Si-Si≡ , ≡Ge-Ge≡ , ≡Si-Ge≡	8.2	8.0	7.6
≡Si-O* , ≡Ge-O*	0.9	NO REPORTADO	2.0
O=O	0.5	NO REPORTADO	1.6
Si-O-O* , Ge-O-O*	2.1	2.6	1.9
≡Si* , ≡Ge*	7.7	NO REPORTADO	6.3
O <sub>3</sub> <sup>+</sup>	NO REPORTADO	8.5	8.5

En la figura III.1.1 se muestran las bandas y los niveles de energía discretos (experimentales) asociados al a-SiO<sub>2</sub>:Ge para el caso en que el ancho de la banda prohibida sea de 10.2eV. Cada nivel puede ser una trampa o un centro de recombinación. Se desconoce el papel que desempeña cada nivel de energía discreto; es decir, no se sabe si pueden realizar la función de una trampa o la de un centro de recombinación, ni tampoco se conoce cual es su sección transversal de fotoionización.

La discrepancia existente entre los valores teóricos y experimentales (e incluso entre los mismos valores teóricos) de la tabla III.1.1, se debe a que al calcular un valor de energía discreto por cualquier método teórico, se toma en cuenta la “perturbación” de una de las dos variables que definen a los defectos del a-SiO<sub>2</sub>:Ge [2]. Estas variables son: la energía de enlace y un ángulo particular formado por la existencia de dos enlaces en un átomo (figura III.1.2(a)), por la presencia de tres átomos (figura III.1.2(b)) o por la presencia de dos átomos y un enlace particular (figura III.1.2(c)).

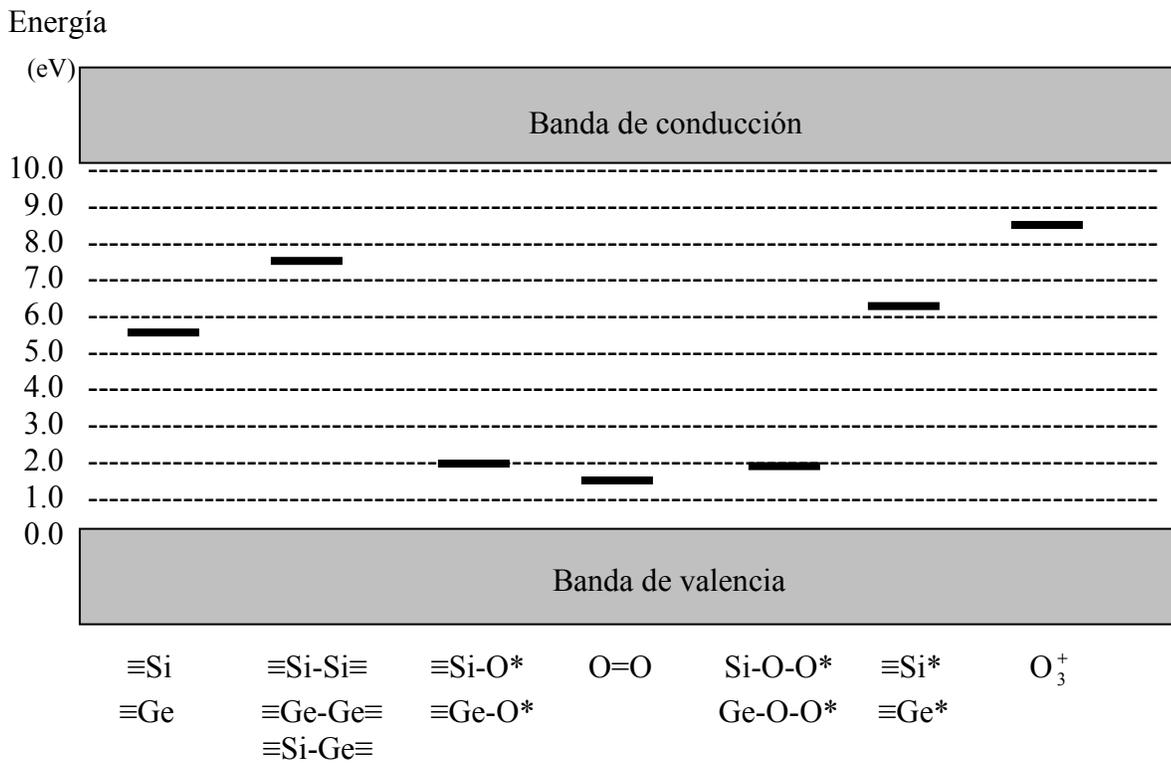


Fig. III.1.1. Bandas y niveles de energía discretos del  $\alpha$ -SiO<sub>2</sub>:Ge para el caso en que el ancho de la banda prohibida sea de 10.2eV.

Así, la “perturbación” que se toma en cuenta en el método tight-binding es la que se lleva a cabo en un enlace particular [2], mientras que la que toma en cuenta el método MINDO/3 es la que se lleva a cabo en cualquiera de los tres ángulos que se muestran en la figura III.1.2.

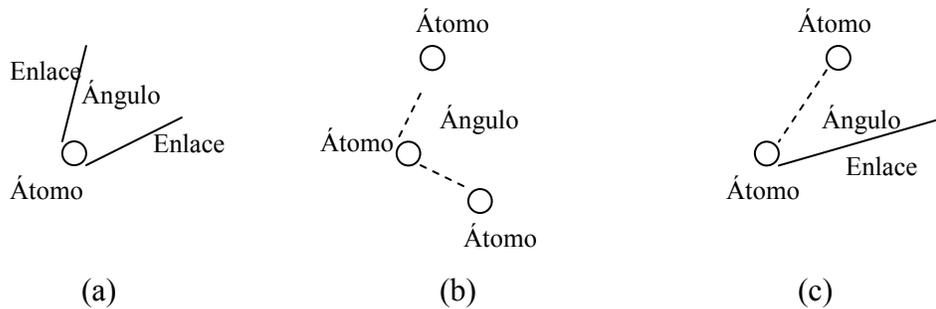


Fig. III.1.2. Ángulo que define los valores de los niveles de energía discretos obtenidos mediante MINDO/3.

### III.2 Profundidad de los niveles de energía discretos del SiO<sub>2</sub> amorfo con impurezas de germanio.

Para explicar los procesos internos que se llevan a cabo en la fibra óptica de a-SiO<sub>2</sub>:Ge durante su exposición a la radiación ionizante, durante la estimulación óptica y durante la LEO, es necesario expresar la energía de cada nivel discreto en términos de su profundidad. Para encontrar tal profundidad se requiere realizar la siguiente diferencia:

$$E_2 = E - E_1 \quad \dots\dots\dots (13)$$

donde

$E_2$  ≡ Profundidad de cada nivel de energía discreto.

$E$  ≡ Valor del ancho de la banda prohibida.

$E_1$  ≡ Energía de cada nivel discreto reportado respecto a la banda de valencia.

Debido a que existen dos valores reportados para el ancho de la banda prohibida ( $E=10.2\text{eV}$  y  $E=10.5\text{eV}$ ), la profundidad de cada nivel se calculará mediante (13) para cada uno de los valores del ancho de la banda prohibida. En las tablas III.2.1 y III.2.2 se muestran los valores de la profundidad de los niveles de energía discretos.

Tabla III.2.1. Profundidad de los niveles de energía discretos con  $E=10.2\text{eV}$ .

Defecto	$E_2$ (Tigth-binding) (eV)	$E_2$ (MINDO/3) (eV)	$E_2$ (Experimental) (eV)
$\equiv\text{Si}$ , $\equiv\text{Ge}$	5.2	4.4	4.5
$\equiv\text{Si-Si}\equiv$ , $\equiv\text{Ge-Ge}\equiv$ , $\equiv\text{Si-Ge}\equiv$	2.0	2.2	2.6
$\equiv\text{Si-O}^*$ , $\equiv\text{Ge-O}^*$	9.3	NO CALCULADO	8.2
$\text{O}=\text{O}$	9.7	NO CALCULADO	8.6
$\text{Si-O-O}^*$ , $\text{Ge-O-O}^*$	8.1	7.6	8.3
$\equiv\text{Si}^*$ , $\equiv\text{Ge}^*$	8.5	NO CALCULADO	3.9
$\text{O}_3^+$	NO CALCULADO	1.7	1.7

Tabla III.2.2. Profundidad de los niveles de energía discretos con E=10.5eV.

Defecto	E <sub>2</sub> (Tigth-binding) (eV)	E <sub>2</sub> (MINDO/3) (eV)	E <sub>2</sub> (Experimental) (eV)
≡Si , ≡Ge	5.5	4.7	4.8
≡Si-Si≡ , ≡Ge-Ge≡ , ≡Si-Ge≡	2.3	2.5	2.9
≡Si-O* , ≡Ge-O*	9.6	NO CALCULADO	8.5
O=O	10.0	NO CALCULADO	8.9
Si-O-O* , Ge-O-O*	8.4	7.9	8.6
≡Si* , ≡Ge*	8.8	NO CALCULADO	4.2
O <sub>3</sub> <sup>+</sup>	NO CALCULADO	2.0	2.0

Ahora, para decidir cual de los valores del ancho de la banda prohibida del a-SiO<sub>2</sub>:Ge “conviene” tomar (E=10.2eV ó E=10.5eV), de tal manera que el valor de la longitud de onda de estimulación óptica (λ= 480nm), se aproxime más a un valor de longitud de onda asociada a una profundidad (a la que se encuentran los niveles de energía discreto obtenido experimentalmente); es decir, se aproxime más, a una longitud asociada a E<sub>2</sub> experimental, se utiliza la expresión matemática:

$$\lambda = \frac{hc}{E_2} \dots\dots\dots (14)$$

donde

$$h = 4.1 \times 10^{-15} \text{ eV}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

En las tablas III.2.3 y III.2.4 se muestran los valores calculados de la longitud de onda mediante (14). Se toma el valor de E<sub>2</sub> experimental ya que los valores teóricos solo son aproximaciones que se tenían antes de conocer los valores experimentales.

Tabla III.2.3. Longitud de onda asociada a  $E_2$  experimental con  $E = 10.2\text{eV}$ .

Defecto	$\lambda$ (nm)
$\equiv\text{Si}, \equiv\text{Ge}$	276
$\equiv\text{Si-Si}\equiv, \equiv\text{Ge-Ge}\equiv, \equiv\text{Si-Ge}\equiv$	477
$\equiv\text{Si-O}^*, \equiv\text{Ge-O}^*$	151
$\text{O}=\text{O}$	144
$\text{Si-O-O}^*, \text{Ge-O-O}^*$	149
$\equiv\text{Si}^*, \equiv\text{Ge}^*$	31
$\text{O}_3^+$	730

Tabla III.2.4. Longitud de onda asociada a  $E_2$  experimental con  $E = 10.5\text{eV}$ .

Defecto	$\lambda$ (nm)
$\equiv\text{Si}, \equiv\text{Ge}$	256
$\equiv\text{Si-Si}\equiv, \equiv\text{Ge-Ge}\equiv, \equiv\text{Si-Ge}\equiv$	424
$\equiv\text{Si-O}^*, \equiv\text{Ge-O}^*$	144
$\text{O}=\text{O}$	138
$\text{Si-O-O}^*, \text{Ge-O-O}^*$	143
$\equiv\text{Si}^*, \equiv\text{Ge}^*$	292
$\text{O}_3^+$	615

De las tablas III.2.3 y III.2.4 se observa que la profundidad del nivel de energía discreto correspondiente a los defectos  $\equiv\text{Si-Si}\equiv, \equiv\text{Ge-Ge}\equiv$  y  $\equiv\text{Si-Ge}\equiv$  (con  $E=10.2\text{eV}$ ), tiene asociada una

longitud de onda de 477nm; es decir, se aproxima al valor de la longitud de onda de la estimulación óptica ( $\lambda=480\text{nm}$ ).

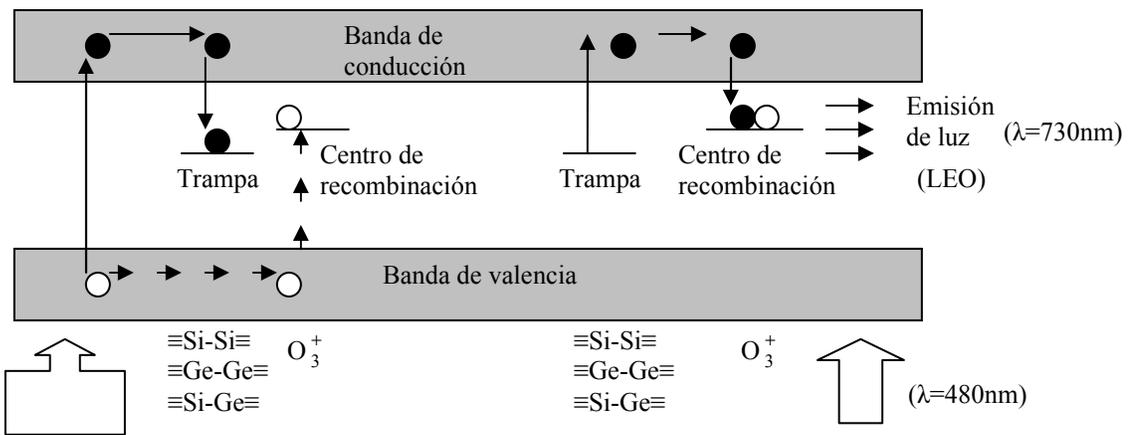
Por otro lado, como la EEE-T que se lleva a cabo en el a-SiO<sub>2</sub> empieza a ocurrir un poco arriba de la temperatura del medio ambiente, lo cual se cree se debe en parte a la existencia de trampas poco profundas [18] (y en este caso el  $\equiv\text{Si-Si}\equiv$ , el  $\equiv\text{Ge-Ge}\equiv$  o el  $\equiv\text{Si-Ge}\equiv$  son niveles de energía poco profundos), entonces existe otra razón aparte de la casi coincidencia de la longitud de onda asociada a la profundidad de estos niveles ( $\lambda=477\text{nm}$ ) y la longitud de onda de estimulación óptica ( $\lambda=480\text{nm}$ ), para sugerir que estos niveles de energía discretos pueden realizar la función de trampas en el a-SiO<sub>2</sub> y a la vez realizarla en el a-SiO<sub>2</sub>:Ge, ya que los defectos presentes en el primero, también se encuentran presentes en el segundo. Además, como el O<sub>3</sub><sup>+</sup> es el único nivel de energía discreto que tiene una profundidad menor que la del  $\equiv\text{Si-Si}\equiv$ , el  $\equiv\text{Ge-Ge}\equiv$  y el  $\equiv\text{Si-Ge}\equiv$  (figura III.1.1); es decir, al que se asociaría con una longitud de onda mayor que 480nm (lo cual resulta claro de la ecuación (14) y que se puede ver en la tabla III.2.3), en el caso de que en él se llevara a cabo la recombinación electrón-hueco, entonces se sugiere que el O<sub>3</sub><sup>+</sup> podría realizar la función de centro de recombinación, por lo que la luz emitida tendría una longitud de onda de 730nm.

De esta manera se podría explicar la LEO de la fibra óptica de a-SiO<sub>2</sub>:Ge, mediante el modelo de una trampa y un centro de recombinación (que se utiliza en sólidos que tienen estructura interna cristalina e impurezas u otros defectos puntuales), bajo las mismas dos etapas involucradas (exposición a la radiación ionizante y exposición a la estimulación óptica). Figura III.2.1.

Por lo que de acuerdo con el modelo de una trampa y un centro de recombinación, la expresión matemática que describiría la evolución de la intensidad de la LEO del a-SiO<sub>2</sub>:Ge, debería ser una expresión exponencial decreciente de la forma general:

$$I_{\text{LEO}} = ae^{-bt+C}$$

donde a, b y C son constantes positivas ( $a>0$ ,  $b>0$ ) y t el tiempo de emisión de la LEO.



Exposición a la radiación ionizante beta menos

Estimulación óptica

Fig. III.2.1. Modelo de la LEO de la fibra óptica de a-SiO<sub>2</sub>:Ge de una trampa y un centro de recombinación sin re-entrapado de electrones.

### III.3 Análisis de los datos de la LEO de la fibra óptica de SiO<sub>2</sub> amorfo con impurezas de germanio.

Antes de obtener los datos de la LEO de la fibra óptica de a-SiO<sub>2</sub>:Ge, se expusieron diferentes muestras de esta fibra a diferentes cantidades de radiación ionizante beta menos proporcionada por una fuente de <sup>90</sup>Sr.\* Después se expuso cada muestra a estimulación óptica con luz de 480nm de longitud de onda. Las cantidades de radiación ionizante a las que se expuso la fibra se muestran en la tabla III.3.1.

Tabla III.3.1. Radiación ionizante beta menos aplicada a la fibra óptica de a-SiO<sub>2</sub>:Ge.

No. de muestra	Cantidad de radiación (Gy)**
1	7.35
2	14.70
3	22.05
4	44.10

\*Los detalles de este experimento consultarlos con el Dr. Guillermo Espinosa.

\*\* El Grey es una unidad en que se mide la radiación ionizante absorbida y se abrevia como Gy.

En la gráfica III.3.1 se muestran los datos experimentales adquiridos de la intensidad de la LEO de la fibra óptica de a-SiO<sub>2</sub>:Ge y los datos ajustados mediante Excell\* a la curva que mejor describe su comportamiento. Cada ajuste muestra un decaimiento potencial decreciente de los datos experimentales, el cual está dado por la expresión general:

$$I_{LEO} = ct^{-d}$$

donde c y d son constantes positivas (c>0, d>0) y t el tiempo de emisión de la luz de la LEO.

Mientras que el comportamiento que predice el modelo de una trampa y un centro de recombinación (en el caso de estructura interna cristalina) es exponencial decreciente.

Desde el punto de vista matemático, que a partir del modelo de una trampa y un centro de recombinación (en donde no se considera el re-entrampado de electrones) se presente la respuesta exponencial decreciente, tiene que ver con la forma en que está definida la I<sub>LEO</sub>; es decir, tiene que ver con la ecuación diferencial (12):

$$I_{LEO} = - \frac{dn}{dt} = np \dots\dots\dots (12)$$

cuya solución particular es la expresión exponencial de la forma:

$$n = n_0 e^{p(1-t)} \dots\dots\dots (15)$$

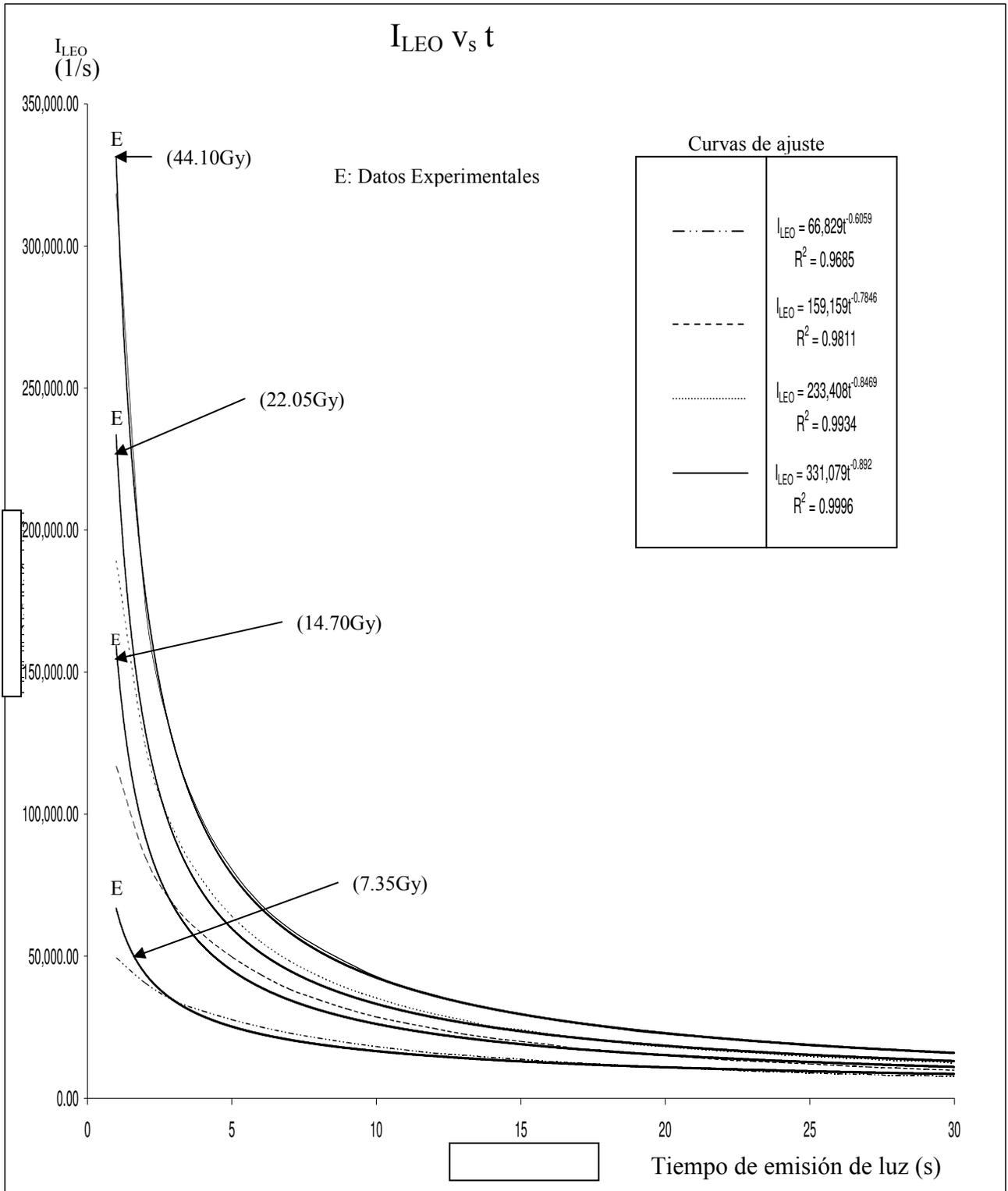
la cual se obtiene cuando la emisión de luz comienza a darse en t<sub>0</sub>=1s, ya que al sustituir la expresión (15) en la (12) se llega a que:

$$I_{LEO} = n_0 p e^{p(1-t)}$$

es decir, se obtiene una expresión exponencial decreciente.

Pero para hacer uso del modelo de una trampa y un centro de recombinación y de la ecuación diferencial (12) en el caso del a-SiO<sub>2</sub>:Ge, es necesario que la concentración de electrones en las trampas (n), no se obtenga a partir de la solución de esta ecuación diferencial, sino que se busque la expresión tal que al derivarla respecto al tiempo, de cómo resultado la expresión:

\* Este ajuste lo realizó José Ignacio Golzarri y Moreno (Físico de la planta con la que cuenta el Instituto de Física de la UNAM).



Gráfica III.3.1. Curvas de la intensidad de la LEO como función del tiempo (experimentales y ajustadas).

$$-\frac{dn}{dt} = ct^{-d}$$

esto es, que se obtenga la expresión general de la  $I_{LEO}$  ( $I_{LEO} = ct^{-d}$ ) que se obtuvo al ajustar los datos a la curva potencial decreciente. Tal expresión resulta ser

$$n = \left( \frac{c}{-d+1} \right) (-t^{-d+1} + 1) + n_0 \dots\dots\dots (16)$$

Así, desde el punto de vista matemático para que la definición de la  $I_{LEO}$  se utilice también para el caso de este sólido amorfo; es decir, para que se exprese de la forma:

$$I_{LEO} = -\frac{dn}{dt}$$

es necesario que la “n” dada por (16), solo se proponga y no se encuentre a partir de la ecuación diferencial (12).

Luego, al analizar el procedimiento empleado (para obtener la expresión que describa el comportamiento de los datos de la  $I_{LEO}$  de la fibra óptica de a-SiO<sub>2</sub>:Ge), se encuentra que no se introducen contradicciones en lo referente a la manera en que se llevan a cabo las transiciones de los electrones. Más bien, se ha llegado posiblemente a definir una característica respecto a la concentración de los electrones en las trampas (n) para el caso de este sólido amorfo, ya que no existe alguna otra restricción que mencione porqué en otros casos (aparte del cristalino), también tiene que ser exponencial el comportamiento de la  $I_{LEO}$ ; es decir, que también en los sólidos que tienen estructura interna amorfa, la concentración de electrones en las trampas (n) tiene que estar dada por la ecuación (15), pues simplemente porque fue realizado para aplicarlo en estructuras cristalinas. Por lo que vale la pena preguntarse que si al emplear el modelo de una trampa y un centro de recombinación (sin considerar el re-entrampado de electrones) para describir la LEO de un sólido, se presentan los siguientes dos casos generales:

- 1) Estructura cristalina implica que la n está relacionada con un comportamiento exponencial de la LEO.

- 2) Estructura amorfa implica que la  $n$  está relacionada con un comportamiento no exponencial de la LEO.

y no solo se presenta la segunda situación para el caso del  $a\text{-SiO}_2\text{:Ge}$ . Esto conviene investigarlo posteriormente en otro trabajo.

De esta manera, la expresión matemática (que se propone) describe la evolución de la intensidad de la LEO de la fibra óptica de  $a\text{-SiO}_2\text{:Ge}$  donde no se considera el re-entrapado de electrones se puede expresar como:

$$I_{\text{LEO}} = - \frac{dn}{dt}$$

donde  $n$  está dada por la expresión (16); a diferencia de lo que propone el modelo de una trampa (para estructuras cristalinas), el cual menciona que está dada por:

$$I_{\text{LEO}} = n_0 p e^{p(1-t)}$$

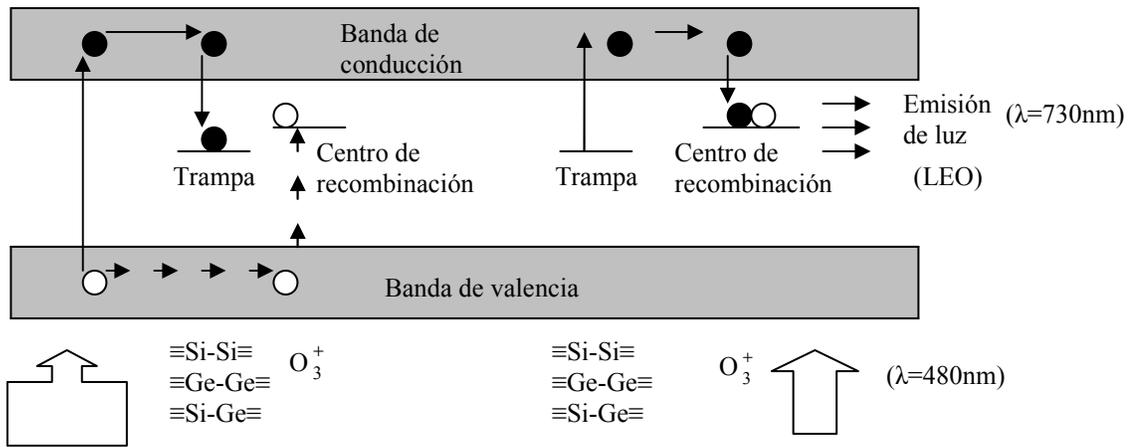
#### III.4 Modelo propuesto de la LEO de la fibra óptica de $\text{SiO}_2$ amorfo con impurezas de germanio.

Para hacer la descripción de la LEO de la fibra óptica de  $a\text{-SiO}_2\text{:Ge}$ , en base al modelo teórico de la LEO de una trampa y un centro de recombinación utilizado en algunos sólidos con estructura interna cristalina, se toma en cuenta que la formación de los niveles de energía discretos localizados dentro de la banda prohibida asociada al  $a\text{-SiO}_2\text{:Ge}$ , son debidos a los elementos que forman ciertos enlaces y a la vez la estructura interna amorfa, por lo que resulta necesario proponer que:

- i) Cada enlace  $\equiv\text{Si-Si}\equiv$  o equivalentemente  $\equiv\text{Ge-Ge}\equiv$  y  $\equiv\text{Si-Ge}\equiv$  actúan como trampa.
- ii) Cada enlace  $\text{O}_3^+$  actúa como centro de recombinación.

De esta manera, resulta posible describir la interacción de la radiación ionizante beta menos y la interacción de la luz con este material, así como la emisión de luz (LEO), mediante las transiciones de los electrones en las bandas y niveles de energía discretos que requiere el modelo de una trampa y un centro de recombinación.

El modelo propuesto de la LEO de la fibra óptica de  $a\text{-SiO}_2\text{:Ge}$  se muestra en la figura III.4.1.



Exposición a la radiación ionizante beta menos

Estimulación óptica

Fig. III.4.1. Modelo propuesto de la LEO de la fibra óptica de a-SiO<sub>2</sub>:Ge de una trampa y un centro de recombinación sin re-entrapado de electrones.

Luego, la definición de la LEO [1] para materiales cristalinos:

$$I_{LEO} = - \frac{dn}{dt} = np$$

solo se utiliza de la forma:

$$I_{LEO} = - \frac{dn}{dt}$$

para que en lugar de encontrar la variación de la concentración de los electrones en las trampas (n) (debido a la estimulación óptica), al resolver la ecuación diferencial involucrada en la definición, se asigne la forma conveniente, la cual al derivarla dé como resultado la forma general de la I<sub>LEO</sub> experimental. La expresión de la “n” es de la forma:

$$n = \left( \frac{c}{-d+1} \right) (-t^{-d+1} + 1) + n_0 \quad ; c > 0, d > 0$$

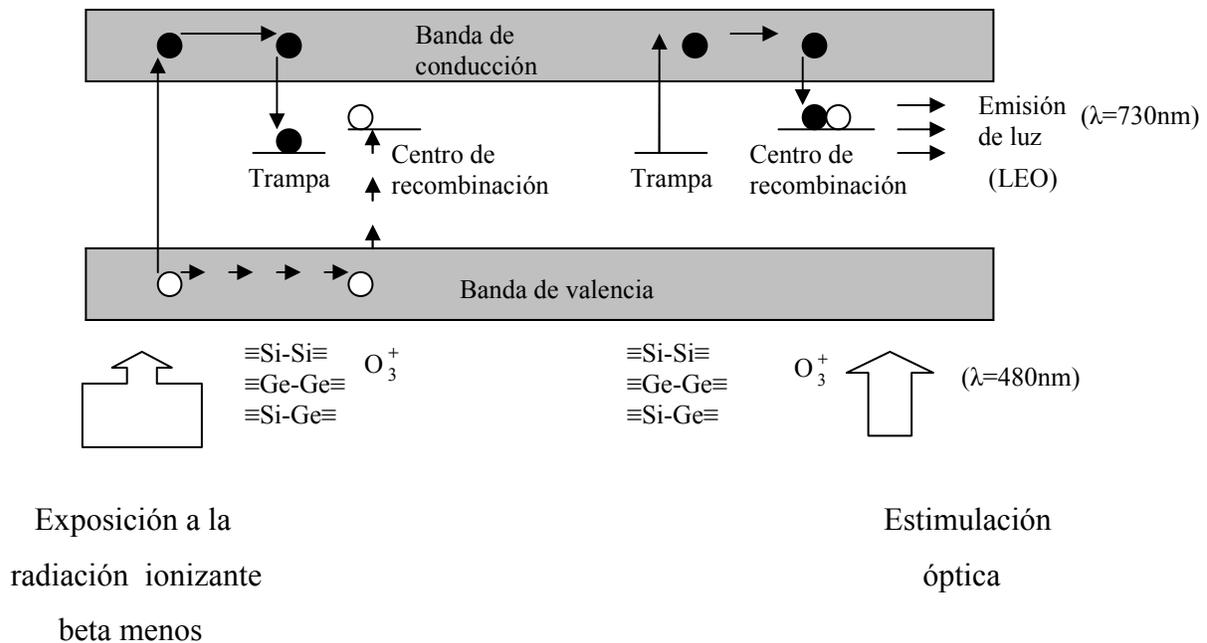
Así, se consigue hacer uso del modelo de una trampa y un centro de recombinación sin re-entrapado de electrones para explicar el “mecanismo” involucrado y a la vez se da la expresión matemática:

$$I_{LEO} = - \frac{dn}{dt}$$

que describe el desentrapado de electrones de la figura III.4.1, que se lleva a cabo durante la estimulación óptica

## Conclusiones

En este trabajo se estudió el modelo teórico de la LEO de una trampa y un centro de recombinación que no considera el re-entrapado de electrones, el cual se utiliza para explicar por qué se lleva a cabo la LEO en algunos materiales sólidos aislantes y semiconductores que tienen estructura interna cristalina e impurezas. Con ello se logró comprender el “mecanismo” que da lugar a la LEO dentro de estos materiales, además de las limitaciones que presenta el modelo en lo concerniente a la predicción de un comportamiento decreciente diferente del exponencial. Esto resultó relevante ya que hizo posible sugerirlo como posible modelo con el cual se puede explicar, por qué se lleva a cabo la LEO en la fibra óptica de SiO<sub>2</sub> amorfo con impurezas de germanio (a-SiO<sub>2</sub>:Ge), cuando la longitud de onda de la luz de la LEO es mayor que la de estimulación óptica, para lo cual se tuvo que considerar que los enlaces ≡Si-Si≡, ≡Ge-Ge≡, ≡Si-Ge≡ y O<sub>3</sub><sup>+</sup> presentes en la estructura interna amorfa de esta fibra óptica, desempeñan la misma función que los defectos puntuales (en estos quedan incluidas las impurezas) en los sólidos con estructura interna cristalina; más aún, que pueden realizar la función de trampas equivalentes (los tres primeros) y de centro de recombinación (el restante). El modelo de la LEO de la fibra óptica de a-SiO<sub>2</sub>: Ge que se propone se muestra en la siguiente figura.



Modelo de la LEO de la fibra óptica de a-SiO<sub>2</sub>:Ge de una trampa y un centro de recombinación sin re-entrapado de electrones.

De la etapa de estimulación óptica mostrada en la figura anterior se estableció la expresión matemática que describe la variación de la intensidad de la LEO ( $I_{LEO}$ ) como función del tiempo. Esto se hizo al hacer uso de la definición de la LEO de manera “adecuada”; es decir, se utilizó como:

$$I_{LEO} = - \frac{dn}{dt}$$

en lugar de hacerlo de la forma:

$$I_{LEO} = - \frac{dn}{dt} = np \dots\dots\dots (*)$$

por lo cual, no es posible encontrar de manera explícita a la “n” como se hace en el caso cristalino al resolver la ecuación diferencial (\*) (cuya solución es una expresión exponencial decreciente), sino que solo se propuso la expresión que debe tener la “n” para que al derivarla respecto del tiempo, “ajuste” a los datos experimentales adquiridos mostrados en la gráfica III.3.1, los cuales muestran la  $I_{LEO}$  para diferentes cantidades de radiación beta menos a la que se sometió la fibra.

La expresión propuesta de la “n” resulta ser:

$$n = \left( \frac{c}{-d+1} \right) (-t^{-d+1} + 1) + n_0 \quad ; (c>0, d>0)$$

por lo que al derivarla respecto al tiempo resulta la expresión:

$$I_{LEO} = ct^{-d} \quad , (c>0, d>0)$$

Al parecer, este procedimiento (asignar la “n”) tiene como consecuencia inmediata, la definición de una posible característica de esta fibra óptica en lo referente a la estructura interna presente; es decir, al parecer se ha encontrado que si el comportamiento de la  $I_{LEO}$  experimental es no exponencial, esto implica que su estructura interna es amorfa. Por lo que se tendría que investigar (en otro trabajo) si por querer aplicar el modelo de una trampa y un centro de recombinación sin re-entrampado de electrones en otros sólidos, se puede averiguar mediante la forma en que se exprese la “n” que “ajuste” a los

datos experimentales de la  $I_{LEO}$ , que tipo de estructura interna tienen y no se limite solo a hacerlo en este caso.

Una solución alternativa que se propone para resolver este problema en [23]; es decir, para el caso en que se presente un comportamiento no exponencial de la intensidad de la  $I_{LEO}$  y se quiera utilizar el modelo de una trampa y un centro de recombinación sin re-entrampado de electrones, consiste en “aproximarse” al comportamiento de los datos experimentales mediante la superposición de funciones exponenciales de la forma:

$$I_{LEO} = n_0 p e^{p(1-t)} , \quad (t \geq 1)$$

Se desconoce si se ha realizado algún modelo de la LEO de la fibra óptica de a-SiO<sub>2</sub>:Ge en base a este otro procedimiento y más aún, si efectivamente se puede obtener la predicción teórica potencial decreciente de los datos experimentales.

El valor experimental de la longitud de onda de la luz emitida (es decir de la LEO) de esta fibra óptica no se conoce, mientras que el valor teórico encontrado mediante el modelo propuesto de una trampa y un centro de recombinación que no considera el re-entrampado de electrones es de 730nm. Es importante conocer este valor experimental, para luego compararlo con el valor teórico. En caso de que coincidan estos valores, bien podría decirse que el modelo propuesto es correcto, pero en caso contrario, hay que buscar la parte dentro del modelo propuesto, que da lugar a este problema para corregirla, o dado el caso buscar otro camino como por ejemplo el que se acaba de mencionar; en otras palabras, proponer otro modelo.

Por otro lado, la radiación ionizante beta menos es la responsable de que se lleven a cabo ciertas “reacciones químicas” dentro de la fibra óptica de a-SiO<sub>2</sub>:Ge, que dan lugar a la formación de enlaces en la estructura del material (centros E y moléculas de O=O) a partir de otros enlaces ( $\equiv\text{Si-O-O}^*$ ); sin embargo, la presencia de estos defectos no afecta en nada al “mecanismo” que se lleva a cabo para la obtención de la respuesta LEO, debido a que los niveles de energía que se forman (por los enlaces) dentro de la banda prohibida, están a una profundidad mayor que la de la energía necesaria para desentrampar a los electrones. En otras palabras, la “reacción química” que tiene lugar en el a-SiO<sub>2</sub>:Ge debido a la exposición a la radiación ionizante, no causa daños en el defecto que se sugiere actúa como trampa, ni tampoco en el defecto que se sugiere actúa como centro de recombinación, por lo que esta podría ser la razón por la cual esta fibra óptica puede utilizarse varias veces para obtener la LEO (una vez que de nuevo se lleva a cabo la exposición a la radiación ionizante y la estimulación óptica).

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Botter-Jensen, L., McKeever, S.W.S., Wintle, A.G.. Optically stimulated luminescence dosimetry. Ed. Elsevier. First Edition (2003).
- [2] Devine, Roderick. (Editor). The physics and technology of amorphous SiO<sub>2</sub>. Ed. Plenum Press, 1988.
- [3] Fitting, H. J., Barfels, T., von Czarnowski, A., Trukhin, A. N.. Electron beam induced optical and electronic properties of SiO<sub>2</sub>. Materials Science and Engineering B71 (2000), 109-114.
- [4] Skuja, Linards. Optically active oxygen-deficiency-related center in amorphous silicon dioxide. Journal of Non-Crystalline Solid. 239 (1988), 16-48.
- [5] Rubio Martínez, Baltasar. Introducción a la ingeniería de la fibra óptica. Ed. Addison-Wesley Iberoamericana.
- [6] Espinosa, G., Golarri, J.I., Bogart, J. and García, J.. Commercial optical fiber as TLD material. Radiation Protection Dosimetry (2006). Vol. 119, No. 1-4, pp. 197-200.
- [7] Nérrou, Jean Pierre. Introducción a las telecomunicaciones por fibras ópticas. Ed. Trillas. Primera edición 1991.
- [8] Ávalos, Miguel, Gradilla, Israel. Comunicación interna (2006). Centro de Ciencias de la Materia Condensada. UNAM.
- [9] Ford, M.H., Averbach, S. M., Monson, P.A.. On the mechanical properties and phase behaviour of silica: A simple model based on low coordination and strong association. Journal of Chemical Physics. Vol. 121, No. 17. November 2004.
- [10] Pávlov, P.V., Jójlov, A.F.. Física del estado sólido. Ed. Mir Moscú. 1987.

- [11] Gubanov, V.A., Zatsepin, A.F., Kortov, V.S., Freidman, S.P. and Cherlov, G.B.. Electron structure of oxygen-vacancy defects in silicon dioxide. *Journal of Applied Spectroscopy*. Volume 49, Number 1/ 1988.
- [12] Roma, G., Limoge, Y.. Density functional theory investigation of native defects in SiO<sub>2</sub>: Self-doping and contribution to ionic conductivity. *Physics Review B* 70, 174101 (2004).
- [13] Ruiz Mejía, Carlos. *Trampas de luz. La ciencia para todos/27*. Ed. Fondo de Cultura Económica. Tercera Edición. (2003).
- [14] Silberberg. *Química. La naturaleza molecular del cambio y la materia*. Ed. McGraw-Hill. Segunda edición (2002).
- [15] Tsoufanidis, Nicholas. *Measurement and detection of radiation*. Ed. Taylor and Francis. Second Edition, 1995.
- [16] Rickards, Jorge, Camaras, R.. *Las radiaciones: Reto y realidades*. Fondo de cultura económica. 1986.
- [17] L'Annunziata, Michael F.. (Editor). *Handbook of Radioactivity Analysis*. Academic Press. Second Edition. 2003.
- [18] Uchino, T., Takahashi, Yoko T.. Structure and generation mechanism of the peroxy-radical in amorphous silica. *Physical Review Letters*. Volume 86. Pg. 4560. (2001).
- [19] Beiser, A.. *Conceptos de física moderna*. Ed. McGraw-Hill. Segunda edición. 1988.
- [20] Shalíмова, K.V.. *Física de los semiconductores*. Ed. Mir Moscú. (1975).
- [21] McKeever, S.W.S. *Thermoluminescence of solids*. Ed. Cambridge University, 1988.
- [22] Pantelides, Sokrates T.. (Editor). *The physics of SiO<sub>2</sub> and its interfaces*. Pergamon Press Inc. First Edition. (1978).

[23] Hütt, Galina and Jack, Ivar. Advances in the luminescence dating: the optically stimulated luminescence based procedure and their physical background. Proc. Estonian Acad. Sci. Geol., 2001, 50, 4, 214-232.