



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

METODO Y CARACTERIZACION DEL TLD-100 COMO
DETECTOR DE ULTRAVIOLETA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

F I S I C O

P R E S E N T A :

ALFONSO ESTRADA GARCIA



FACULTAD DE CIENCIAS
UNAM

DIRECTOR DE TESIS: DR. VICTOR MANUEL CASTAÑO MENESES





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES Y ENSEÑANZA DE QUÍMICA
CARRERAS DE QUÍMICA Y QUÍMICA INDUSTRIAL
CARRERA DE QUÍMICA INDUSTRIAL
CARRERA DE QUÍMICA INDUSTRIAL



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e Internet el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: ESTRADA GARCIA
ALFONSO
FECHA: 10 Marzo 2004
FIRMA: [Signature]

ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ
Jefe de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:
"Método y caracterización del TLD-100 como detector de Ultravioleta"

realizado por ESTRADA GARCIA ALFONSO

con número de cuenta 8017194-6 , quien cubrió los créditos de la carrera de: Física

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

A t e n t a m e n t e

Director de Tesis
Propietario

DR. VICTOR MANUEL CASTAÑO MENESES

Propietario

DR. RAMIRO GARCIA GARCIA

Propietario

DR. SERGIO RAMOS BERNAL

Suplente

DR. EDUARDO ANDRADE IBARRA

Suplente

DRA. BEATRIZ ELIZABETH FUENTES MADARIAGA

Consejo Departamental de

[Signature]

DRA. PATRICIA GOLDSTEIN MENACHE
Coordinadora de Licenciatura
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

*A la memoria de Esteban y
Carmen, mis queridos padres.*

*Madre, usted me tenía y yo la
tenía; padre te necesito y tu
me necesitas.*

*Ellos ya no habitan la casa
Adiós.*

*Siempre los llevaré en mi
corazón.*

*Intenté correr, pero sólo
tropecé, pero ustedes me
hicieron levantarme, lo único
que me queda es darles las
gracias.*

*Dedicado a Verónica y Moserrat (mis
deseos de vivir).*

Quisiera que me vieras volar, presenciar
un mundo distinto. ¿Crees que podrás
lograrlo? Quisiera que me vieras llorar,
no puedo ayudarte pero siempre estaré
ahí.

Respira, inhala aire. No tengas miedo de
quedarte solo, después de todo solo soy
un hombre ordinario.

¿pensaste que podías distinguir el cielo
del infierno? ¿Distinguir el campo verde
del frío hiriente de un cementerio? ¿Una
sonrisa de un velo, crees que lo puedes
distinguir? ¿ellos te hicieron cambiar tus
héroes por fantasmas?

¿el aire caliente por brisa fresca? ¿la
comodidad cálida por un ambiente frío?

Si tú vas a patinar en el hielo quebradizo de
esta vida moderna, arrastrándose detrás de ti,
irá el reproche silencioso de miles de ojos
llenos de lagrimas.

No te sorprendas, cuando una grieta aparezca
debajo de mis pies.

No hay dolor, solo estoy
retrocediendo, me veo como el humo distante
de un barco en el horizonte.
Solo estoy atravesando las olas.
Mis labios se mueven pero no puedo escuchar
lo que están diciendo.

Cuando fui niño tuve una fiebre,
mis manos se sentían como dos globos.
Ahora tengo esa misma sensación
No puedo explicarlo, tú no entenderías.

Cuando fui niño tuve una visión fugitiva, la
observe con la esquina de mi ojo; me di
vuelta pero se había ido, ahora no puedo
recordarla.

Mi sueño se fue, el niño se fue.

Así que tú pensaste que podía gustar
este espectáculo, sentir la cálida emoción
de esta confusión.

¿hay algo que elude de ti la luz del sol?
¿No es esto lo que tú esperabas ver ?
Si quieres encontrar la verdad qué hay detrás
de estos fríos ojos, únicamente tendrás que
desgarrar mi disfraz.

*Al recuerdo de Fernanda
Elizabeth y Sofía Itzel Estrada Gutrhie.*

Hago patente mi agradecimiento al Dr. Víctor Manuel Castaño Meneses, por la dirección de este trabajo de tesis, así como por su apoyo incondicional, paciencia y por creer en mí.

Al Dr. Sergio Ramos Bernal por la revisión y sugerencias.

Al Dr. Ramiro García García por la revisión y comentarios.

A la Dra. Beatriz Fuentes Madariaga.

Al Dr. Eduardo Andrade Ibarra.

Al Dr. Epifanio Cruz Zaragoza por las facilidades prestadas de las instalaciones del Gammabeam del Instituto de Ciencias Nucleares, así como por sus sugerencias y comentarios.

Al Dr. Gonzalo Martínez Barrera por su apoyo moral.

A la Dra. Alicia Negrón Mendoza por sus comentarios a cerca de este trabajo.

Al Físico Francisco García Flores por el soporte técnico, académico, sugerencias y comentarios en el desarrollo de las irradiaciones.

A los Señores Francisco Isidoro Pacheco y Salvador Valle por su apoyo Técnico.

Así como a mis compañeros tesisistas: Susana Pineda calzada, Isabel Lira Ocotitla, Blanca Karen Torres Gomez y Claudia Tauffer.

INDICE

	Página:
INTRODUCCION	1
CAPITULO 1. FUNDAMENTOS TEORICOS.	
1.1 Sólidos cristalinos y defectos.	3
1.2 Excitación por radiación.	5
1.2.1 Ionización por la radiación .	6
1.3 Fenómeno luminiscente.	8
1.4 Termoluminiscencia.	11
1.4.1 Defectos de red en los procesos termoluminiscentes.	13
1.5 Modelo general de la termoluminiscencia.	14
1.6 Procedimientos de horneado térmico.	15
1.7 Eficiencia termoluminiscente.	16
1.8 Curva de brillo.	17
1.9 Dosimetría UV.	20
CAPITULO 2. EL TLD-100 (LiF:Mg,Ti)	
2.1 Introducción.	22
2.2 Termoluminiscencia del LiF: Mg, Ti.	23
2.3 Mecanismo termoluminiscente.	24
El papel de los iones de Magnesio.	25
El papel del Titanio y los iones de Hidroxilo.	28
2.4 Composición de impurezas en la curva de brillo.	30
2.5 Pérdida de respuesta (fading) y horneado.	31

2.6	Termoluminiscencia fototransferida.	32
2.6.1	Modelo de banda para la PTTL.	33
2.7	Dosimetría UV.	35

CAPITULO 3. PROPIEDADES DOSIMETRICAS

3.1	Respuesta de dosis.	36
3.2	Sensibilidad.	37
3.3	Respuesta de energía relativa del foton.	38
3.4	Tratamientos térmicos.	39
3.5	Lectura de horneado.	41
3.6	Temperatura durante la irradiación.	42
3.7	Fading (pérdida de respuesta) térmico.	43

CAPITULO 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1	Materiales utilizados.	44
4.2	Equipo lector.	44
4.3	Caracterización de los cristales TLD-100.	45
4.4	Método y caracterización del LiF:Mg,Ti Con luz UV.	47
4.5	Sensibilización de los cristales de LiF:Mg,Ti.	48
4.6	Irradiación UV.	50
4.7	Parte I. Emisión luminiscente del LiF:Mg,Ti Sensibilizado a 0.1 y 3 kGy con un tratamiento Térmico de 380°C y expuesto a radiación UV.	50
4.8	Parte II. Emisión luminiscente del LiF: Mg, Ti con tratamientos térmicos de 200°C y 380°C, sensibilizados con 0.1 y 3 kGy de gammas de ⁶⁰ Co e irradiados con luz UV.	51
4.9	Parte III. Emisión luminiscente del LiF:Mg,Ti Con diferentes tratamientos térmicos, sensibilizados Con 3 kGy de gammas e irradiados con UV.	51

CAPITULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
5.1 Parte I. Emisión Luminiscente del LiF:Mg,Ti Sensibilizado a Altas dosis y expuesto a radiación UV.	52
5.2 Parte II. Respuesta UV para diferentes dosis y temperaturas De pre-irradiación.	56
5.3 Parte III. Emisión UV para diferentes tratamientos térmicos De pre-irradiación con 3 kGy.	65
CAPITULO 6. CONCLUSIONES	74
APÉNDICE.	77
REFERENCIAS	79

Resumen

El Fluoruro de Litio (LiF) es un cristal formado por iones de halogenuros alcalinos, que al ser impurificado con Mg y Ti y expuesto a radiación ionizante y no ionizante (ultravioleta) se generan defectos o imperfecciones en su estructura, alterando las propiedades del cristal, lo que hace posible su estudio como un detector de radiación, en particular de ultravioleta (UV.)

Cuando el cristal LiF: Mg,Ti es expuesto a radiación, o bien es sometido a alguna reacción química, o a algún esfuerzo mecánico, algunos de los electrones liberados pueden ser atrapados por imperfecciones en la red, conocidos como trampas de electrones. Estos electrones pueden quedar atrapados por cientos o miles de años si la temperatura es baja o el atrapamiento es energéticamente grande (trampas profundas), hasta que exista un agente externo, como puede ser la estimulación térmica suficiente para que estos sean liberados^[14].

El interés de este trabajo se centra en el estudio del cristal de LiF: Mg,Ti con la radiación que presenta características de interés tanto en aplicaciones en un amplio campo de la dosimetría, como en el estudio básico de la interacción con la radiación. Uno de los objetivos principales está en entender el efecto de la radiación no ionizante (UV) al interactuar con el cristal de LiF: Mg, Ti. Este sistema cristalino es atractivo por sus amplias aplicaciones en la estimación de dosis, por su sensibilidad y densidad parecida al tejido humano, y, además, la posibilidad de utilizarse en la medición de la radiación UV del medio ambiente cuya relevancia es importante hoy día.

En este trabajo de tesis se ha encontrado que la sensibilidad del cristal LiF: Mg,Ti depende generalmente de los tratamientos de pre-irradiación, así como de su historia térmica. Se estudió la emisión térmicamente estimulada (termoluminiscencia o TL), en función del intervalo de temperaturas de 120°C a 600°C como tratamientos térmicos y también de dosis alta (0.1, 1 y 3 kGy) con gammas de ⁶⁰Co como tratamientos de pre-irradiación para inmediatamente después detectar la radiación ultravioleta. Esto ayuda a caracterizar al LiF:Mg,Ti como un detector de UV a bajas dosis, donde se obtiene mejor resultado. El mecanismo de los defectos generados por UV es complejo de entender, sin embargo, se puede proseguir su estudio mediante una estimulación térmica (horneado a cierta temperatura). Esta tesis pretende lograr condiciones definidas de tratamiento térmico y de pre-irradiación con el fin de lograr sensibilizar el cristal de LiF impurificado con Mg y Ti y definir una respuesta adecuada a radiación ultravioleta.

Introducción

La luz emitida como función de la temperatura por materiales cristalinos, después de ser expuesta a radiación ionizante, se conoce comúnmente como termoluminiscencia. La estructura que muy a menudo aparece en forma de bandas, llamadas picos (emisiones) de las curvas de brillo, están relacionados con el material, las impurezas y los defectos generados por la irradiación. En general, la emisión de luz se debe a la recombinación de los defectos capturados de cierta forma (centros F y agregados F) generados como halógenos intersticiales (centros H) producidos durante la irradiación.

En los últimos años se han realizado numerosas investigaciones que tienen que ver con la naturaleza de las impurezas que actúan como los centros de captura, y como un resultado de esto, se han desarrollado dos modelos distintos, basados en las impurezas de los iones de Mg^{2+} como parte de los centros que actúan como trampas de electrones. El primer modelo principalmente interpreta dipolos formados por vacancias Mg^{2+} - catión que actúan como centros de captura^[1], y el segundo se basa en centros Z formados por pares de Mg^{2+} - electrón que ocupan vacancias anión^[2]. Sin embargo ambos modelos aún siguen en discusión por varios autores. Además de éstos, otros modelos de centros de captura han sido propuestos para explicar las emisiones.

Para determinar la naturaleza de los centros de captura de un material TL, existen dos problemas. Uno es la naturaleza atómica de la trampa y el otro, la captura de un electrón o hueco. Para entender la naturaleza atómica de los centros de captura en un material TL, con frecuencia se intenta una correlación entre los picos TL y las bandas de absorción óptica.

Estos estudios se realizan para probar la estructura de los defectos en un material TL. Sin embargo, la interpretación de los datos no es una prueba sencilla de abordar, debido a la extrema complejidad de la absorción óptica y de los datos termoluminiscentes del LiF: Mg, Ti. En otras palabras, raramente es posible probar las correlaciones entre los picos TL y las bandas de absorción. Para comprender la naturaleza de la carga electrónica de los centros de defecto en un material TL, se usa la técnica de termoluminiscencia fototransferida (PTTL) en la cual los electrones pueden ser liberados ópticamente o térmicamente de sus trampas. De esta manera, los electrones se dirigen a la banda de conducción, aunque la temperatura sea demasiado baja para provocar excitación térmica. Sin embargo, si la luz puede liberar la carga atrapada, se puede considerar la posibilidad de que una reabsorción TL pueda ocurrir durante los procesos de lectura. Esto da lugar a la liberación óptica de electrones y a su componente térmica.

El cristal de LiF:Mg,Ti es atractivo por sus amplias aplicaciones en la estimación de dosis, cabe destacar que su comportamiento de buen detector de la radiación depende fuertemente de su historia térmica y de los tratamientos de pre-irradiación.

En el desarrollo del trabajo de tesis, se ha ubicado en el Capítulo uno algunos aspectos generales, como son: Los defectos puntuales e impurezas y su papel en el fenómeno luminiscente, así como las características del proceso de termoluminiscencia.

En el capítulo dos se describe al cristal LiF: Mg, Ti, conocido comercialmente como TLD-100 que fue patentado por Harshaw Company. Se describen su composición y características generales, sensibilidad, procedimientos de horneado, fading y curva de brillo.

En el capítulo tres se mencionan las propiedades dosimétricas que deben cumplir los materiales termoluminiscentes y en el capítulo cuatro se detalla el procedimiento experimental empleado.

En el capítulo cinco se exponen los resultados y discusión, así como la caracterización y detección de los cristales de LiF expuestos a radiación ultravioleta. En el capítulo seis se dan las conclusiones de este trabajo.

Al final se muestra un apéndice, en el cual se indican algunos aspectos de la luz ultravioleta, así como, las unidades de medida de la radiación.

CAPITULO 1. FUNDAMENTOS TEORICOS.

1. 1. Sólidos Cristalinos y defectos.

Un sólido cristalino está formado por un arreglo ordenado de átomos. Esta red cristalina puede generarse repitiendo indefinidamente en todas direcciones un arreglo elemental llamado celda unitaria. De esta forma, se obtiene una estructura periódica que permanece invariante frente a traslaciones. La estructura cristalina específica que ha de tomar el sólido, depende de varios factores, siendo uno de ellos el tipo de fuerza que mantiene a los átomos unidos. Es precisamente el tipo de fuerza lo que clasifica a los sólidos cristalinos en metálicos, covalentes e iónicos, dependiendo del enlace que da la fuerza de unión.

Los cristales metálicos se dan cuando los átomos que los forman tienen electrones muy poco amarrados y con poca energía se liberan de su ión. Estos electrones viajan casi libres por todo el cristal.

En los cristales covalentes los electrones se comparten entre dos iones. La nube electrónica se dispone de tal manera que los iones positivos son atraídos hacia los sitios donde aquella se localiza principalmente. Estos sitios no son cualesquiera, por lo que el enlace covalente se da en sólo ciertas direcciones, ejemplos típicos son los cristales formados por Germanio, Silicio y Carbono. Usualmente un cristal es un aislante en donde los defectos e impurezas crean subniveles de energía dentro de la banda de energía prohibida del material, donde pueden estar tanto electrones como huecos.

A diferencia de los cristales covalentes, en los que los electrones se comparten, en los cristales iónicos uno de los átomos participantes cede electrones al otro elemento el cual los captura. Las fuerzas de enlace interatómicas son del tipo Coulombiana. Cuando un átomo con un electrón fuera de una capa cerrada se encuentra con otro que requiere de uno para completar la capa, uno lo cede y el otro lo acepta. Se forman así dos iones, uno positivo porque cedió un electrón y el otro negativo porque ganó un electrón adicional. Por lo tanto, la atracción Coulombiana los mantiene unidos. Esta descripción se aplica a la unión de átomos alcalinos con átomos halógenos. De hecho los cristales iónicos por excelencia son los halogenuros alcalinos, como lo es el cloruro de sodio NaCl y el fluoruro de litio LiF.

Los defectos que se presentan en un cristal pueden clasificarse de acuerdo a su dimensión topológica^[3], interesándonos los defectos puntuales y las impurezas en el cristal LiF: Mg,Ti, así como el efecto de la radiación UV.

En general los defectos puntuales son alteraciones del cristal en algún sitio, los cuales consisten en la ausencia o presencia extra de iones, se pueden clasificar en defectos intrínsecos y en defectos extrínsecos.

(i) Defectos intrínsecos son alteraciones de los átomos o iones que constituyen el cristal. Básicamente hay dos tipos, ya sea que exista un átomo o ión extra, es decir, donde no debía de haber, conocido como un defecto intersticial o defecto Frenkel, o bien que falte uno de los átomos o iones dentro del cristal es conocido como defecto Schottky. Una vacancia de ión negativo representa una carga positiva para el cristal.

En cristales iónicos, como los halogenuros alcalinos, los defectos deben de producirse de manera que se mantenga la estequiometría (balance químico de los elementos involucrados) y la neutralidad eléctrica. Por ello, un defecto Schottky en un cristal iónico consiste en un par de vacancias: una de anión y otra de catión. El defecto Frenkel consiste de un ión intersticial y su vacancia respectiva.

(ii) Defectos extrínsecos son aquellos constituidos por átomos o iones distintos a los que forman el cristal y se conocen en general como impurezas. La impureza es conocida como sustitucional cuando ocupa el lugar de un átomo o ión, mientras que si ésta ocupa un sitio donde normalmente no hay nada, es decir, entre átomos o iones, se conoce como impureza intersticial.

En un sólido iónico, una vacancia de ión negativo se llama centro α . Cuando un electrón es atrapado en un centro α forma un centro F. Asociaciones de tres ó cuatro centros F se llaman centros R ó N respectivamente. Cualquier centro con un electrón extra se denota con un apóstrofe, por ejemplo, M', R' y F'. En caso de que sean huecos los atrapados por iones negativos la notación es del tipo V_F , V_3 , etc. Siendo el centro V_F un hueco atrapado en una vacancia de ion positivo y centro V_3 una vacancia de ion positivo con dos huecos atrapados. El centro M como se mencionó antes, está constituido por dos vacancias de ion negativo con dos electrones atrapados. Es decir, dos centros F juntos como se observa en la figura 1.1. Este centro ha sido estudiado extensamente^[4] y relacionado principalmente con las emisiones de luminiscencia emitidas térmicamente^[5].

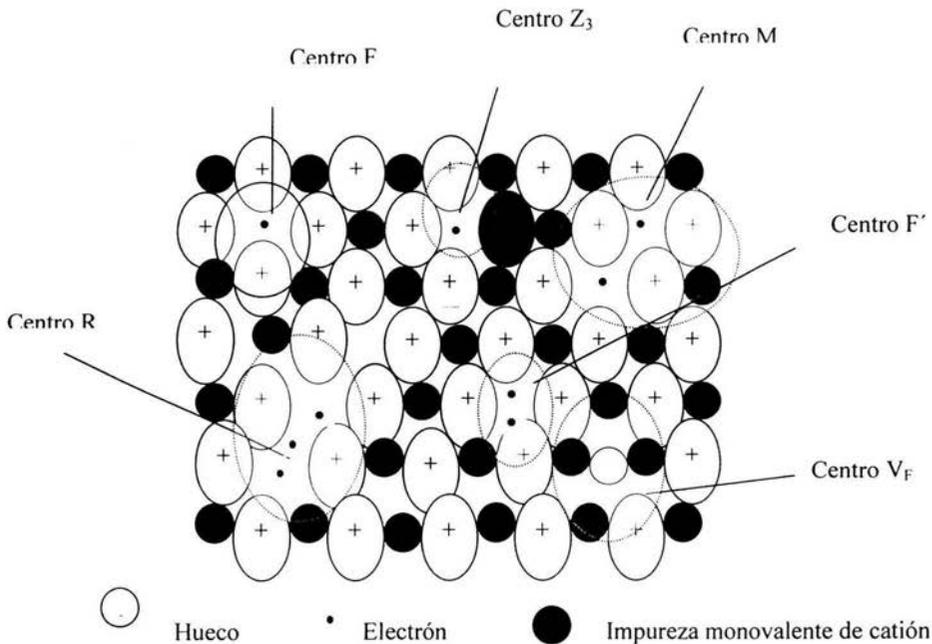


Fig. 1.1. Algunos de los centros de color en los halogenuros alcalinos.

Existen otros centros más complejos en la estructura, que se intentan explicar mediante modelos del LiF: Mg: Ti (Modelos de Nink y Kos^[6]) en los cuales se han definido otros centros por ejemplo un ión de Mg más un centro α ($\text{Mg: } \alpha$) conocido como centro Z_0 , ó el ión de Mg más un centro F' ($\text{Mg: } F'$) que es, evidentemente un centro eléctricamente neutral, llamado centro Z_1 . Un centro Z_3 es (Mg:F).

1.2. Excitación por radiación.

Cuando algún cristal es expuesto a la radiación ionizante, algunos de los electrones o huecos son capturados en las imperfecciones de la red cristalina. Los huecos pueden permanecer capturados por estas imperfecciones en el cristal por largos períodos de tiempo a temperatura ambiente.

Si la temperatura aumenta, los electrones (o huecos) son liberados de las trampas y una cierta fracción se recombina con los centros de carga opuesta que pueden estar cerca de la impurezas, produciendo emisión de luz. La radiación causa también cambios en los iones de la red y en las impurezas presentes. Los productos finales de estos cambios, son clasificados en tres categorías de defectos: 1) Defectos electrónicos, que involucran cambios en los estados de valencia, 2) Defectos iónicos, que desplazan los iones de la red 3) imperfecciones densas, como dislocaciones.

Las propiedades de captura del LiF:Mg:Ti, están asociadas con la introducción del Mg^{+2} , como una impureza activa (activador) dentro de la red cristalina. Probablemente el defecto más común de radiación inducida en los alcaloides es el centro F (electrón capturado en una vacancia con un ión halógeno).

1.2.1. Ionización por Radiación.

La radiación ionizante es aquella capaz de formar iones dentro de un material, esto es, radiación que puede quitar electrones de los átomos o iones que constituyen el material. Como ejemplos están los rayos X y γ , y el bombardeo con partículas cargadas o neutras (rayos α , neutrones, protones, electrones). Normalmente los halogenuros alcalinos cristalinos son transparentes a la luz visible. Esto se debe a que la región de energía prohibida entre la banda de valencia y la banda de conducción es del orden de 9 a 10 electrón volts (eV), y los fotones de la luz visible tienen energías comprendidas entre 1.2 y 1.3 eV, por lo que no son absorbidos.

Varios de estos defectos tienen niveles de energía localizados dentro de la región prohibida, como se ilustra en la figura 1.2.

El daño que produce la radiación ionizante pueden clasificarse como: Defectos electrónicos, defectos iónicos y defectos de gran extensión. A su vez estos defectos pueden ser generados por la radiación. Los procesos electrónicos consisten en la absorción de la energía radiante, produciéndose ionización en átomos o impurezas del cristal. Un electrón excitado a la banda de conducción deja un sitio vacío en la banda de valencia y con carga opuesta, esto es, un hueco. Después de la excitación el electrón o el hueco deben moverse y ser capturados por algún defecto de la red, pues de lo contrario se recombinarán, restableciéndose la condición original y emitiendo un fotón.

En los halogenuros alcalinos los electrones excitados a la banda de conducción pueden moverse con mayor facilidad que los huecos en la banda de valencia. El movimiento de estos últimos se observa a temperaturas altas. El mecanismo del daño por la radiación involucra dos tipos de procesos: i) el proceso primario, por medio del cual la radiación forma centros F y H estables. ii) Los procesos secundarios que consisten en la estabilización de los defectos intersticiales (H) por las impurezas en el cristal. Estos defectos también son importantes en las emisiones luminiscentes y generalmente son característicos en cada tipo de cristal.

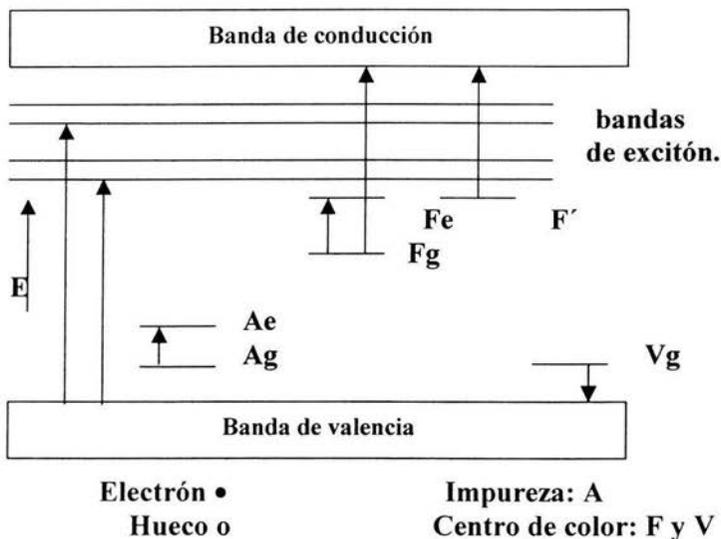


Fig. 1.2. Representación esquemática de la estructura de bandas de cristales halogenuros alcalinos, ilustrándose las transiciones asociadas a niveles de energía de defectos dentro de la región prohibida. El subíndice "g" se emplea para el estado base y el "e" para el estado excitado.

Dentro de los procesos electrónicos también se incluyen los defectos que se forman al capturar o ceder cargas, e incluyen a los cambios de valencia de las impurezas en la red. Como ejemplo de defectos formados al capturar cargas están, el centro F, el centro Z_3 , el centro F_z . Como ejemplo de cambio de valencia de las impurezas están la oxidación ($Z^{2+} \rightarrow Z^{3+}$) y la reducción de ellas ($Z^{2+} \rightarrow Z^+$, $A^+ \rightarrow A^0$).

b) Defectos iónicos.

Son los defectos originados por desplazamientos de los iones o átomos de la red. Por ejemplo están la formación de vacancias (defectos Schottky), la agregación de vacancias y los defectos intersticiales I y H. Un átomo intersticial de halógeno (ión halógeno que ha cedido un electrón y que se encuentra en una posición intersticial) ligado a un ión halógeno con el que comparte un sitio de la red es conocido como centro H o X^0 . Este centro es un ejemplo de cambio simultáneo de valencia y de posición del ión, producido por la radiación. La radiación puede promover también la formación de agregados de defectos, como por ejemplo, de las impurezas.

c) Defectos de gran extensión.

Son defectos producidos al irradiar con dosis altas y/o altas temperaturas. Ejemplos de ellos son las dislocaciones y las vacancias generadas por los defectos puntuales bajo irradiación. Durante la irradiación con fotones de baja energía puede excitarse un par electrón-hueco, el hueco se localiza en la posición de dos iones halogenuros vecinos formando una molécula X_2^- a lo largo de la dirección $\langle 110 \rangle$ de empaquetamiento del anión. Para altas temperaturas ocurre la separación de un ion halogenuro de la molécula X_2^- y se inicia un desplazamiento subsecuente a lo largo de la dirección $\langle 110 \rangle$. El resultado de este desplazamiento es que se forma un centro F y una vacancia al principio del desplazamiento, además de formarse un centro H en el extremo de la cadena. Todos los defectos mencionados juegan un papel relevante en la emisión luminiscente estimulada por calor. Esta propiedad del cristal se aprovecha en este trabajo para la caracterización del cristal LiF con impurezas de Mg y Ti como un detector de radiación UV.

1. 3. Fenómeno Luminiscente.

Luminiscencia.

Cuando la radiación incide en un material parte de su energía puede ser absorbida por el medio sólido y reemitida como luz de mayor longitud de onda que la absorbida. Este proceso se conoce como luminiscencia.

La luminiscencia, en general es descrita por la adición de un prefijo, con el término luminiscencia. El prefijo generalmente indica que el material recibe cierto tipo de energía. (Tabla 1.1).

Efecto luminiscente	Medio de excitación
Fotoluminiscencia	Fotones ópticos (ultravioleta, visible e infrarrojo.)
Triboluminiscencia	Frotamiento o molido
Quimiluminiscencia	Energía química
Bioluminiscencia	Energía Bioquímica
Cátodo luminiscencia	Rayos catódicos
Electroluminiscencia	Campo eléctrico
Radio luminiscencia	Radiación ionizante
Sonó luminiscencia	Ondas de Sonido
Fluorescencia (emisión rápida.) Fosforescencia (emisión retardada.) Termoluminiscencia (emisión acelerada térmicamente.)	Varios

Tabla 1.1. Efectos luminiscentes.

La termoluminiscencia (TL), la fluorescencia y la fosforescencia son formas particulares de la luminiscencia, las cuales no se encuentran relacionadas con el medio de excitación (el cual puede variar para las tres formas), pero si para la escala de tiempo sobre el cual la emisión luminiscente puede situarse.

La excitación luminiscente involucra la transferencia de energía de los electrones desde su estado base (G) y su desplazamiento hacia un estado de mayor energía (estado excitado E). Si los electrones excitados retornan rápidamente a su estado de energía original (estado G) con la emisión de radiación óptica como se muestra en la figura 1.3(a), entonces el proceso es llamado fluorescencia. Sin embargo, si debido a la presencia de una trampa electrónica (estado metaestable M), el retorno de los electrones al estado base se retarda, el proceso se determina como fosforescencia, como se muestra en la figura 1.3(b) La transición de los electrones directamente de un estado metaestable hacia un estado base está prohibida.

El estado metaestable representa una trampa electrónica poco profunda y los electrones retornan hacia un estado excitado requiriendo energía. Esta energía puede suministrarse en forma de radiación óptica (foto estimulación) o como calor (estimulación térmica), esto último, considerado como el fenómeno de luminiscencia estimulada térmicamente. La liberación de un electrón de un estado metaestable hacia un estado excitado puede describirse por la ecuación de Boltzmann, considerando una probabilidad P de que ocurra la liberación:

$$P = s \exp(-\Delta E / kT)$$

donde s es una constante, ΔE es la diferencia de energía entre los estados E y M (comúnmente llamada profundidad de la trampa), k es la constante de Boltzmann y T es la temperatura en grados kelvin.

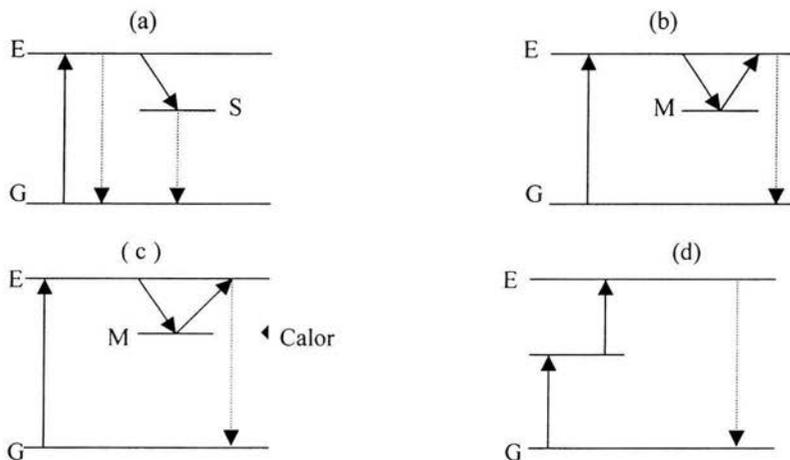


Figura 1.3. Ejemplos simples de procesos luminiscentes. (a) Fluorescencia: el rápido retorno de un electrón de un estado excitado directamente hacia un estado base o vía una transición permitida de un estado intermedio S (relajación), donde la energía de excitación es provista de fotones, los fotones de emisión luminiscente tienen longitudes de onda muy grandes (ley de Stokes.) (b) Fosforescencia: El retorno de un electrón de un estado excitado hacia un estado base es retardado por el estado metaestable M. La transición directa de un electrón de un estado meta estable hacia el estado base está prohibida. (c) Termoluminiscencia: El retorno de un electrón capturado en un estado meta estable es liberado rápidamente mediante el calentamiento del material. (d) Luminiscencia Anti-Stokes: La excitación de un electrón se alcanza por la absorción de dos o más fotones.

Al aumentar la temperatura, la probabilidad de escape de un electrón se incrementa, acelerando efectivamente el proceso de fosforescencia y progresivamente vacía los estados meta estables profundos cuando se incrementa la temperatura^[7].

Este proceso es llamado termoluminiscencia (ilustrado en la figura 1.3(c)) el cual es muy diferente de la incandescencia, en el cual la aplicación de calor causa vibraciones vigorosas, colisiones y excitación de todos los átomos del material, dando como resultado un espectro de emisión aproximadamente como el de un radiador de cuerpo negro a la misma temperatura.

No siempre es claro cuando una emisión es fluorescente o fosforescente. Si después de la excitación, el decaimiento del átomo excitado es del orden de unos 10ns, el proceso es sin lugar a dudas fluorescente, si la emisión persiste por un período de más de 10 ms (que el ojo puede resolver) es sin duda alguna fosforescente. Para períodos de decaimiento intermedio es necesario examinar el efecto del aumento de temperatura del material para decidir donde la emisión es fluorescente o fosforescente.

La fluorescencia es esencialmente independiente de la temperatura, mientras que, como puede observarse, la fosforescencia es acelerada por el aumento de temperatura de acuerdo con la ecuación de Boltzmann.

1.4. Termoluminiscencia.

El mecanismo de termoluminiscencia es muy complejo y aunque por lo general se han postulado modelos teóricos, han surgido dificultades cuando se consideran los materiales dosimétricos específicos, particularmente el material más común de Fluoruro de Litio dopado con Magnesio y Titanio: LiF: Mg,Ti.

Se han sugerido varios modelos teóricos para los procesos de termo luminiscencia pero aún no se ha explicado todos los fenómenos observados experimentalmente. Se ha avanzado en explicar el papel que juegan el magnesio, titanio y los iones de hidroxilo (OH) en los procesos de captura y recombinación luminiscente^[8]. Un mecanismo teórico general de termoluminiscencia se ha desarrollado a partir de estructuras cristalinas multiatómicas, los halogenuros alcalinos. Generalmente estos consisten de dos redes cúbicas de iones alcalinos y halogenuros, como se ilustra en la figura 1.4(a).

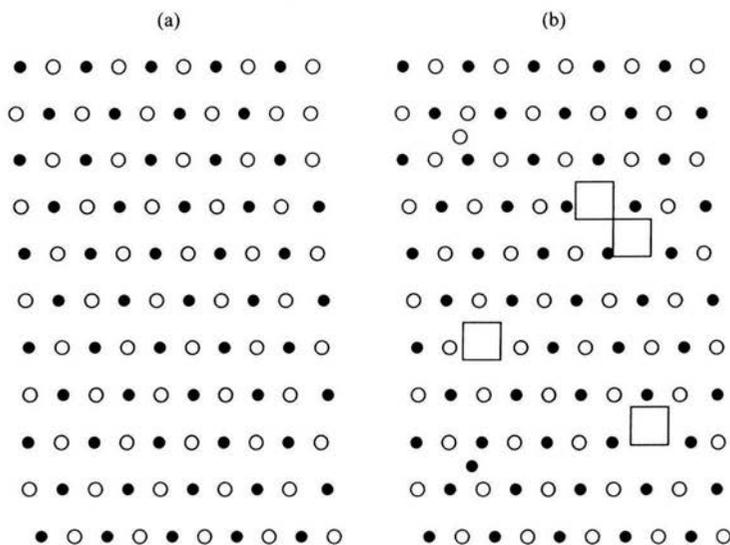


Figura 1.4. Estructura iónica. (a) un cristal halogenuro alcalino ideal perfecto, (b) un cristal imperfecto real que contiene defectos de varios tipos. □ vacancia
● ion halogenuro, ○ ion de metal alcalino.

La estructura muestra que puede existir el caso ideal de un cristal perfecto. Todos los cristales reales contienen defectos de red de varios géneros y estos juegan un papel importante en los procesos de termoluminiscencia. Una vacancia con ion negativo, ilustrada en la figura 1.4(b), es esencialmente una región con exceso de carga positiva, de tal manera que puede considerarse como un potencial de captura para un electrón libre.

De los defectos de red mencionados el aumento de temperatura en la red, aumenta el número de defectos tales como vacancias y los defectos puntuales ya mencionados, esto se toma en cuenta como importante cuando se consideran los tratamientos térmicos de los fósforos termoluminiscentes. Cuando un ión de Magnesio (Mg^{2+}) se introduce en la red del LiF, se combina con una vacancia de un ión de Litio (Li^+), por la atracción Coulombiana, la combinación de estos forman pares de vecinos cercanos llamados dipolos, de esta manera, al tener una diferencia de temperatura, estos pueden juntarse en grupos de tres llamados trímeros, y así sucesivamente.

Si un material es enfriado rápidamente desde una temperatura alta hasta una temperatura baja, es posible “congelar” el número de defectos como dipolos apropiados para ese aumento de temperatura, lo cual permite hacer más reproducibles las lecturas de los datos en los cristales.

Los defectos simples son mucho más favorables energéticamente hablando que los más complejos.

1.4.1. Defectos de Red en los Procesos Termoluminiscentes.

La presencia de defectos en un material es de suma importancia en los procesos de termoluminiscencia.

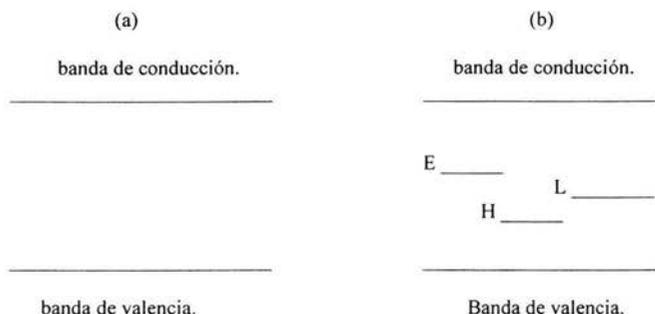


Figura 1.5. Diagrama de banda de energía de (a) un cristal "ideal" y (b) un cristal "real" que contiene defectos, dando origen a varios centros.

La estructura de banda de energía para un cristal ideal puede representarse mediante un diagrama de banda de energía, como se muestra en la figura 1.5.(a). La banda de valencia es representativa de todos los electrones que se mantienen en los estados superficiales, y la banda de conducción es representativa de todos los electrones que están en los estados internos, los cuales se encuentran libres para emigrar a través de la red cristalina. En el caso de un cristal ideal, como el LiF, la banda de conducción puede estar vacía y todos los electrones residir en la banda de valencia. La banda de valencia y la banda de conducción se encuentran separadas energéticamente por una banda "prohibida". Sin la influencia de fuerzas externas es altamente improbable que un electrón sea capaz de atravesar la banda prohibida e ir de la banda de valencia hacia la banda de conducción. Sin embargo, en el caso de un cristal real desordenado el cual contiene defectos de una naturaleza simple y/o compleja, existen otros niveles de energía permitidos en la región de la banda prohibida, figura 1.5.(b) L es un centro luminiscente donde los huecos y electrones se recombinan emitiendo un fotón. Cabe decir, que en los modelos teóricos, en caso de que las probabilidades de captura y sus recombinaciones son iguales se denomina cinética de segundo orden. En realidad, los procesos de los defectos de captura y recombinación no se encuentran limitados a las cinéticas de primer y segundo orden, pero pueden seguir un orden general. En el LiF: Mg, Ti, los iones de Magnesio forman trampas electrónicas en combinación con ciertos defectos en la red. La influencia del Titanio en los procesos de captura es incierta y su papel es la formación de centros de recombinación luminiscentes.

La tabla 1.2. muestra los principales defectos formados al introducir las impurezas y los centros formados bajo la radiación que son útiles para la emisión termoluminiscente.

Defecto	Característica
Dipolos	Ión sustitucional de Mg^{2+} en combinación con una vacancia ión de Li^+ .
Trímeros	Agrupación de tres monómeros (o dipolos) de $Mg_{Li}^+ - V_{Li}$.
Centro F	Vacancia anión ocupada por un electrón.
Centro F'	Dos electrones ocupando una vacancia anión.
Centros F_2, F_3 y F_4	Agregados de 2, 3 y 4 centros F.
Centros F_2', F_3' y F_4'	Centros F_2, F_3 y F_4 con un electrón adicional capturado. Estos centros son conocidos algunas veces como centros M', R' y N' .
Centros V_k	Hueco de autocaptura; Dos átomos halógenos cercanos capturan un hueco y son desolazados hacia otro.
Centros V_3	Par de huecos de autocaptura.
Centros H	Átomo halógeno intersticial amarrado a un átomo halógeno de la red, compartiendo su posición en la red y capturando un hueco.
Vacancia o intersticiales	Defectos puntuales consistentes en ausencia o presencia de electrones extra.
Vacancia de red o Defecto Schottky	Este defecto se crea trasladando un átomo desde una posición interior de la red a una posición de la misma red en la superficie del cristal.
Defecto Krenkel	Átomo o ión que se transporta de una posición de la red a una posición intersticial que no está normalmente ocupada por un átomo.

Tabla 1.2. Principales defectos provocados por las impurezas Mg^{2+} y Ti^+ , y centros generados por la radiación.

1.5. Modelo General de la Termoluminiscencia.

La producción de termoluminiscencia en un material debido a una exposición de radiación ionizante puede dividirse en dos etapas:

- (i) ionización y captura electrónica
- (ii) recombinación electrón y hueco con la emisión de un fotón.

La figura 1.6. ilustra la configuración de la banda de energía para toda la etapa.

La radiación ionizante es absorbida por el material produciendo electrones libres. Con respecto al diagrama de banda de energía este es equivalente a los electrones transferidos de la banda de valencia a la banda de conducción (paso 1). Estos electrones libres se mueven a través del cristal (paso 2), pero si se presentan niveles de captura tales como el E, los electrones pueden ser capturados (paso 3). La producción de electrones libres está asociada con la producción de huecos libres positivos, los cuales, además, pueden emigrar, en términos de energía, vía la banda de valencia (paso 2'). De esta manera los huecos pueden ser capturados (paso 3'). Los electrones capturados producen centros tales como el F, los cuales son centros de defectos en la red, y tales que sus propiedades están primeramente determinadas por la red y el defecto. Algunos centros hueco son térmicamente inestables y pueden decaer rápidamente a temperatura ambiente normal (paso 4'). Los electrones capturados pueden permanecer en sus trampas hasta que no adquieran la suficiente energía para escapar.

Esto puede quedar determinado por dos factores principales: La profundidad de las trampas y la temperatura del material. Si la temperatura del material aumenta los electrones capturados pueden adquirir la suficiente energía térmica para liberarse (paso 4). Los electrones recombinados pueden recombinarse con los huecos en centros luminiscentes, tales como el L y el exceso de energía es radiado en forma de fotones ultravioleta o luz visible (paso 5).

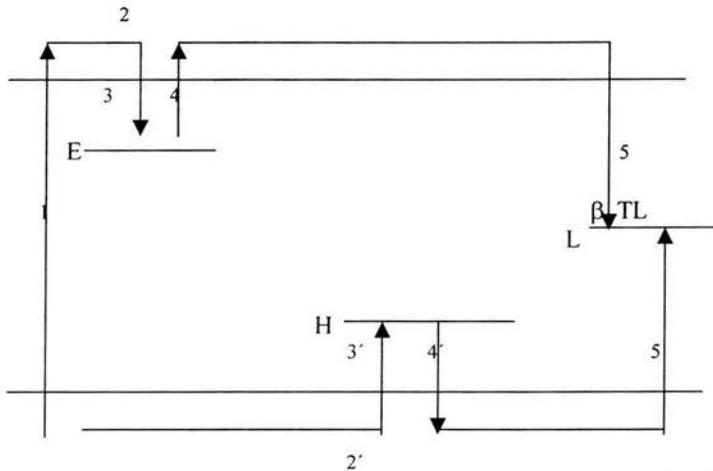


Figura 1.6. Modelo simple de banda de energía para la termoluminiscencia. • electrón, ○ hueco.

Mientras que la captura electrónica y la recombinación retardada con un hueco en un centro luminiscente es el mecanismo termoluminiscente, se hacen posibles otros procesos de recombinación electrón-hueco; esto es, inmediatamente o durante la recombinación demorada con una subsecuente disminución térmica de energía sin la emisión de un fotón y la fluorescencia causada por la inmediata recombinación de huecos y electrones en centros luminiscentes^[8].

1.6. Procedimientos de Horneado.

Para todo material empleado en aplicaciones dosimétricas TL, es de mucha importancia conocer el procedimiento para restaurar sus condiciones básicas. Este procedimiento es llamado “horneado” y tiene dos fines: El primero consiste en dejar completamente vacías las trampas del material después de la irradiación y del ciclo de lectura; el segundo es estabilizar al electrón capturado, para obtener dentro de los límites restringidos, las mismas curvas de brillo después de repetidas irradiaciones y tratamientos térmicos.

La tabla 3. Resume los procedimientos de horneado para varios materiales TL utilizados en la práctica^[9,10,11].

Material TL	Horneado	Pre-lectura
LiF (TLD-100)	1 hr a 400 °C + 24 hrs a 80 °C (ó 2 hrs a 100 °C)	10 min. a 100 °C
LiF:Mg,Ti (monocristal)	1 hr a 400°C + 24 hr a 80°C	Ejecutado en el lector
LiF:Mg,Cu,P (en polvo)	1 hr a 400°C	Ejecutado en el lector
Li ₂ B ₄ O ₇ :Mn	15 min. a 300 °C	10 min. a 100 °C
BeO	15 min. a 600 °C	-
CaF ₂ :Dy (TLD-200)	1 hr. a 400 °C	-
CaF ₂ :Mn (TLD-100)	1 hr. a 400 °C	-
CaSO ₄ (en polvo)	1 hr a 400°C	Ejecutado en el lector
LiF (PTL-700)	240 °C-250°C en el lector	Ejecutado en el lector

Tabla 1.4.. Procedimientos de horneado

Los diferentes horneados son muy necesarios para vaciar todas las trampas (permitidas y profundas) del material. Algunos materiales tienen diferentes picos a baja temperatura; estos, probablemente se vacían a temperatura ambiente (particularmente los picos por debajo de los 100 °C).

En algunos casos es necesario desarrollar un horneado parcial después de la lectura para evitar una pérdida significativa de información.

Este procedimiento se conoce como Pre-lectura de horneado.

El procedimiento de horneado necesita de tiempos grandes, para ser evaluado, en algunos casos, los nuevos materiales desarrollan grandes tratamientos de calor. Para desarrollar una buena evaluación en la dosis registrada por los detectores TL, se puede introducir un dispositivo en los lectores.

El procedimiento solo puede ser aplicado, cuando la razón de dosis no es muy alta, y la señal residual es del mismo orden o mucho menor que la de fondo del material.. En el caso de radiación a altas dosis, es necesario aplicar un horneado a temperatura elevada.

Un material utilizado para propósitos dosimétricos puede sufrir algunos cambios físico-químicos durante los repetidos procesos de horneado y repetidas exposiciones^[12]. Esto hace que la emisión de luz de la radiación no inducida y la producción TL cambie paulatinamente durante el almacenamiento del material, lo que se conoce como fading o pérdida de señal TL, la irradiación repetida y la lectura. Si estas se llevan a cabo, el material TL puede reutilizarse algunas veces, sufriendo algunos cambios dentro de él.

1.7. Eficiencia Termoluminiscente.

Parámetros que afectan la eficiencia TL.

La pre-irradiación de horneado a alta temperatura: restaura o estandariza las características TL (obtenidas por el aumento en la radiación acumulada) y dispersa a los iones impuros a sus estados originales.

- a) Razón de enfriamiento a temperatura ambiente.
- b) Horneado a baja temperatura: reduce los picos de baja temperatura a un nivel apenas perceptible, comparado con los picos dosimétricos estables.
- c) Irradiación.
- d) Post-irradiación de horneado a baja temperatura (puede seguirse después de (c)).
- e) Tiempo de almacenamiento antes de la lectura.
- f) Razón de enfriamiento seguida de la lectura.

1.8. La curva de brillo.

La intensidad de luminiscencia como función de la temperatura, es llamada “termoluminiscencia térmicamente estimulada” o “curva de brillo”.

La curva de brillo del fósforo TL (con una razón constante del incremento de temperatura (dT/dt)) exhibe uno o más picos, conocidos como picos de brillo.

El análisis de éstos picos de brillo proporciona la siguiente información:

- i) Profundidad de las trampas.
- ii) Densidades de las trampas (electrón/hueco)
- iii) Factor de frecuencia (s)
- iv) Movilidad de los portadores de carga
- v) Sección eficaz de captura de las trampas

De esta manera, si se implementa un espectro de emisión en las curvas de brillo (intensidad TL vs. λ), entonces, la naturaleza y características de los centros luminiscentes pueden estudiarse simultáneamente.

Para temperaturas relativamente bajas, la probabilidad de captura tiende a cero. Los portadores de carga no tienen suficiente energía cinética para escapar del potencial del centro de captura. Cuando la temperatura se incrementa, la probabilidad de captura se incrementa de 0 a 1 sobre un intervalo de temperatura de 10 °C a 50 °C. Durante éste intervalo de temperatura una fracción de los portadores de carga encuentra centros de recombinación luminiscentes. De esta manera, la intensidad luminiscente sufre un máximo debido al decrecimiento en la población de los portadores de carga.

Si el cristal tiene más de una especie de captura el proceso puede repetirse. Toda especie de captura en la curva de brillo puede caracterizarse por la temperatura de la máxima emisión de luz (T), la energía de activación (E) (o trayectoria de captura), y la frecuencia de escape (s) o liberación térmica.

La frecuencia de escape, por lo general es de 10^8 seg^{-1} , menor que la frecuencia vibracional del cristal (10^{12} seg^{-1}).

Consideremos un material el cual contiene defectos que aumentan su captura electrónica. El nivel de energía del estado base de esta trampa, es por ejemplo, E, el cual se encuentra por debajo del fondo de la banda de conducción. Una trampa puede, además, tener varios estados excitados. Para algún tiempo dado t, la temperatura del material es T (K) y la captura electrónica contiene n electrones.

La distribución de energía de los electrones dentro de la trampa está descrita por la distribución de Boltzmann y por lo tanto, la probabilidad de que un electrón sea capturado es:

$$P = s \exp(-E/kT). \quad (1.1)$$

Donde k es la constante de Boltzmann y s es un factor de frecuencia asociado con un defecto particular de la red.

La cantidad de electrones liberados de la trampa es:

$$- \frac{dn}{dt} = n s \exp(-E/kT) \quad (1.2)$$

Suponiendo que no hay recaptura de los electrones liberados de sus trampas, pero que todos ellos sufren transiciones termoluminiscentes, la intensidad del brillo termoluminiscente I depende de la cantidad de emisión de fotones y de esta manera la cantidad de liberación de electrones de sus trampas y la razón de arribar a centros luminiscentes es:

$$I = - C \frac{dn}{dt} = C n s \exp(-E/kT) \quad (1.3)$$

Donde C es una constante relacionada a la eficiencia luminiscente.

Si el material es calentado uniformemente en una razón:

$$R = \frac{dT}{dt} \quad (1.4)$$

entonces

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dn}{dT} \cdot \frac{dT}{dt} = R \cdot \frac{dn}{dT} \quad (1.5)$$

Sustituyendo en la ecuación (1.2):

$$\frac{dn}{dT} = - \frac{1}{R} ns \exp(-E/kT) \quad (1.6)$$

o

$$\frac{dn}{n} = - \frac{s}{R} \exp(-E/kT) dT$$

integrando da como resultado:

$$\ln \frac{n}{n_0} = - \int_{T_0}^T \frac{1}{R} s \exp(-E/kT) dT \quad (1.7)$$

donde n_0 es el número de electrones presente en la trampa al tiempo t_0 y temperatura T_0 .

Finalmente, sustituyendo para n en la ecuación (1.3):

$$I = n_0 C \exp - \int_{T_0}^T \frac{1}{R} s \exp(-E/kT) dT s \exp(-E/kT) \quad (1.8)$$

Esta es la expresión para la intensidad de brillo I de la captura de electrones a un nivel de captura $E^{[13]}$.

La gráfica de I contra T es nombrada la curva de brillo y en el caso idealizado de un nivel de captura particular, puede tomar la figura de algunas de las curvas calculadas mostradas en la figura 1.7.

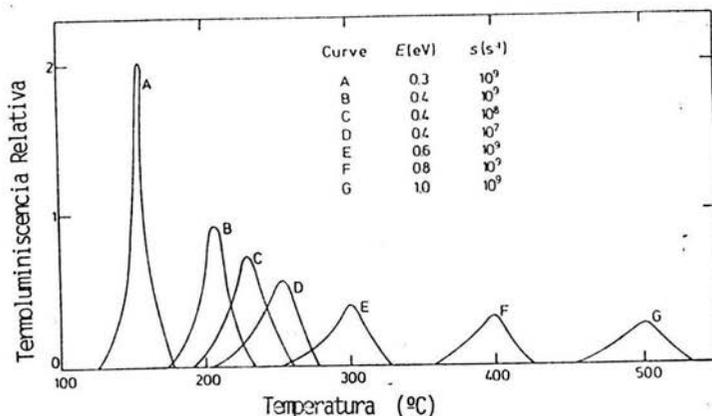


Figura 1.7. Curvas de brillo teóricas de fósforos con una profundidad particular de captura E y factor de frecuencia s.

Inicialmente, para valores bajos de T las curvas aumentan exponencialmente y después alcanzan un máximo—el pico de brillo—y decaen a cero. Al aumentar el valor de E y disminuir el valor de s, la altura es la temperatura del pico máximo en la curva de brillo, y por lo tanto, el aumento crea una estabilidad térmica de los electrones capturados.

La altura de pico o el área total bajo la curva de brillo puede tomarse como una medida de la exposición de radiación ionizante. El pico de brillo se mueve hacia temperaturas bajas como el valor de R, incrementándose el índice de calentamiento.

El mecanismo teórico discutido está relacionado sólo para capturas electrónicas en un nivel de captura particular. En algunos materiales se presentan niveles de captura diferentes, debido a un defecto particular en la red o defectos muy complejos.

Todo nivel de captura puede aumentar el máximo de la curva de brillo, el cual puede tener o no una resolución durante la lectura. La altura del área y de pico de todo pico de brillo, depende del número de capturas electrónicas asociadas que se presenten. Esto depende del número de defectos en la red y para todos los materiales, del tipo y cantidad de átomos impureza presentes, así como del historial térmico y tratamiento del material.

1.9. Dosimetría UV.

Ciertos materiales termoluminiscentes poseen muy buenas características para emplearse como dosímetros UV. La sensibilidad de estos como detectores directos de UV es baja; por esta razón se trata de sensibilizarlos a la radiación UV, mediante una pre-irradiación con rayos γ y de ⁶⁰Co, por ser fotones de alta energía (1.3, 1.4 a 20-30 keV). Seguida de una irradiación de luz UV, transfiriendo portadores de carga a los estados de captura superficiales, en proporción a la dosis UV aplicada.

De esta manera, para altas temperaturas, la intensidad de uno de los picos en la curva denominada “curva de brillo” de un material TL, decrece proporcionalmente respecto a la dosis UV. Esto es conocido como PTTL (fototransferencia TL). La experimentación ha permitido obtener una técnica de sensibilidad (a través de un tratamiento térmico) para el $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ (Fluoruro de Calcio, activado con disprosio) TLD-200, el cual incrementa la sensibilidad del dosímetro para UV por un factor de 500. La respuesta de pico para éste dosímetro, se encuentra en una longitud de onda de 250 nm, correspondiente a la longitud de onda de luz UV.

El carácter significativo de éste dosímetro, es su sensibilidad a la luz visible, haciéndolo particularmente atractivo para el campo de trabajo donde exista radiación de luz solar.

Sin embargo, si la distancia espectral de una superficie UV (esto es, un haz de intensidad relativa a la longitud de onda) se conoce, es posible normalizar la dosis de radiación.

Generalmente, la respuesta para la detección de rayos UV de los dosímetros con materiales TL es de dos tipos^[14].

a) El brillo puede ser estimulado, iluminando el dosímetro con luz UV, previamente irradiado con radiación ionizante.

b) Puesto que las longitudes de onda UV no son lo bastante energéticas para causar ionización banda a banda, el mecanismo responsable para la producción TL se debe a la creación de excitaciones, con un subsecuente decaimiento de electrones y huecos.

Muy a menudo la iluminación no solo induce picos brillosos, sino también los disminuye. Esto puede interpretarse como, la liberación de carga de las capturas o centros de recombinación.

Por otra parte, se miden los espectros de emisión para confirmar que todos los picos de brillo sean del mismo centro de recombinación; es decir, de la misma longitud de onda.

En el LiF, la TL del pico principal (pico 5) puede re-excitarse, mediante la iluminación con luz UV de diferentes longitudes de onda (figura 1.8), esto provoca fototransferencia de carga del pico más estable.

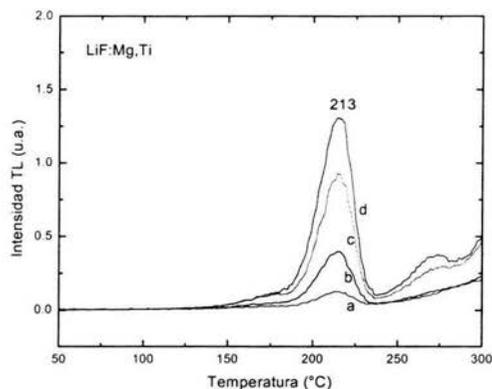


Figura 1.8. Curva de brillo del LiF expuesto a luz UV. - 5 minutos, - 30 minutos, - 60 minutos, - 120 minutos^[15].

El tamaño del pico excitado que se obtuvo en este trabajo de tesis, y que se discute más adelante^[15], es proporcional a la dosis absorbida. De esta manera, la foto transferencia proporciona al LiF la facilidad para reproducir su señal. Además, su eficiencia puede incrementarse, elevando la temperatura 80 °C.

(b) Aparte de la fototransferencia, se puede utilizar un foto estímulo luminiscente para estimar la dosis. Ópticamente, la luz UV libera carga de las trampas profundas, en lugar de leer la fototransferencia TL. Así, la intensidad luminiscente, es el resultado de la recombinación de los electrones liberados en los sitios luminiscentes. Para una exposición UV, la intensidad luminiscente es proporcional a la dosis original impartida.

c) Para el LiF, en el procedimiento de sensibilización UV se puede fijar una reestimación, ya que las capturas vacías debidas a la exposición UV no son las mismas.

CAPITULO 2. EL TLD-100.

2.1. Introducción.

El Fluoruro de Litio (LiF) es un halogenuro alcalino con una densidad de 2.64 g cm^{-3} y número atómico efectivo $Z_{\text{eff}} = 8.2^{[16]}$. El LiF consiste de dos redes ínter penetrables fcc, una para iones de Li^+ y otra para iones de F^- (Fig. 2.1). Los defectos termodinámicos consisten de defectos Schottky (pares de vacancias de Li^+ y F^-) y defectos Frenkel (pares vacancia - intersticial de Li^+ o F^-), aunque estos últimos predominan para altas temperaturas.

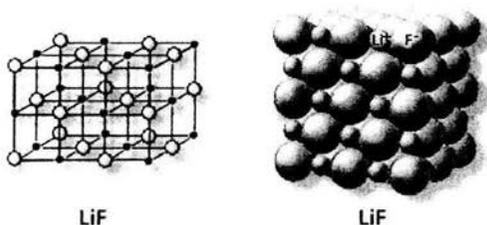


Fig. 2.1. Estructura cristalina del LiF.

Los activadores o dopantes más comunes del LiF-TLD son el Mg y el Ti, y sus propiedades TL dependen de los métodos de preparación. Este se conoce como TLD-100.

El TLD-100 contiene Li en su abundancia isotópica natural (7.5% de ^6Li y 92.5% de ^7Li). Las muestras enriquecidas con ^6Li (95.6% de ^6Li y 4.4% de ^7Li) o ^7Li (99.93% de ^7Li y 0.07% de ^6Li) se encuentran disponibles, como es una versión de Na estabilizado hecho con 200 ppm de fluoruro de magnesio y 1-2% de fluoruro de sodio.

Existen varios informes sobre la composición del TLD-100, Cameron y Rossiter coinciden en señalar que existen 200 ppmw (partes por millón en peso) de Mg y 15 ppmw de Ti. Edelman consideró que la combinación óptima es de 0.0013 mol % de Ti, en tanto que para Harshaw Chemical Company (fabricante del TLD-100) es de 100 ppma (partes por millón atómicas) de Mg y 5 ppma de $\text{Ti}^{[17]}$.

Los dosímetros de LiF: Mg, Ti se encuentran en varias formas físicas, incluyendo los cristales simples, los de varillas, los chips, el polvo o los discos impregnados PTFE (teflón TM).

La forma más popular probablemente son los cristales de $3.2 \times 3.2 \times 0.9 \text{ mm}^3$. El uso de polvos es raro en la dosimetría personal debido a la dificultad en la rutina de automatización y procedimientos manuales.

Los materiales más sensibles de LiF: Mg: Ti se obtienen con aproximadamente 180 ppm de Mg^{2+} y 10 ppm de Ti^{4+} . Los más simples contienen algunas ppm de iones OH^- y una impureza adicional.

El LiF-TLD pertenece a la familia de los materiales TL que muy a menudo poseen propiedades muy interesantes, tales como: linealidad, estabilidad y reproducibilidad, etc.

Las curvas de brillo (intensidad de la señal TL vs. tiempo o temperatura) del LiF: Mg, Ti; consiste en un gran número de picos cortos y extensos, donde todo pico en principio, corresponde a una o más capturas TL. En general, la estructura y cinética de la curva de brillo del LiF: Mg, Ti revela 10 picos arriba de la temperatura ambiente. El número de identificación y temperatura nominal de pico para una cantidad de calor desde la temperatura ambiente hasta los 300 °C es: 1 (62), 2 (94), 3 (173), 4 (170), 5 (190), 6 (235), 7 (260), 8 (285), 9 (315), 10 (345) y 11 (370)^[18] Fig. 2.2. Estas indicaciones, se utilizarán como referencia para distinguir los picos de brillo obtenidos en este trabajo de tesis.

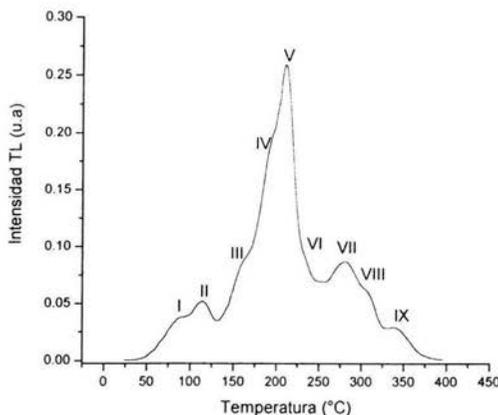


Figura 2.2. Curva de brillo del LiF: Mg, Ti, mostrando su número de Identificación para cada emisión, así como la región de temperatura en que se encuentran.

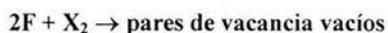
2.2 Termoluminiscencia del LiF: Mg,Ti.

En gran medida el tipo más popular de experimentos de termoluminiscencia en los halogenuros alcalinos es producir una curva de brillo seguida de una irradiación a temperatura ambiente. En esta temperatura, todos los defectos discutidos hasta ahora son inestables, dando como resultado que la termoluminiscencia presente un nuevo sistema entero de procesos de la recombinación de carga. La naturaleza de la curva de brillo en los halogenuros alcalinos sobre la temperatura ambiente ha sido un tema intenso de discusión por muchos años.

De las interpretaciones tempranas se ha tomado más el punto de vista de que los procesos de recombinación implican un movimiento convencional electrón y hueco. Los centros F están implicados íntimamente en la producción de la termoluminiscencia, pero su papel exacto ha sido centro de mucha discusión y conjetura. Se ha sugerido que los picos de brillo resultan de la liberación térmica de huecos de diversas clases de trampas, los cuales recombinan con los electrones en los centros F.

Se ha discutido la posibilidad de que el electrón liberado de los centros F se recombina con los huecos atrapados en los sitios luminiscentes. Se ha remitido la posibilidad de que existe una única trampa y rango en los diversos sitios de recombinación. La implicación de intersticiales en el proceso termoluminiscente es difícil de negar dado que algunos picos de brillo no se pueden observar debido al coloreo de halogenuros alcalinos adicionales (Jain y Mehendru, 1970; Ausin y Alvarez Rivas, 1974), pero su papel exacto no es fácil de confirmar. A temperatura ambiente, los intersticiales se mueven dando por resultado la formación de grandes racimos de intersticiales.

Durante el calentamiento seguido de irradiación el centro de F y las bandas de absorción desaparecen en las temperaturas de hasta 550 K. Hughes (1978) propone el siguiente tipo de reacción para este recocido:



Así, la reacción deja al cristal con pares de vacancias y lazos de dislocación vacíos. Para temperaturas mucho más altas (600-700K) los lazos de la dislocación aniquilan los pares de vacancias, de manera que:



De esta manera, la recuperación completa se termina.

Desde el punto de vista termoluminiscente es importante notar que el área total bajo la curva de brillo de una muestra irradiada a temperatura ambiente es directamente proporcional a la concentración de centros F. De esta manera, la recombinación de los centros de F y de los átomos del halógeno es una fuente plausible de la emisión termoluminiscente, así la forma precisa de la curva de brillo depende fuertemente de la dosis recibida. De ahí que se crea que los diversos picos son resultado de la liberación de átomos halógenos más grandes, limitando más firmemente los agregados (Ang y Mykura, 1977). La cinética de muchos de los picos parece ser de primer orden, pero algunos de los picos de alta temperatura no se conforman con el comportamiento de primer orden. Una estimación de las energías de activación se obtiene de las curvas de decaimiento isotérmico, pero existe una dificultad en los valores obtenidos debido a la complejidad en las formas de las curvas de brillo.

2.3. Mecanismo Termoluminiscente.

El papel de los iones de Magnesio.

Si el LiF: Mg: Ti es sometido a un horneado de pre-irradiación de 400°C (horneado estándar del fósforo a 1 hora) y enfriado rápidamente a temperatura ambiente normal, la curva de brillo resultante después de la irradiación contiene al menos seis picos de brillo entre la temperatura ambiente normal y los 300°C, como se ilustra en la figura 2.2.

Por conveniencia, estos picos se nombran: 1 (60°C), 2 (120°C), 3 (170°C), 4 (190°C), 5 (210°C), y 6 (285°C). La lectura precisa de la temperatura y la resolución de todo pico, depende del índice de calentamiento empleado^[18]. El pico 5 normalmente se usa para prácticas dosimétricas.

Los picos de baja temperatura normalmente exhiben alto fading o pérdida de señal durante su almacenamiento a temperatura ambiente normal; la vida media de todo pico a temperatura ambiente normal se muestra en la figura 2.3. Sin embargo, es posible reducir el número de capturas electrónicas con la cual están asociados los picos de baja temperatura debido a un horneado térmico del material de 1 a 2 horas a 100°C o de 16 a 24 horas a 80°C antes de la irradiación. Este procedimiento da como resultado una curva de brillo mucho más satisfactoria, como la que se muestra en la figura 2.3. Los iones de Magnesio presumiblemente forman capturas electrónicas en combinación con ciertos centros de defecto en la red. La influencia del Titanio en los procesos de captura es incierta y su papel es fundamental en la formación de centros de recombinación luminiscente.

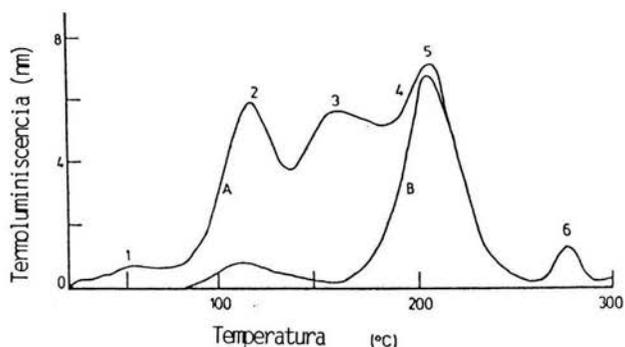


Figura 2.3. Curvas de brillo por el LiF: Mg: Ti (TLD-100) horneados durante 1 hora a 400°C seguido por: A, un enfriamiento (10^3C min^{-1}) a temperatura ambiente normal; B, 16 horas de horneado a 80°C, seguido de una irradiación. También se muestra el valor aproximado de la vida media de todo pico (Mason *et al* 1976).

El ión de Magnesio divalente (Mg^{2+}) que se introduce dentro de la red consiste de una serie de iones de Litio monovalente (Li^+) y Fluoruro (F^-). La sustitución de un ion de Li^+ por un ion de Mg^{2+} da como resultado un exceso de carga positiva en algún sitio de la red. La atracción Coulombiana da como resultado la formación de pares de vecinos cercanos (dipolos), los cuales consisten de un ion sustitucional de Mg^{2+} en combinación con una vacancia ion de $Li^{+10,16}$. Bajo ciertas condiciones térmicas los dipolos son vistos como agregados, formando dimeros, trímeros y complejos de alto orden. Existe la evidencia de que un ordenamiento dipolar está asociado con los centros de captura electrónica responsables de los picos de baja temperatura 2 y 3. Los complejos dipolares están asociados con los principales picos de brillo dosimétricos 4 y 5.

La agregación de dipolo simples para formar complejos depende críticamente de la temperatura, el calor y de la velocidad de enfriamiento. Los dipolos eléctricamente neutros en la red y los centros de captura electrónica son afines modificando los centros F tales como un dipolo en la proximidad de una vacancia ion de fluoruro ^[19]. Este modelo de captura sirve para explicar los cambios en las alturas relativas de las curvas de brillo debido a un horneado de pre-irradiación de la muestra.

El horneado térmico estándar de pre-irradiación del cristal TLD-100 a 400°C seguido de un enfriamiento a temperatura ambiente normal, produce una curva de brillo con seis picos dentro del rango de temperatura, desde la temperatura ambiente normal hasta los 300°C. En realidad esto es verdadero para alguna temperatura de horneado de aproximadamente por encima de los 180°C. Cuando se incrementa la temperatura de horneado, los complejos simples tales como los dimeros y trímeros se descomponen en dipolos, produciendo grandes picos relativos 2 y 3 ^[20].

Si el material es horneado a una temperatura $\leq 100^\circ C$, tales como para 1 o 2 horas a 100°C o de 16 a 24 horas a 80°C. ocurre una agregación que intensifica los picos de dosimetría principal 4 y 5 a costa de los picos de baja temperatura. De esta manera, la evidencia de la agregación examina el efecto de la curva de brillo que produce un índice de enfriamiento desde los 400°C hasta la temperatura ambiente normal. Si éste es enfriado rápidamente un cierto número de centros de captura asociados son “congelados” dentro de la red, dando como resultado un aumento relativo del pico 2.

Una velocidad de enfriamiento lento (dentro del horno) produce una agregación con aumentos relativos en los picos 4 y 5; produciendo, además, la formación de complejos de orden alto, la precipitación del Mg^{2+10} y una reducción de los picos 4 y 5. A temperatura ambiente, la energía libre del cristal se reduce debido a la asociación de dipolos en grupos de orden mayor, los más importantes son los trímeros, los cuales consisten de tres dipolos en el grupo ^[20].

Un horneado de 400°C por 1 h da lugar a que la mayoría del magnesio se presente en forma de dipolos $Mg-Li_{vac}$. Un horneado subsecuente de 80°C por 24 h, establece un nuevo equilibrio en el cual el magnesio se encuentra en forma de trímeros ^[21]. Una alta sensibilidad TL para este material requiere que el magnesio esté en la forma de trímeros, así la precipitación del magnesio da lugar a la reducción de la sensibilidad TL durante su almacenamiento a temperatura ambiente.

La velocidad de enfriamiento preescrito en la temperatura de horneado es un parámetro muy importante. La TL es sensible a los defectos de equilibrio y diferentes velocidades de enfriamiento, los cuales aseguran que existen diferentes concentraciones de equilibrio en los grupos y precipitados del Mg que pueden obtenerse después de los períodos de recocido. Las reacciones de estado sólido que involucran lo anterior e ignorando la formación de grupos de orden mayor, pueden resumirse en:



Actualmente los defectos de equilibrio son considerados más complejos que los mostrados por la ecuación anterior, puesto que, más de una especie del grupo existe incluyendo varias especies de trímeros, Ti y OH, que forman complejos con los defectos del Mg, los cuales deben ser incluidos en las reacciones. Sin embargo, la ecuación [1] es suficiente para describir los procesos fundamentales. En general, una velocidad de enfriamiento lento acentúa los productos de la derecha de la reacción [1], mientras que una velocidad de enfriamiento rápido acentúa los productos del lado izquierdo de [1], dependiendo de la temperatura con la cual la muestra esté siendo enfiada^[22].

El papel del Titanio y los iones de Hidroxido.

La presencia del Titanio en combinación con los iones de hidróxido es un prerequisite para la emisión eficiente de termo luminiscencia en el LiF. Todo material cristalino crece bajo aire desde el fundido, el cual contiene iones OH en concentraciones de varias partes por millón. La sensibilidad termoluminiscente del LiF: Mg: Ti muestra un incremento cuando se aumenta la concentración de iones de titanio presentes con un contenido máximo de 7 ppm según lo sugerido por Rossiter. Cuando existen grandes concentraciones de titanio, aparece la sensibilidad termo luminiscente, la cual es controlada por la concentración de iones de OH y viceversa (Vora *et al* y Rossiter *et al*). Los resultados de los experimentos de conductividad iónica, indican que el titanio puede presentarse en su estado divalente Ti^{2+} , posiblemente formando vacancias dipolares $\text{Ti}^{2+}-\text{Li}^+$ de una manera similar al Mg^{2+} . Cuando aparece la concentración de titanio cambia la figura de los picos de brillo y esto puede involucrar de una manera desconocida la formación de centros de captura electrónica (Niewiadomski).

El titanio entra en la red de LiF sustituyendo al Li^+ en estados de Ti^{3+} o Ti^{4+} . La compensación de carga ocurre de varias maneras. Un ejemplo, existe en los complejos de $\text{Ti}^{4+}(\text{O}^{2-})_3$ basados en los resultados de la implantación de iones^[26], la formación de los complejos de TiOH_n se encuentra en base a la absorción infrarroja y los datos de conductividad iónica^[22] y estos complejos se ha demostrado son los responsables de la absorción de 200 nm la cuál produce la emisión de 3,01 eV (412 nm) para este material^[22]. Los iones del OH también se agrupan con el Mg para formar complejos de MgOH_m ^[23]. Tales complejos reducen la emisión TL de este material, probablemente por la formación de centros que compiten con los centros TL^[23]. De esta manera, los iones de OH desempeñan un papel muy conflictivo, dado que, ellos forman complejos esenciales de TiOH_n para la luminiscencia pero también forman complejos de MgOH_m .

Las concentraciones óptimas de Mg y Ti para una sensibilidad máxima dependen de la concentración OH. Para los especímenes bajos de OH, las concentraciones de Mg y Ti parecen ser de 120 ppm y 10 – 12 ppm^[24].

La irradiación del LiF: Mg, Ti produce varios centros debidos a la radiación inducida, la mayoría de los cuales se asocian a los defectos conocidos. La identidad exacta de estos defectos ha sido y sigue siendo tema de discusión considerable. Sin embargo, las correlaciones se han hecho claras entre las bandas de absorción particulares que aparecen después de la irradiación y de ciertos picos TL^[25]. El resultado de estas correlaciones es que los centros de captura responsables del pico principal de dosimetría en este material, ha sido identificado como un trímero Mg-Li_{vac}. Similarmente, se cree que el pico 2 TL está asociado con los dipolos de Mg-Li_{vac}. En cada uno de estos tipos de defecto se cree que el defecto está relacionado con el Mg y esta espacialmente correlacionado con los complejos de TiOH_n los cuales actúan como sitios luminiscentes. Esta noción tiene un poderoso alcance sobre varias características dosimétricas del LiF: Mg, Ti. Se sabe que un pico TL ≈ 400°C (pico 10) se relaciona con los centros Z₃^[25]. Sin embargo, esta asignación ha sido desafiada por Nepomnyashchikh et al^[26] quien afirma que el defecto en cuestión es realmente una impureza de Mg⁰ en un sitio del anión asociado a dos vacancias del catión vecino. Finalmente, nótese que los centros V también están implicados en la producción TL en la región del pico 5.

Aunque los defectos principales toman parte en los procesos de producción TL en el LiF: Mg, Ti, se ha identificado la secuencia exacta de la liberación de carga del electrón y del hueco, además de la emisión del fotón que sigue siendo una cuestión de especulación y debate. Mayhugh^[27] propuso un modelo, modificado más adelante por Cooke y Rodees^[35], en el cual, los electrones son capturados en los defectos del Mg (dipolos, trímeros) convirtiendo los iones de Mg²⁺ en Mg⁺. Cuando se calienta, los electrones son liberados y se recombinan con los huecos en los centros V₃, formando los centros (inestables) transitorios V_k. Los últimos centros inmediatamente liberan un hueco que se recombinan con los electrones en un sitio TiOH_n, haciendo que los electrones hagan un túnel con los centros F más próximos. Este modelo algo complejo, contradice lo dicho por Sagastibelza y Alvarez-Rivas^[28] quienes sugirieron una recombinación F_z-H, y no la recombinación electrón-hueco, es el proceso de luz emitida. Los datos realizados por Lakshmanan et al^[36] señalan a un punto intermedio entre estos modelos, que conducen a estos últimos autores a sugerir que el pico principal de dosimetría (pico 5) es causado por la recombinación de los centros F, de una manera similar al modelo de Mayhugh, mientras que el pico 10 es causado por un modelo de recombinación vacancia-intersticial, de acuerdo con las ideas de Sagastibelza y de Alvarez-Rivas.

2.4. Composición de impurezas en la curva de brillo para el LiF.

El dopante Mg²⁺ y el Ti líquido están estrechamente relacionados con las propiedades de captura. Experimentos de cristales, para muestras activadas sólo con Mg no existe una distribución uniforme de eficiencia TL dentro del cristal. Por otra parte, la eficiencia TL está relacionada con el gradiente de concentración de Ti a lo largo del cristal. El Ti no sólo incrementa el número de centros luminiscentes en el TLD-100, sino, además,

se estabilizan ciertas propiedades contra dopantes accidentales. Al irradiar al Ti, éste se encuentra en un estado trivalente, desplazándose de 0.2 a 0.3 Å en la dirección <111> para un sitio local, además de existir tres iones de F muy cercanos a esa vecindad, que son probablemente reemplazados por otros con una compensación de carga O²⁻. Después de liberar TL u hornearse a 300 °C, la estructura (Ti³⁺ F₃ O²⁻) no es estable, probablemente los iones impuros de Ti se incorporan dentro del oxígeno, formando diferentes complejos (complex) que no participan en la emisión TL. El crecimiento en aire y vacío, del LiF variando el Ti, permite que a menor distancia la luz se emita desde el material. De esta manera, se afirma que el oxígeno es un componente necesario. Es difícil medir los iones de oxígeno, titanio y la eficiencia TL, debido al gran número de posibles complejos alternos, y de otras impurezas y defectos, que en un momento determinado generan una regla competitiva y asociativa.

La complejidad de los mecanismos de captura y luminiscencia pueden quedar ilustrados al observar 13 picos (con estructuras de captura diferentes) y 10 diferentes bandas de emisión (con diferentes centros de recombinación) para varios niveles de dosis, en el LiF-TLD. Conforme a los datos obtenidos para los experimentos de crecimiento de cristales, se ha encontrado que la implantación de iones de oxígeno provoca que una parte del Ti se localice dentro de los centros luminiscentes. La ventaja en la implantación es que el efecto del oxígeno es indistinto de cambios estructurales inducidos térmicamente. La distribución del coeficiente de absorción óptica del Ti liberado en una banda de 200 nm en un cristal simple, se debe a una combinación de titanio e Hidróxido. Las medidas de conductividad iónica y de absorción infrarroja en cristales activados, indican que los iones de Ti pueden interactuar, probablemente con varios iones de hidróxido para formar combinaciones. La asociación de los iones de hidróxido es muy fuerte comparada con la de iones de Ti y Mg.

2.5. Fading (pérdida de señal) y Horneado.

En el LiF: Mg , Ti el fading térmico (presencia de picos de brillo de baja temperatura o uno simple) a 25 °C es del 5% en un año, mientras que el fading óptico (señal TL falsa) es débil^[29]. El procedimiento de horneado es muy similar en todos los materiales TL y en algunos casos tales como el LiF, es muy crítico, debido a que el procedimiento no es estrictamente el mismo, obteniéndose diferentes resultados para diferentes irradiaciones a la misma exposición. Se puede observar de la literatura que el tratamiento necesario para hornear el LiF (TLD-100) y estabilizar su respuesta es de 1 hr a 400 °C + 24 hrs. a 80 °C (ó 2 hrs. a 100 °C, con una pre-lectura de 10 min. a 100 °C).

2. 6. Dependencia de la cantidad de dosis.

La dependencia de la cantidad de dosis es un requerimiento muy importante que demuestra la posibilidad de usar los detectores TL para medir cerca de instalaciones que liberan fotones de pulsos muy cortos. Esta dependencia en el LiF se produce al exponer el detector a un haz de rayos X que emiten pulsos muy cortos de 10⁻⁷ segundos. Esta dependencia reporta un flujo de 254 nm UV en el intervalo de 10⁻² a 10 Jm⁻²seg⁻¹, excepto para el CaO:Dy y en extensión más pequeña en el MgO.

2.7. Termoluminiscencia Fototransferida.

En el proceso de Fototransferencia los electrones que se encuentran en las trampas profundas son transferidos hacia las trampas superficiales; esto ocurre cuando la muestra se ilumina con luz Ultravioleta (UV). Las trampas superficiales totalmente llenas producen el pico de brillo termoluminiscente que puede blanquearse térmicamente con alguna irradiación UV. Las trampas profundas en el proceso de fototransferencia actúan como donadores y las trampas superficiales como receptores de los portadores. Una característica en los estudios PTTL es que la muestra contiene estados donadores los cuales se producen en los picos TL de alta temperatura (≈ 300 a 500°C), son altamente estables y el fading es despreciable.

Si irradiamos el LiF a una exposición gamma y lo horneamos a una temperatura por debajo de los 400°C , algunas de las trampas de alta temperatura ($> 400^\circ\text{C}$) (trampas residuales) permanecen llenas. Una exposición subsiguiente UV reduce estas trampas y regenera las trampas de baja temperatura. Por lo tanto, se puede observar una reducción en la TL residual (RTL) y una regeneración del blanqueo térmico del pico de brillo TL. De esta manera, es usual suponer que la intensidad del pico de brillo TL de la UV inducida es directamente proporcional recaptura de las trampas donadoras. La grafica de la intensidad del pico de brillo de UV inducida como una función de la energía UV, muestra un máximo que ocurre para una energía E_{opt} , la cual se conoce como profundidad óptica de captura o energía de activación óptica de las trampas donadoras. Esto se muestra en la figura 2.4.

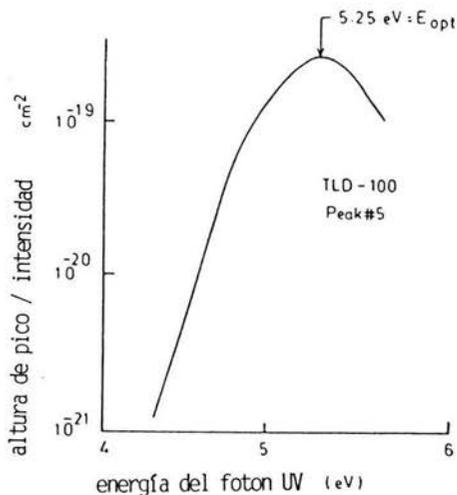


Figura 2.4. Gráfico de la altura del pico de brillo de la UV inducida versus la energía del fotón.

2.8.1 Modelo de Banda para la PTTL.

De los modelos existentes para explicar la luminiscencia fototransferida vía termoluminiscencia, se considera útil para la aclaración de un modelo de banda para la PTTL. De esta manera, una explicación se da refiriéndonos a la figura 2.5:

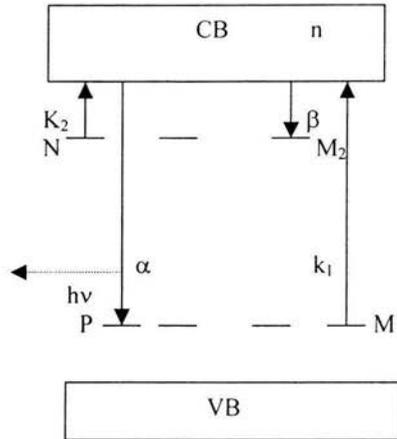


Figura 2.5. Modelo de banda de energía de un fósforo cristalino mostrando fototransferencia de electrones^[30].

Si M_1 es la concentración de los niveles de captura térmicamente estables (existen esencialmente los niveles del activador ocupados por electrones y huecos) y M_2 es la concentración de los niveles de captura superficiales, entonces las transiciones de los portadores desde las trampas profundas hacia las superficiales bajo la influencia de la fotoexcitación están gobernadas por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dn}{dt} = k_1(M_1 - P) + K_2N - \beta n(M_2 - N) - \alpha nP$$

$$\frac{dN}{dT} = -k_2N + \beta n(M_2 - N)$$

$$\frac{dP}{dT} = k_1(M_1 - P) - \alpha nP$$

$$P = N + n \text{ (neutralidad de carga)}$$

Donde:

n = concentración de electrones en la CB.

N = concentración de electrones en los niveles de captura.

P = concentración de huecos en los niveles del activador.

α = probabilidad de recombinación ($\alpha = \sigma_1 u$, donde σ_1 es la sección transversal de captura efectiva de un electrón por un hueco en el nivel activador y u es la velocidad promedio de un electrón de conducción).

β = probabilidad de captura ($\beta = \sigma_2 u$, donde σ_2 es la sección transversal de captura efectiva de un electrón por un hueco en el nivel de captura).

K_2, k_1 = probabilidad de estimulación de un electrón dentro de la banda de conducción desde el nivel de captura o nivel activador.

2.7. Dosimetría UV.

La irradiación de un fósforo TL con radiación UV puede estimular la liberación de portadores de carga (electrones o huecos) de sus centros de captura. Estos portadores de carga liberados son recapturados por las trampas principales dosimétricas como se ilustra en la figura 2.6.

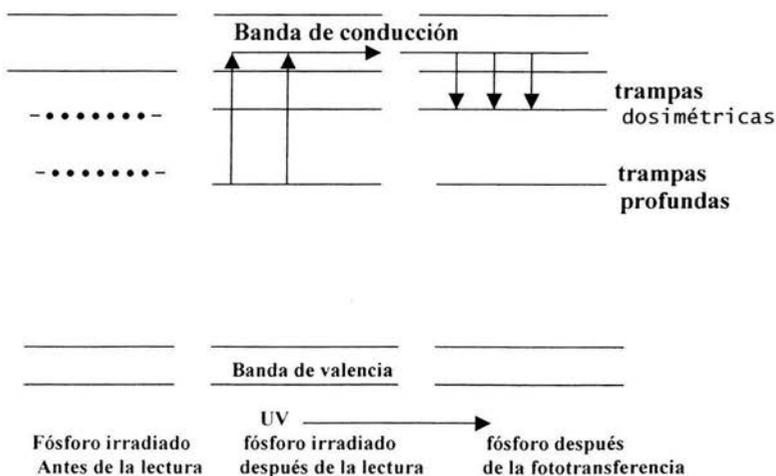


Figura 2.6. Modelo de bandas de energía para la fototransferencia termoluminiscente (PTTL).

En el LiF:Mg:Ti la fototransferencia de recaptura de electrones, se emplea para proveer un reordenamiento de dosis absorbida en un cristal. En un procedimiento normal de lectura seguido de una exposición UV de 254 nm (ver índice) la termoluminiscencia (PTTL) medida está relacionada con la dosis de absorción de radiación original. En el LiF: Mg , Ti la eficiencia de transferencia óptima de electrones de sus trampas más profundas hasta las principales es una función de la exposición radiante total de radiación ultravioleta y de la temperatura, como se muestra en la figura 2.7.

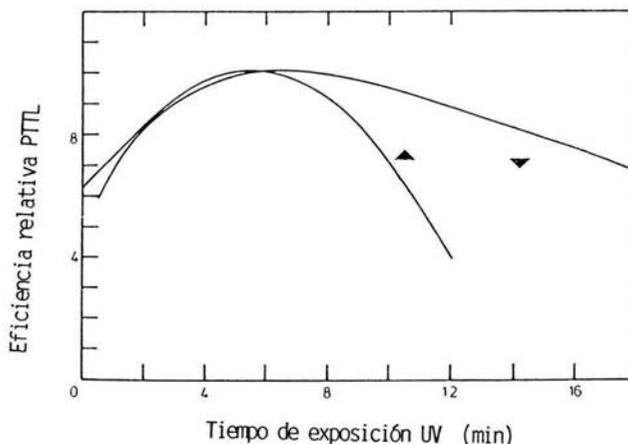


Figura 2.7. dependencia general de la eficiencia PTTL a una exposición UV de 4.0 mWcm^{-2} .

La sensibilidad del LiF a la luz puede ser el resultado de algunos factores tales como: la presencia de apilamientos de impurezas, horneado inadecuado y contenido UV de la luz. Marshall observó que en el LiF-teflón la sensibilidad a la luz se debe al teflón, el cual exhibe una fosforescencia. Mason expuso un LiF virgen (cristal y polvo) a 254 nm de luz UV y obtuvo una señal a los 90°C con una saturación a $2.2 \text{ mg equivalente-gamma}^{[30]}$.

La PTTL en el LiF es investigado en detalle cuando se utilizan diferentes tratamientos de horneado. El intervalo de temperatura empleado va desde los 280 a los 350°C , con una duración de los 15 minutos a 1 hora. Un pico residual TL cercano a los 390°C , permanece después de 15 minutos de horneado a 350°C , generando PTTL por la exposición a 254 nm (ver apéndice) de UV. La repoblación UV que ocupa todos los picos de baja temperatura (excepto en número 4) depende de λ . La respuesta PTTL del pico 5 sigue una respuesta gamma, la cual es lineal en un principio y después supralineal, saturándose a la misma dosis de irradiación original, a diferencia del pico residual que es supralineal desde dosis bajas. Sin embargo, la PTTL observa para niveles de dosis mucho muy debajo de la detección de umbral de la RTL. Existe una linealidad arriba de los 6 mJ cm^{-2} que es independiente de la intensidad UV entre 0.1 a 50 mw cm^{-2} . Además, se presenta un incremento del 23% en la sensibilidad, si la temperatura (durante la PTTL) se incrementa desde la temperatura residual de 150°C .

CAPITULO 3. PROPIEDADES DOSIMETRICAS^[31].

3.1. Respuesta de dosis.

La respuesta de dosis del LiF: Mg, Ti es lineal hasta 1 Gy, toma la forma supralineal hasta 10^3 Gy donde comienza la sublinealidad. El principio y grado de la Supralinealidad en el LiF: Mg, Ti depende de la variedad del material y de los factores experimentales^[32]. Estos factores incluyen: La transferencia de energía lineal (LET)^[33], temperatura de la curva de brillo^[33], material^[34], razón de calentamiento y posiblemente el tratamiento térmico^[35]. Las causas de la Supralinealidad se deben a competencias durante el calentamiento (lectura) y a la dependencia del LET (transferencia de energía lineal). La respuesta de dosis TL o índice de Supralinealidad se define como:

$$f(D) = \frac{F(D)/D}{F(D_1)/D_1}$$

donde $F(D)$ es la intensidad TL para una dosis D y $F(D_1)$ es la intensidad TL a dosis baja, D_1 donde la respuesta se supone que es lineal. Para el rango lineal $f(D) = 1$. En la región supralineal $f(D) > 1$ y en la región de saturación $f(D) < 1$. La figura 3.1 muestra los valores medidos de $f(D)$ del LiF: Mg, Ti para una irradiación con ^{60}Co a diferentes profundidades en plástico-agua^[35]

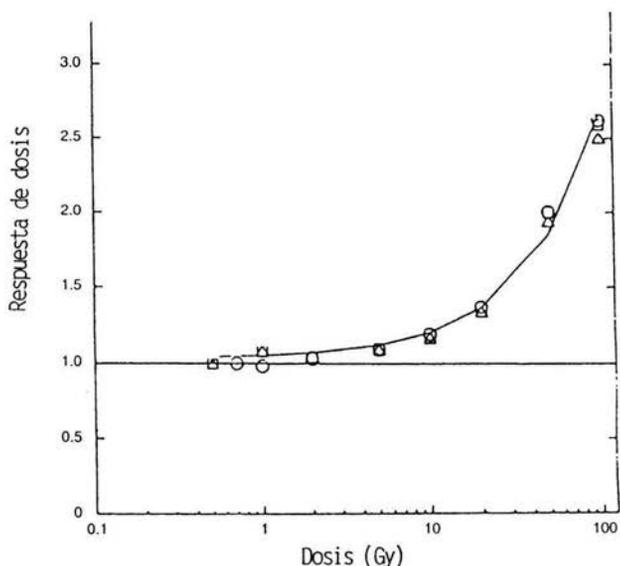


Figura 3.1. Curva de respuesta de dosis del LiF: Mg, Ti irradiado con gammas de ^{60}Co a profundidades de 0 cm (O), $d_{\text{máx.}}$ (□) y 15 cm (Δ).

La TL en función de la dosis en la región supralineal se puede aproximar por una función cuadrática^[36]:

$$F(D) = aD + bD^2$$

Donde $F(D)$ es la salida de luz, D es la dosis y a y b son constantes. Esta ecuación se puede escribir en la forma:

$$F(D) = A + BD$$

Donde $A = aD$ y $B = bD$. De esta manera al aplicar las correcciones de Supralinealidad la respuesta de TL es:

$$\frac{F(D)/D}{K} = A + BD$$

donde $K = F(D_1) / D_1$ es el factor de calibración de dosis baja. Si $A = 1$ se tiene:

$$D = \frac{F(D)}{K(1 + BD)}$$

lo cual se puede aproximar usando series de Taylor:

$$(1 + X)^{-1} \approx 1 - X$$

la cual es válida cuando $-1 < BD < 1$. La dosis máxima para que esta aproximación sea aplicable es 65 Gy. Usando la aproximación de Taylor esto se simplifica:

$$D = \frac{F(D)(1 - BD)}{K}$$

Resolviendo para D :

$$D = D_0(1 + D_0B)^{-1}$$

Donde $D_0 = F(D) / K$ es la medida de dosis sin corregir y D es la dosis seguida de la corrección supralineal.

3.2. Sensibilidad.

La sensibilidad de un material TL puede definirse como la cantidad de luz emitida por el material por unidad de exposición a la radiación, y está determinada por su eficiencia TL intrínseca, la cual representa la proporción de la energía absorbida que se transforma en fotones luminosos. La determinación de este parámetro es muy complicada, ya que depende de: (a) las características del equipo lector, tales como la respuesta espectral del tubo fotomultiplicador (TMF), el coeficiente de amplificación electrónica, etc. y de (b) las características físicas del material, especialmente de su transparencia óptica^[37].

La sensibilidad de un material TL puede incrementarse al introducir algún material en la estructura cristalina del compuesto original, el cual funciona como activador. Por consiguiente, la sensibilidad de un material TL es válida sólo para el equipo y a las condiciones a las cuales se determinó. Generalmente esta propiedad se verifica considerando al TLD-100 como referencia.

3. 3. Respuesta de energía relativa del fotón.

La TL total emitida por un cristal irradiado es proporcional a la energía de radiación total absorbida por éste. El coeficiente de absorción de energía de masa de algún material termoluminiscente puede calcularse por la regla de las mezclas:

$$(\mu_{en} / \rho)_{\text{fósforo}} = \sum_i (\mu_{en} / \rho)_i w_i$$

donde $(\mu_{en} / \rho)_i$ es el coeficiente de absorción de energía de masa del i-ésimo elemento que compone el cristal, y w_i es la fracción del elemento en el material.

El coeficiente de absorción de la energía de masa de algún elemento es una función de la energía del fotón y depende de la absorción principal del fotón y de otros procesos de interacción, tales como el efecto fotoeléctrico, dispersión Compton, producción de pares y (relativamente de menor importancia) la dispersión (elástica) de Rayleigh. Las tablas teóricas de los coeficientes de absorción de energía de masa y las secciones eficaces de interacción del fotón han sido compiladas por varios autores (por ejemplo, Store e Israel 1967). Todos los coeficientes y secciones eficaces dependen del número atómico Z de los átomos y de la energía del fotón $E^{[42]}$. Cuando un material TL consta de átomos de la red básica, más algunos átomos donantes, la absorción simultánea y los procesos de dispersión son muy complejos. La sección eficaz de interacción total del fotón por átomo, σ_{tot} , puede escribirse como:

$$\sigma_{tot} = \sigma_{pe} + \sigma_{cs} + \sigma_{pp}$$

Donde σ_{pe} , σ_{cs} y σ_{pp} son las secciones eficaces de interacción individuales para el efecto fotoeléctrico, dispersión compton y producción de pares. La dependencia aproximada de estas secciones eficaces de interacción como funciones del número atómico Z y la energía del fotón E se muestran en la tabla 3.1.

Procesos	Dependencia aproximada
Efecto fotoeléctrico	σ_{pe} varía como Z^4 para fotones de baja energía. σ_{pe} varía como Z^5 para fotones de alta energía.
Dispersión Compton	σ_{cs} varía como Z.
Producción de pares	σ_{pp} varía como Z^2 (> 1.02 MeV).

Tabla 3.1. Dependencia aproximada de las secciones eficaces de interacción del fotón con el número atómico (Z) del absorbedor.

Para elementos de bajo número atómico y para energías del fotón hasta de 15 eV aproximadamente, el efecto fotoeléctrico es dominante, pero después de los 10 MeV es de suma importancia la dispersión Compton. En el tejido los procesos Compton son muy importantes en el intervalo de energía de aproximadamente $20 - 10^4$ keV. Para elementos de alto número atómico que se dopan con materiales TL, los procesos fotoeléctricos dominan hasta varios cientos de keV. La respuesta de energía del fotón de un fósforo TL puede expresarse de diferentes maneras y comúnmente se emplea un método para comparar la respuesta normalizada del fósforo para una energía particular del fotón, muy a menudo se emplea una energía gamma de ^{60}Co , en aire o tejido ^[38]. La respuesta de energía relativa (RER) del material para una energía E del fotón es:

$$(\text{RER})_E = [(\mu_{\text{en}} / \rho)_{\text{fósforo}} / (\mu_{\text{en}} / \rho)_{\text{aire}}]_E / [(\mu_{\text{en}} / \rho)_{\text{fósforo}} / (\mu_{\text{en}} / \rho)_{\text{aire}}]_{1.25 \text{ MeV}}$$

Si $(\text{RER})_E$ se grafica como función de la energía del fotón, los gráficos del kerma por unidad de exposición se obtienen normalizados a 1.25 MeV. Bajo condiciones de equilibrio electrónico los gráficos son de dosis absorbida por unidad de exposición.

3. 4. Tratamientos térmicos.

La respuesta TL del LiF: Mg, Ti es extremadamente sensible a los tratamientos térmicos^[39].

(i) Horneado a temperatura alta.

El horneado a temperatura alta antes de re-usar el LiF:Mg, Ti tiene dos funciones: (1) Minimiza la señal residual TL vaciando las trampas de alta temperatura (picos 6 – 10); (2) Restaura la sensibilidad y la estructura de la curva de brillo. Las propiedades originales TL se restauran reajustándose a la distribución de defectos responsable de los procesos TL. El procedimiento de horneado de alta temperatura recomendado en el LiF: Mg, Ti es de 400°C durante 1 hora.

Este procedimiento fue sugerido por Daniels y Rieman y confirmado por Cameron et al^[38]. Horowitz recientemente planteó las características de horneado del LiF: Mg, Ti y confirma que la optima temperatura alta de horneado es de 400°C para las distintas versiones modernas de este material. La sensibilidad TL como función de la temperatura de horneado (por 1 hora) se muestra constante dentro del intervalo de 360 a 440°C. Estos resultados son consistentes con el mecanismo TL en este material y demuestran que el control preciso de temperatura no es un factor crítico.

Se ha demostrado que el tiempo de horneado a 400°C no tiene un efecto significativo en la sensibilidad. El pequeño incremento en las curvas obtenidas dentro de los 400 y 125°C se deben al crecimiento del pico I.

Se observan cambios significativos en la forma de la figura de la curva de brillo^[37] y la sensibilidad^[38] para temperaturas de horneado o tiempos mucho mayores de los recomendados. El cambio en la sensibilidad y forma de la curva de brillo como resultado del horneado a 400°C por más de 48 horas son irreversibles (esto es, estos no pueden ser removidos por el horneado estándar). Horowitz ha sugerido que los resultados anteriores no son consistentes. Sin embargo, su observación es que el rango de temperatura de 350 – 450°C en ambas figuras son consistentes y demuestran que no existen cambios significativos en la sensibilidad.

El decrecimiento en la sensibilidad para una temperatura baja de horneado es un resultado de los cambios en la sensibilidad relativa de varios de los picos como función del tiempo y la temperatura. Se ha observado un incremento en las intensidades de los picos de baja temperatura (I – III) con respecto al tiempo de horneado a 175°C, mientras que las intensidades de los picos dosimétricos (IV y V) decrece. El área total de la curva de brillo para un tiempo de horneado de 1 hora se reduce. Esto se debe al decrecimiento de la intensidad de los picos dosimétricos. Se observa un comportamiento similar para temperaturas de horneado bajas, por debajo de los 110°C. La curva de brillo y la intensidad TL se restauran debido al horneado de 400°C durante 1 hora. El horneado entre 280°C por menos de 24 horas no tiene un efecto significativo en la intensidad TL o forma de la curva de brillo si la dosis es menor 1 que 1 kGy.

Para niveles de dosis alta por arriba de 1 Gy, la temperatura de horneado no puede ser más baja de 400°C. Un incremento del 10% en la sensibilidad seguido a una exposición de 2 Gy se puede observar para un horneado de 300°C durante 1 hora^[25].

Las propiedades TL dependen de la velocidad de enfriamiento seguido de un horneado a temperatura alta^[36]. Se observa un decrecimiento en la sensibilidad junto con un decrecimiento en la velocidad de enfriamiento. La sensibilidad es independiente de velocidades de enfriamiento mayores de 100°C min⁻¹. (El enfriamiento en aire normal se encuentra dentro del rango de 50 a 100°C min⁻¹). La forma de la curva de brillo depende de la velocidad de enfriamiento. La contribución relativa de los picos de baja temperatura decrecen cuando decrece la velocidad de enfriamiento.

(ii) Horneado de baja temperatura.

El propósito del horneado de baja temperatura es reducir el fading y minimizar la contribución de los picos de baja temperatura (I – III). El Horneado de pre-irradiación estándar de baja temperatura en el LiF: Mg, Ti es de 24 horas a 80°C. Este procedimiento de horneado fue descubierto cuando una muestra de LiF: Mg, Ti fue dejada dentro de un horno toda la noche^[37]. La eficiencia de este horneado reduce la contribución de los picos de baja temperatura. Notando que después de 24 horas, se eliminan los picos I, II y III. De esta manera, el “hombro” correspondiente al pico IV es menos pronunciado, indicando que la intensidad del pico IV se ve afectada. La diferencia existente en la curva de brillo entre 7 y 24 horas a 80°C es muy pequeña. No existe una ventaja, para tiempos de horneado mayores de 10 horas^[36].

Un horneado de pre-irradiación a temperatura baja es de 2 horas a 100°C. Este procedimiento es capaz de alcanzar resultados semejantes a los resultados encontrados para hornos de 24 horas a 80°C, por lo cual es más conveniente. Otro procedimiento de horneado para temperaturas bajas es de 10 minutos a 100°C para un horneado de post-irradiación. Aunque este procedimiento tiene la ventaja de utilizar menos tiempo, requiere de un control preciso de los parámetros de horneado. Estos parámetros incluyen: Temperatura de horneado, tiempo de horneado y tiempo transcurrido entre el horneado y la lectura.

3.5. Lectura del horneado.

El proceso de lectura TL que incluye el horneado está descrito por una curva que muestra la temperatura en función del tiempo. Este tipo de curva, llamada perfil de temperatura – tiempo (TTP) se muestra en la figura 3.2.

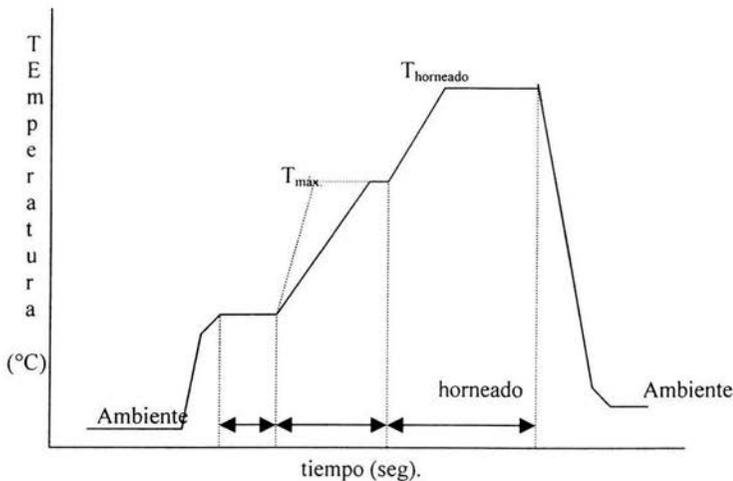


Figura 3.2. Perfil de temperatura – tiempo para un sistema TLD basado en calentamiento lineal.

La TTP comienza con un ciclo de pre-calentamiento el cual reduce los picos de baja temperatura. El pre-calentamiento es seguido por un segmento donde se registra la curva de brillo. El ciclo de lectura finaliza con un ciclo de horneado corto el cual reduce la señal TL residual. Para el LiF: Mg, Ti el ciclo de lectura (incluyendo el pre-calentamiento y el horneado) es menor de 50 seg.

3.6. Temperatura durante la irradiación.

La temperatura durante la irradiación tiene un efecto significativo en la sensibilidad del LiF: Mg, Ti. Sunta et al^[38] muestra un incremento pronunciado en la sensibilidad TL del pico V cuando la irradiación se lleva a cabo a una temperatura de 50 – 130°C. donde los portadores de carga localizados en las trampas de baja temperatura (picos I – III) son liberados durante la irradiación.

Estos portadores de carga liberados son re-capturados por las trampas del pico V y la suma total de la señal TL se asocia con este pico. Cuando la temperatura de irradiación se incrementa por encima de los 135°C, prevalece el fading térmico provocando que la sensibilidad decrezca.

3.7. Fading (pérdida de señal).

Después de exponer un material TL a radiación ionizante, la medida latente de dosis absorbida es el número de electrones que permanecen atrapados en los niveles de captura. La liberación de estos electrones después de la lectura es llamado fading. El fading se debe a la liberación estimulada ópticamente o térmicamente de los electrones o a una combinación de ellos.

CAPITULO 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

4.1. Cristales de LiF:Mg,Ti.

En el presente trabajo se emplean 50 cristales (comerciales) de LiF:Mg:Ti (Harshaw Company) cuyas dimensiones son de 3.2 x 3.2 x 0.9 mm³, con una concentración de 80 – 200 p.p.m (partes por millón) de Mg y 20 p.p.m. de Ti. La diferencia en cada variedad de ellos se debe a la concentración del isótopo de litio (⁶Li: 7.5%, ⁷Li: 92.5%).

4.2. Equipo lector.

El equipo lector empleado fue el convencional, el cual consiste en una fuente controlada de calentamiento (con un tubo fotomultiplicador) y un equipo electrónico asociado, que integra la señal eléctrica que sale del tubo, grificándola después. Estas dos unidades, marca Harshaw modelo 3500, se encuentran integradas entre sí. Procesando los resultados mediante un software.

Para obtener la lectura de la señal termoluminiscente, se deposita el cristal dentro de una plancheta de platino (integrada al equipo lector), para que la luz emitida sea detectada por el tubo fotomultiplicador, el cual convierte la señal luminosa en eléctrica y la amplifica. La señal se integra durante el tiempo total de lectura, desde la temperatura ambiente normal hasta los 400°C, con una velocidad de calentamiento de 2°C/ seg, de manera que se obtiene un valor de la carga eléctrica, que es proporcional a la intensidad de la luz emitida por la muestra.

La carga es igual a la integral de la corriente, o sea, igual al área bajo la curva de brillo obtenida. Cuando se efectúa la lectura de los cristales, es necesario suministrar una atmósfera de Nitrógeno (N₂) al módulo donde se encuentra la plancheta, dado que los cristales se calientan a altas temperaturas y el metal de la plancheta puede reaccionar con el aire y contaminarse. Además de desplazar el aire para evitar su reacción con la plancheta, el N₂ ayuda a filtrar la luz infrarroja emitida por la plancheta al momento de calentarse.

Tanto la señal TL como el número de cuentas fueron digitalizadas por medio de dos canales de una interface RC 232C.

El software ejecuta las siguientes acciones:

- ⊙ Forma las curvas TL, las muestra en la pantalla y las imprime en papel.
- ⊙ Almacena los datos en discos flexibles, necesarios para la deconvolución.
- ⊙ Resta el fondo a una señal para obtener una emisión TL neta.
- ⊙ Calcula la integral de regiones de interés preseleccionadas de la curva TL.

La figura 4.1. muestra un diagrama de bloque del equipo lector.

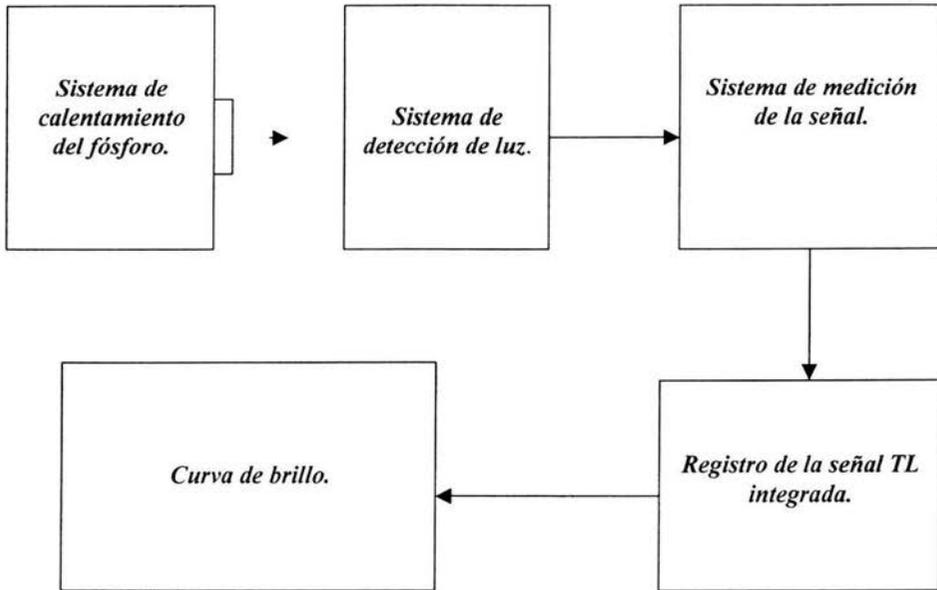


Fig.4.1. Diagrama de bloque del equipo lector.

4.3. Caracterización de los cristales TLD-100.

Para formar un sistema dosimétrico es necesario conocer la respuesta de cada uno de los cristales^[40]. De esta manera, los cristales se someten a un tratamiento térmico, el cual consiste en calentarlos a $400 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 1 hora, (dentro de un horno marca Victoreen, modelo 2600-62 programable en un intervalo de temperaturas que va desde la temperatura ambiente hasta los $800 \pm 1^\circ\text{C}$) seguido de un enfriamiento rápido (a temperatura ambiente) y de un horneado de $80 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 24 horas. Este tratamiento de 400°C permite que las impurezas de Mg se dispersen aleatoriamente dentro del cristal y para mantener el equilibrio de carga, los iones de Mg^{2+} se asocian con una vacancia de Li^+ para formar un dipolo. Este estado de equilibrio se “congela” debido al enfriamiento rápido y el subsecuente horneado de 80°C convierte los dipolos dispersados en grupos de tres (llamados “trímeros”).

Dado que la irradiación genera principalmente una ionización de las impurezas, y con ello permite el almacenamiento de energía mediante la captura de electrones ionizados y huecos generados por la radiación, los cuales al ser liberados por estimulación térmica y recombinarse con los centros luminiscentes producen luz visible. Los cristales fueron irradiados con rayos gamma emitidos por una fuente de ^{60}Co con una dosis de 3 kGy. Todas las irradiaciones fueran llevadas a cabo en el irradiador Gammabeam 65IPT del Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM; el cual cuenta con 9 módulos en los que están colocados 15 lápices de ^{60}C proporcionando una razón de dosis de 6.893 kGy/hr. La calibración del sitio de irradiación se realizó con un lote aparte de LiF: Mg,Ti.

Después de la irradiación se obtienen las curvas de brillo de cada cristal empleando el equipo lector, bajo las siguientes condiciones:

- ◆ Tasa de calentamiento: 2°C s^{-1}
- ◆ Escala de corriente: 10^{-9} A.
- ◆ Periodo de calentamiento: 200 s.
- ◆ Ventana de integración: 0 - 400°C .
- ◆ Filtro de absorbancia con un factor de 5000, dopado con plata para atenuar el haz de luz incidente, con el fin de no dañar el fotomultiplicador.
- ◆ Lectura de fondo: 2.4 nC

Este proceso se repite en 10 ocasiones ($j = 1, 2, \dots, 10$) para cada cristal, despreciando aquellos para los que la variación $L_{i,j}$ fuese superior al 3%. Promediando los 10 valores de las consiguientes irradiaciones a cada detector se le asigna un factor de calibración F_i respecto al valor medido de las lecturas^[40]:

$$F_i = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} \frac{D}{L_{i,j}}$$

Donde $L_{i,j}$ es la lectura del cristal i en la irradiación j ; D es la dosis impartida.

Tras este proceso de caracterización se obtienen 8 pares de cristales con respuestas idénticas bajo las mismas condiciones. A este nuevo grupo de cristales se le asigna un factor de calibración común F tal que a cada cristal por separado se le asocia un factor de sensibilidad f_i : esto viene dado por:

$$F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Fi$$

$$fi = \frac{F}{Fi}$$

siendo N el número de cristales, después de la selección inicial.

Este factor es un valor de referencia válido para todas las lecturas de este grupo de cristales para la energía de ^{60}Co , y su valor es:

$$F = 1.7 \text{ Gy/nC}$$

4.4. Método y caracterización del LiF: Mg, Ti con Luz UV.

La forma de la curva de brillo del LiF: Mg, Ti (TLD-100) es muy sensible a los tratamientos térmicos de pre-irradiación, pues participan en forma determinante los agregados y precipitados de la impureza de Mg. Estos pueden asociarse en forma de impurezas y vacancias que pueden dar lugar a cambios en la estructura del cristal.

los tratamientos térmicos antes de la irradiación menores o iguales a 300°C causan serios efectos en las propiedades TL del LiF: Mg, Ti; especialmente, los tratamientos en la región de temperatura entre $100\text{-}200^\circ\text{C}$ inducen fuertes efectos en la estructura de la curva de brillo de este material. Una de las posibles causas de este efecto es que nuevas estructuras se alcanzan más rápido que otras, seguidas de los periodos de horneado $\leq 100^\circ\text{C}$ o $\geq 200^\circ\text{C}$. De hecho, los cambios en la curva de brillo se atribuyen a los efectos que produce la baja temperatura de horneado de pre-irradiación en la impureza de Mg. Esta situación es descrita por Bos et al. ^[41].

Durante el horneado se da paso a la siguiente reacción ^[5]: $\text{Mg}^{2+} - \text{V}^- \Leftrightarrow \text{dipolos} \Leftrightarrow \text{trímeros} \Leftrightarrow \text{precipitados}$ [1]. El propósito del horneado normal es dirigir la reacción [1] hacia la izquierda, esto es, remover los precipitados los cuales se disuelven aproximadamente arriba de los 300°C ^[42]. De esta manera casi todo el Mg se encuentra en forma de dipolos. El paso final de esta reacción, esto es, la disociación de los precipitados se alcanza durante el horneado a 400°C durante 1 hora.

Para determinar la eficiencia de un procedimiento de horneado particular, la velocidad de enfriamiento de las muestras es un factor crucial seguido de estos periodos de horneado. Durante el enfriamiento, el sistema se reajusta a un nuevo equilibrio. Cuando la reacción [1] se dirige hacia la derecha la concentración final de Mg se encuentra en forma de trímeros y precipitados, lo cual depende de la velocidad de enfriamiento. Para una velocidad lenta de enfriamiento (dentro del horno) ocurre una precipitación substancial, mientras que, para una velocidad rápida de enfriamiento (a temperatura ambiente) la reacción de precipitación se inhibe. Los cambios en la estructura de las curvas de brillo reflejan esta situación.

En el presente trabajo se estudian las emisiones del cristal de LiF: Mg, Ti expuesto a dosis altas y bajas de irradiación gamma, aplicando distintos tratamientos térmicos. Los resultados muestran una fuerte dependencia en las emisiones con respecto a la dosis y temperatura, obteniéndose una buena resolución de todos los picos máximos de las emisiones del cristal.

Para lograr un método y caracterización del LiF: Mg, Ti se procede a dividir el trabajo de tesis en tres partes. Parte I. Emisión Luminiscente del LiF: Mg, Ti sensibilizado a 0.1 y 3 kGy con un tratamiento térmico de 380°C y expuesto a radiación UV. Parte II. Emisión luminiscente del LiF: Mg, Ti para tratamientos térmicos de 120°C, 200°C y 380°C, sensibilizados a dosis de 0.1, 1 y 3 kGy e irradiados con luz UV. Parte III. Emisión luminiscente del LiF: Mg, Ti para diferentes tratamientos térmicos, sensibilizados con 3 kGy e irradiados con Luz UV.

4.5. Sensibilización de los cristales de LiF: Mg, Ti.

Como la respuesta TL depende de la dosis absorbida de irradiación y del tratamiento térmico aplicado, las muestras se someten al horneado estándar de 400°C durante 1 hora seguido de un enfriamiento rápido a temperatura ambiente ($\approx 20^\circ\text{C/s}$). Para guardar condiciones de equilibrio se colocan en placas fabricadas de lucita de 0.5 cm (para obtener un enfriamiento rápido) y en condiciones de oscuridad, más un horneado de 80°C durante 24 horas.

Se irradian con rayos gamma de ^{60}Co con exposiciones de 0.1, 1 y 3 kGy obteniéndose las curvas de brillo correspondientes y los máximos de temperatura en los cuales aparecen cada uno de los picos de brillo. Para distinguir cada una de las curvas obtenidas (llamadas en este caso, curvas de brillo características), las emisiones se comparan con las obtenidas por las curvas mostradas en la literatura^[18]. Para esto se emplea un lector TL Harshaw 3500.

Las lecturas se realizan aplicando una razón de calentamiento lineal de 2°C/s . Las señales se integran desde temperatura ambiente hasta 400°C , con el fin de obtener una mayor resolución de las emisiones. El tiempo entre la irradiación y la lectura fue siempre constante, alrededor de 2 minutos.

Los tratamientos térmicos de pre-irradiación fueron llevados a cabo dentro de un horno eléctrico Thermolyne 47900 cuya sensibilidad a la de temperatura fue de $\pm 1^\circ\text{C}$. Cabe señalar que las dosis y tratamientos térmicos aplicados fueron el resultado de un largo análisis de prueba hasta que se obtuvo respuesta. Los datos obtenidos se procesan con la ayuda del software Glow curve y Origin 6.1.

La figura 4.3 muestra la superposición de las curvas de brillo características del LiF: Mg, Ti para cada exposición. Estas se encontraron experimentalmente siguiendo el protocolo de horneado.

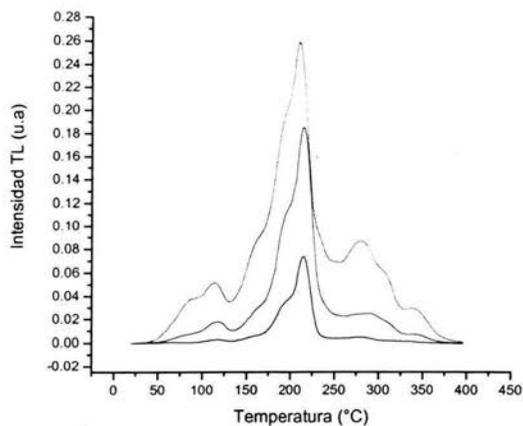


Figura 4.2. Superposición de curvas de brillo del LiF: Mg, Ti Para diferentes exposiciones de radiación gamma - 0.1 kGy, - 1 kGy y - 3 kGy. Tratamiento térmico 400°C por 1 hora más 100°C durante 2 horas.

La tabla 4.1 muestra el máximo de temperatura obtenido para cada pico de brillo obtenido con las diferentes dosis suministradas.

Dosis (kGy)	Pico (T°C)								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
0.1		116	158	196	216		280	328	
1	80	118	162	196	216	240	290	312	345
3	86	113	158	188	210	232	278	308	342

Tabla 4.1. Variación del máximo de temperatura de cada pico de brillo para diferentes dosis de radiación gamma.

4.6. Irradiación UV.

Para irradiar los cristales se emplea luz ultravioleta proveniente de una lámpara de vapor de mercurio con una longitud de onda que va de los 400 a los 600 nm. Modelo OS9286.

La cuál reúne las siguientes características:

- ◆ Voltaje: 0 – 117 V a 60 Hz.
- ◆ Potencia: 0 – 100 W.
- ◆ Corriente: 0 – 120 A.
- ◆ Salida del Monocromador: 400 – 600 nm.
- ◆ Rendija de Salida: Puntual. (porta muestras)©
- ◆ A la escala de 1 m la lámpara proporciona una radiación de $218 \mu\text{W}/\text{cm}^2$.

© El portamuestras está diseñado de tal manera que el haz incidente del diafragma llega en forma perpendicular al centro del cristal.

La distancia de irradiación entre los cristales y el haz incidente es de 5 cm, dado que éste, se encuentra protegido por un porta-lámpara de aluminio con una cavidad para sostener el porta-muestras. El tiempo de duración entre la irradiación y la lectura fue siempre constante alrededor de 1 minuto. Al obtener las curvas de brillo correspondientes a la irradiación UV no se aplicó el tratamiento térmico de pos-irradiación ya que se quiere observar el total de los picos de brillo.

4.7. Parte I. Emisión Luminiscente del LiF: Mg, Ti sensibilizado a 0.1 y 3 kGy para un tratamiento térmico de 380°C y expuesto a radiación UV.

Las muestras son previamente irradiadas a 0.1 y 3 kGy con gammas de ^{60}Co sin aplicar el tratamiento térmico de pre-irradiación y después horneadas parcialmente a 380°C durante 1 hora, antes de la exposición UV. Se obtienen las curvas de brillo correspondientes a la radiación UV en un intervalo de tiempo de 5 hasta 840 minutos. Estas presentan diferentes emisiones en el rango de temperatura de 100 a 400°C dependiendo de la dosis gamma recibida. Se observa que la respuesta luminiscente mediante las curvas de brillo en función del tiempo de exposición presenta un incremento para tiempos muy cortos de iluminación y una pérdida importante a partir de los 210 minutos de irradiación. Por lo tanto, el decrecimiento en la intensidad luminiscente es uniforme aunque no exista una excitación óptica fuera de las trampas superficiales.

4.8. Parte II. Emisión luminiscente del LiF: Mg, Ti para tratamientos térmicos de 120°C, 200°C y 380°C, sensibilizados con 0.1, 1 y 3 kGy de gammas de ^{60}Co e irradiados con luz UV.

Las muestras se someten a los diferentes tratamientos térmicos de pre-irradiación de 120°C, 200°C y 380°C durante 1 hora seguido de un enfriamiento rápido a temperatura ambiente e irradiadas con gammas de ^{60}Co con exposiciones de 0.1, 1 y 3 kGy.

Nuevamente tratadas térmicamente para cada temperatura, enfriadas rápidamente e irradiadas con luz UV para un intervalo de tiempo de 5, 15, 30, 45 y 60 minutos. Se observa que la respuesta luminiscente de las curvas de brillo correspondientes a las tres exposiciones gamma presenta tres emisiones correspondientes a los picos de brillo IV, V y VII, lo cual indica la existencia de defectos que compiten en la baja respuesta del pico V y el crecimiento del pico IV.

4.9. Parte III. Emisión Luminiscente del LiF: Mg, Ti para diferentes tratamientos térmicos, sensibilizados con 3 kGy de gammas de ^{60}Co e irradiados con UV.

Los cristales son sometidos a diferentes tratamientos térmicos de pre-irradiación en un intervalo de temperaturas de 120°C, 180°C, 200°C, 290°C, 380°C, 400°C, 480°C, 500°C, 580°C y 600°C seguido de un enfriamiento rápido e irradiados con gammas de ^{60}Co . Nuevamente sometidos a los tratamientos térmicos de pre-irradiación antes mencionados, enfriados rápidamente e irradiados con luz UV en un intervalo de tiempo de 5, 10 y 15 minutos. Para poder explicar los resultados observados en las curvas de brillo obtenidas para los diferentes horneados se divide el intervalo de temperatura en tres regiones para observar los efectos producidos en las emisiones, aplicando el siguiente criterio: (i) Región 1: 120°C-200°C, donde la forma de la curva de brillo sufre efectos drásticos debido a la baja temperatura. (ii) Región 2: 200°C-400°C, en la cual la estructura de la curva de brillo y las sensibilidades de los picos de brillo durante el horneado de pre-irradiación^[6,7] recobran las fuertes modificaciones inducidas durante el horneado de pre-irradiación de la región anterior y (iii) Región 3: 400°C-600°C el cual se encuentra por arriba del límite de solubilidad de la formación de precipitación.

CAPITULO 5. Resultados y Discusión.

Parte I. Emisión Luminiscente del LiF: Mg, Ti Sensibilizado a Altas Dosis y expuesto a radiación UV.

Se utilizan 8 pares de cristales de LiF: Mg, Ti de Harshaw cuyas dimensiones son de $3.2 \times 3.2 \times 0.9 \text{ mm}^3$ con una concentración de 80 – 200 ppm de Mg y 20 ppm de Ti. Para irradiar los cristales se empleó luz ultravioleta de una lámpara de Mercurio con una longitud de onda entre 400 y 600 nm, modelo OS9286 de 100 Watts. Los cristales vírgenes se exponen previamente a 0.1 y 3 kGy de gammas de ^{60}Co , seguido de un tratamiento térmico de 380°C durante 1 hora, para homogeneizar las impurezas de Mg en el cristal. Las muestras se depositan sobre una placa metálica a temperatura ambiente, con el fin de obtener un enfriamiento rápido y evitar agregados de las impurezas de Mg y Ti. Una vez realizado el tratamiento térmico la irradiación UV se llevó a cabo en un periodo de 5 hasta 840 minutos.

La figura 5.1. muestra la superposición de las curvas de brillo obtenidas para una exposición de 0.1 kGy con un tratamiento térmico de pre-irradiación a la luz UV de 380°C .

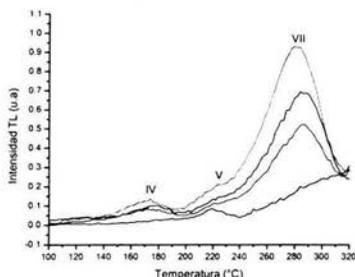


Figura 5.1. Evolución TL del LiF: Mg: Ti expuesto a - 30, - 90, -120 y - 210 minutos de radiación UV con una dosis de 0.1 kGy.

En la figura, pueden observarse tres emisiones en la curva de brillo, las cuales corresponden a los picos IV (170°C) que se atribuyen a dipolos de $\text{Mg}^+ + \text{Li}_{\text{vacancia}}^-$, V (210°C) el cual se debe a una agrupación de trímeros de $\text{Mg}_{\text{Li}}^+ - \text{V}_{\text{Li}}^-$ y el VII (274°C) debido a los precipitados de Mg. (ver apéndice).

La figura 5.2, muestra las curvas de brillo obtenidas para una exposición de 3 kGy.

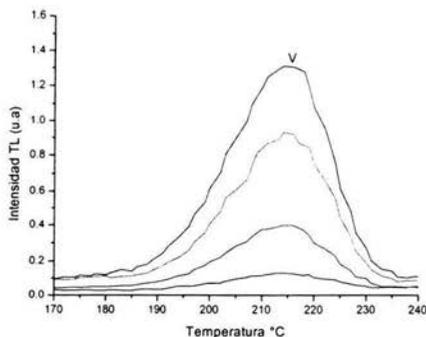


Figura 5.2. Evolución TL del LiF: Mg, Ti expuesto a -30, -90, -120 y -210 minutos de radiación UV con una dosis de 3 kGy.

De la figura se observa que ocurre un máximo de emisión correspondiente al pico de brillo V (214°C). Esta emisión se cree que ocurre a 412 nm, pero aún no ha sido identificada del todo, pero está relacionada con la presencia de grupos de impurezas de Ti-OH, las cuales son perturbadas por las impurezas de Mg. ^[41,43] Esto cual concuerda con los resultados de McKeever ^[30] que establece que este pico aparece en el rango de temperatura sobre el cual los trimeros de Mg - Li_{vac} se disocian para formar dipolos de Mg - Li_{vac}. Nótese que éste mismo máximo ocurre para los mismos tiempos de exposición, lo cual indica que los electrones liberados de un mismo género de captura pueden reatraparse dentro de otros, participando tardíamente en el proceso de liberación electrónica, emitiendo en el mismo rango de temperatura ^[36].

Para esta exposición, las emisiones de alta y baja temperatura se ven blanqueadas por la dosis y el tratamiento térmico de 380°C pero no los defectos que actúan como trampas para la recombinación en el cristal. De esta manera, el pico de dosimetría (pico V) queda aislados de los demás. Este comportamiento fue similar aún cuando los cristales se irradiaron a distintos tiempos. Cabe señalar que si sensibiliza el cristal con gammas y 12 horas después se irradia con UV las respuestas disminuyen, esto indica que los defectos participantes en las emisiones se ven estabilizados, de tal forma que otros defectos generados inmediatamente por la irradiación dejan de participar. Al verse impurificado el cristal, se formarán las vacancias que atraparán electrones durante la irradiación.

Se conoce que al irradiar con luz UV, ésta libera electrones de los centros F formando centros adicionales llamados Z. Sin embargo, de acuerdo con Sagastibelza y Alvarez Rivas, los centros F y los intersticiales se forman durante la irradiación.

Los intersticiales se estabilizan cerca de las impurezas y dislocaciones. De aquí que la TL emitida provenga de la recombinación de los centros F con lo halógenos intersticiales móviles que son liberados de las trampas tales como impurezas y dislocaciones presentes en el cristal. Al mismo tiempo, estos dos tipos de defectos se recombinan para participar en la emisión TL.

La figura 5.3 muestra una superposición del desarrollo de la respuesta UV en función del tiempo de exposición para ambas dosis de exposición gamma.

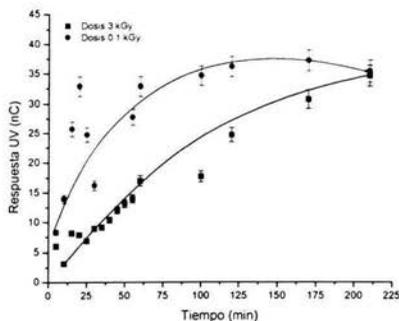


Figura 5.3. Desarrollo de la respuesta del LiF: Mg, Ti expuesto a radiación UV Para un tratamiento térmico de 380°C y exposiciones de 0.1 y 3 kGy.

En la figura, se puede notar que, la población de dipolos va aumentando hasta un tiempo de 120 minutos, después de lo cual la muestra sufre un blanqueo debido al tiempo prolongado de exposición, lo cual indica que algunos de los dipolos son destruidos por este efecto existiendo un decaimiento en la intensidad de la señal.

Probablemente existe una competencia en los defectos que participan en la emisión de los picos V y VII, dado que mientras el pico de dosimetría decrece en intensidad el pico VII aumenta, lo cual indica que de alguna manera los defectos participantes en la creación del pico de brillo V dejan de participar en la emisión, dando lugar a nuevos complejos de recombinación que aumentan la intensidad del pico de brillo VII, asociándose lo anterior a los precipitados de Mg.

La respuesta de los cristales de LiF: Mg, Ti previamente expuestos a 3 kGy de gammas y sucesivamente a luz UV presentan un comportamiento lineal con el tiempo de irradiación y más aún para un intervalo mayor, todavía se mantiene una relación lineal, hasta 120 minutos de irradiación UV, y a partir de ese valor la relación crece lentamente. Por el contrario, para el cristal expuesto a 0.1 kGy, éste presenta una relación lineal para un tiempo muy corto, crece más lentamente y decae drásticamente.

La figura 5.4. muestra que a partir de 210 minutos de irradiación UV la respuesta TL del cristal disminuye más drásticamente para los cristales expuestos a 0.1 kGy con respecto a los expuestos a 3 kGy.

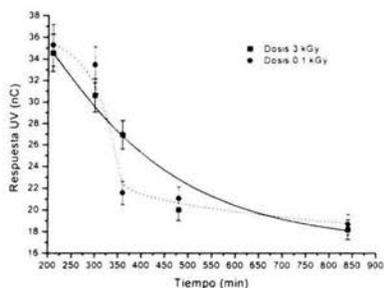


Figura 5.4. Pérdida de respuesta TL del LiF: Mg: Ti expuesto a radiación UV Para un tratamiento térmico de 380°C y exposiciones de 0.1 y 3 kGy.

La tabla 5.1 muestra los máximos de emisión de cada pico de brillo para una dosis de 0.1 kGy con un tratamiento térmico de 380°C.

Tratamiento térmico 380°C. 0.1 kGy	
Pico de brillo	Temperatura (°C)
IV	170
V	210
VII	274

Tabla 5.1. Máximos de las emisiones obtenidas del LiF: Mg,Ti para un tratamiento térmico de 380°C y una sensibilización de 0.1 kGy con gammas.

La tabla 5.2 muestra los máximos de emisión de cada pico de brillo para una dosis de 3 kGy con un tratamiento térmico de 380°C.

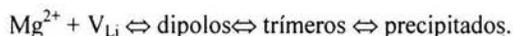
Tratamiento térmico 380°C con 3 kGy de gammas	
Pico de brillo	Temperatura (°C)
V	214

Tabla 5.1. Máximos de las emisiones obtenidas del LiF: Mg,Ti para un tratamiento térmico de 380°C y una sensibilización de 3 kGy con gammas.

Parte II. Respuesta UV para diferentes dosis y temperaturas de pre-irradiación.

En esta sección, se estudia el comportamiento de las curvas de brillo del TLD-100 tratadas térmicamente en la región de temperaturas de 120, 200 y 380°C teniendo en cuenta lo siguiente: Cuando se aplica una velocidad de enfriamiento rápido o natural (esto es, a temperatura ambiente) después de los procedimientos de horneado, esto no es un factor crucial, pero cuando se aplica una velocidad de enfriamiento lento (dentro del horno), ésta sí es un factor crucial^[43].

De esta manera, las muestras son enfriadas rápidamente a temperatura ambiente seguido de todos los procesos de horneado, situándolas en una placa de lucita. Durante el enfriamiento, las muestras siguen la secuencia de la siguiente reacción (capítulo 4):



Como se dijo anteriormente, un enfriamiento lento propicia los productos de la derecha de [1] disminuyendo la intensidad de todos los picos de brillo, debido al inicio de la fase de precipitación, propiciando un decrecimiento en la concentración de dipolos y trímeros; esto es, disminuyendo la respuesta TL, mientras que un enfriamiento rápido induce los productos de la izquierda de [1], permitiendo la precipitación y disminuyendo la concentración de dipolos, dependiendo de la temperatura con la cual la muestra es enfriada.

Los cristales son sometidos a tratamientos térmicos de pre-irradiación dentro de los intervalos de temperatura antes mencionados, seguidos de un enfriamiento rápido ($\approx 20^\circ\text{C/s}$) lo cual permite la configuración de dipolos y son expuestos a radiación gamma de 0.1, 1 y 3 kGy a temperatura ambiente. Se someten nuevamente a los tratamientos de horneado, se enfrían rápidamente y se irradian con luz UV en intervalos de tiempo de 5, 15, 30 45 y 60 minutos, observando su comportamiento. La figura 5.1. muestra el cristal del LiF: Mg, Ti sometido a un tratamiento térmico de pre-irradiación de 120°C expuesto a 0.1 kGy de dosis gamma e irradiado con luz UV .

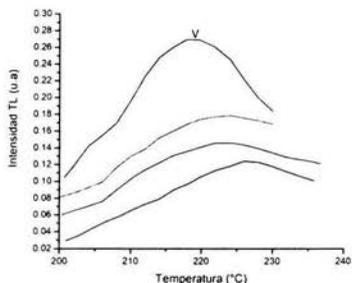


Figura 5.5. Superposición del pico de brillo V del LiF: Mg, Ti para - 15, - 30, - 45, - 60 minutos de radiación UV. Tratamiento térmico 120°C y sensibilización de 0.1 kGy con gammas.

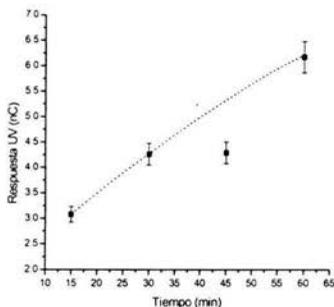


Figura 5.6. Respuesta UV del pico de brillo V en función del tiempo de exposición. Tratamiento térmico 120°C y sensibilización de 3 kGy con gammas.

En la figura 5.5, se observa que no existe emisión para tiempos menores o iguales a 5 minutos. La región de temperatura alcanzada por las sucesivas exposiciones se encuentra entre los 200°C y 235°C, encontrándose un máximo en aproximadamente 220°C el cual al compararlo con las curvas expuestas en la literatura, corresponde al pico de brillo V; éste, se cree que es conformado por la agrupación de dipolos de $Mg^{2+} - V$ (trímeros) (apéndice). Nótese la desaparición de los picos de baja temperatura, esto se debe al incremento en la agregación de intersticios que son el resultado de la liberación de átomos halógenos que incrementan la respuesta de este pico.

La figura 5.6 muestra la respuesta UV del pico de brillo V en función del tiempo de exposición. El gráfico describe una saturación en la respuesta, en el intervalo de tiempo establecido de los 15 hasta los 45 minutos de exposición, después de lo cual ésta emisión sufre una inestabilidad después de los 45 minutos.

La figura 5.7 muestra la superposición de curvas de brillo del LiF: Mg, Ti expuesto a 1 kGy con un tratamiento térmico de 120°C.

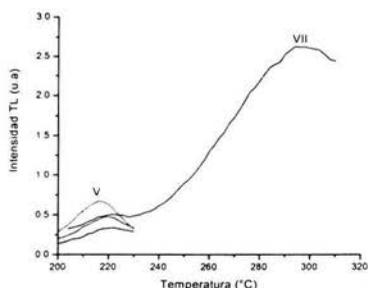


Figura 5.7. Superposición de curvas de brillo del LiF: Mg, Ti para - 15, - 30, - 45, - 60 minutos de radiación UV. Tratamiento térmico 120°C y sensibilización de 1 kGy con gammas.

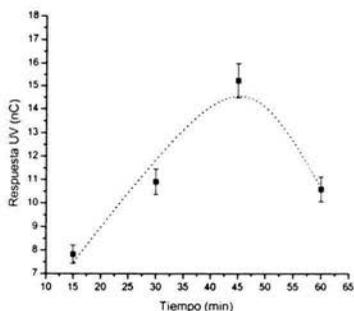


Figura 5.8. Respuesta UV en función del tiempo de exposición. Tratamiento térmico 120°C y sensibilización de 1 kGy con gammas.

En la figura 5.7 se puede notar la presencia de una segunda emisión, debida a una exposición de 60 minutos, dentro de la región de temperaturas de 280°C a 320°C con un máximo de aproximadamente 290°C el cual corresponde al pico de brillo VII. Esta emisión probablemente se deba al incremento en la dosis gamma; y de acuerdo con lo establecido por Yazici y Zihni ^[43], crea una nueva trampa, la cual modifica la estructura normal de captura del pico de brillo V, esto se debe a un proceso de agregación de impurezas que son activas y a la precipitación del Mg, disminuyendo la respuesta del pico V y aumentando la respuesta del pico VII. Las emisiones que ocurren en el intervalo de temperatura de 200°C a 230°C producidas por centros F y centros Z₂, corresponden al pico de brillo V (apéndice).

La figura 5.8 describe la respuesta del pico de brillo V. Nótese que éste pico se torna estable en el intervalo de tiempo de 15 a 45 minutos, decayendo después drásticamente, debido probablemente a la agrupación de precipitados de Mg; dando lugar al crecimiento del pico de brillo VII.

La figura 5.9 muestra la superposición de las curvas de brillo del LiF: Mg, Ti para un tratamiento térmico de 120°C a una dosis de 3 kGy.

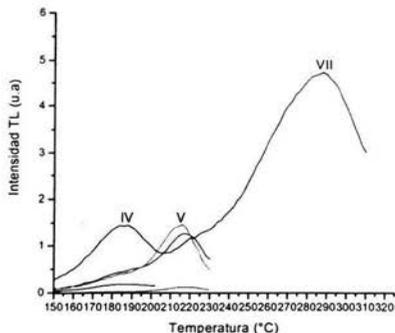


Figura 5.9. Superposición de curvas de brillo Del LiF: Mg, Ti, para - 5, - 15, - 30, - 45 y - 60 minutos de radiación UV. Tratamiento térmico 120°C y sensibilización de 3 kGy con gammas.

En la figura 5.9 se observa que existe una competencia entre los defectos que dan lugar a la respuesta del pico IV y V (dipolos y trímeros), mientras el pico IV decrece drásticamente para tiempos de 5 y 15 minutos se establece un aumento en la generación del pico de brillo V para tiempos de 15 hasta 45 minutos, que de acuerdo con lo remarcado por Weizman y Horowitz ^[48], se debe a la agrupación de dipolos de Mg²⁺ - V_{Li}. De la misma manera, para una dosis de 1 kGy, se puede notar que el pico de brillo V desaparece después de 45 minutos dando lugar a los picos de brillo IV y VII, esto se debe directamente a la ionización de electrones en la estructura de captura del pico de brillo V ^[48], después de lo cual, la existencia de grupos de precipitados de Mg crea de nueva cuenta el pico de brillo VII. Este efecto hace pensar en una correspondencia existente entre los picos de brillo IV y VII.

La figura 5.10 muestra la superposición de curvas de brillo del LiF: Mg, Ti para un tratamiento térmico de 200°C con una dosis de 0.1 kGy.

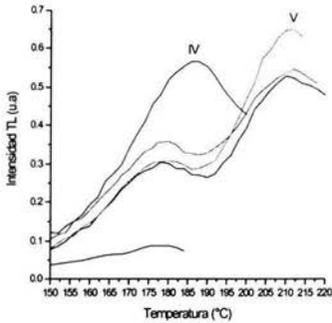


Figura 5.10. Superposición de curvas de brillo del LiF: Mg, Ti para - 5, - 15, - 30, - 45 y - 60 minutos de radiación UV. Tratamiento térmico 200°C y sensibilización de 0.1 kGy con gammas.

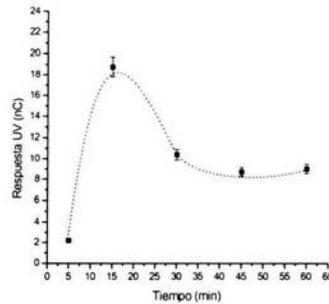


Figura 5.11. Respuesta UV en función del tiempo de exposición UV. Tratamiento térmico 200°C y sensibilización de 0.1 kGy con gammas.

La figura 5.10 muestra la existencia de dos emisiones TL en un intervalo de temperatura de 165°C a 200°C, con un máximo en 180°C, el cual corresponde al pico de brillo IV, esta emisión probablemente se deba a la liberación de un electrón de la trampa e - h, dejando un hueco de autocaptura y dando lugar a este pico, debido a lo establecido por Horowitz ^[46].

Lo anterior hace pensar que, los defectos competidores llenos de electrones se vuelven competidores inactivos en el mecanismo de recombinación del pico V seguido del proceso de sensibilización, tomando la forma de competidores activos en la respuesta del pico IV debido a la naturaleza del hueco en el centro de captura de éste pico ^[46]. A su vez las emisiones restantes dan lugar a un máximo de temperatura en el intervalo de 200°C a 230°C alcanzando un máximo aproximadamente en 220°C, el cual coincide con la temperatura del pico de brillo V.

La figura 5.11. muestra la respuesta del pico de brillo IV el cual se incrementa en el intervalo de 5 a 15 minutos de exposición, decreciendo después drásticamente y dando lugar al pico de brillo V de acuerdo con lo anteriormente mencionado.

La figura 5.12 muestra la superposición de las curvas de brillo del LiF: Mg, Ti para un tratamiento térmico de 200°C con una dosis de 1 kGy.

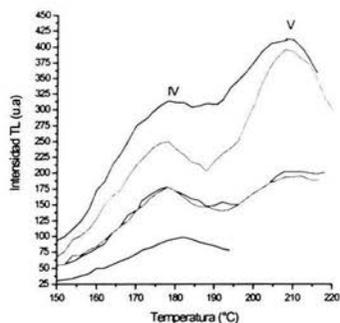


Figura 5.12. Superposición de curvas de brillo del LiF: Mg, Ti para - 5, - 15, - 30, - 45 y - 60 minutos radiación UV. Tratamiento térmico 200°C y sensibilización del kGy con gammas.

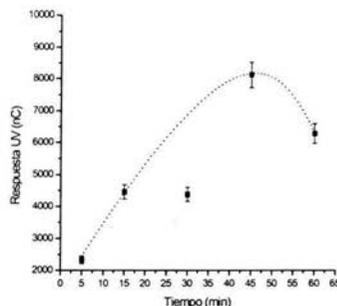


Figura 5.13. Respuesta UV del pico de brillo V en función del tiempo de exposición. Tratamiento térmico 200°C. y sensibilización de 1 kGy con gammas.

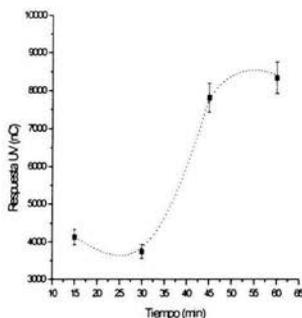


Figura 5.14. Respuesta UV del pico de brillo V del LiF: Mg, Ti para un tratamiento térmico de 200°C. y sensibilización de 1 kGy con gammas.

La figura, muestra nuevamente el hecho de la existencia de dos emisiones correspondientes a los picos IV y V debidas al incremento en la dosis gamma absorbida. Esto es, según, Sagastibelza y Alvarez-Rivas, es un indicativo de que grupos de defectos debidos a la baja temperatura de horneado se agrupan, dando lugar a la emisión de picos de brillo reproducibles, que son el resultado de las impurezas de Mg.

Las figuras 5.13 y 5.14 muestran la respuesta UV de los picos de brillo IV y V en función del tiempo de exposición. Nótese que el aumento en la dosis da lugar al decrecimiento del pico IV generando grupos de dipolos (según el Modelo de Teoría Unificada), los cuales se asocian produciendo un incremento en la respuesta del pico de brillo V.

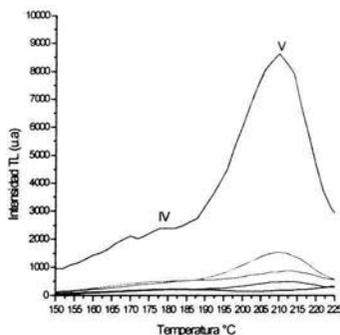


Figura 5.15. Superposición de curvas de brillo del LiF: Mg, Ti para - 5, - 15, - 30, - 45 y - 60 minutos de radiación UV. Tratamiento térmico 200°C y sensibilización de 3 kGy con gammas.

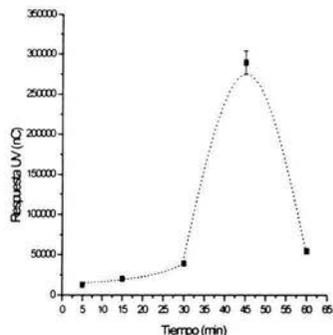


Figura 5.16. Respuesta UV del pico V del LiF: Mg, Ti en función del tiempo de exposición. Tratamiento térmico 200°C y sensibilización de 3 kGy con gammas.

La figura 5.15. muestra las emisiones producidas en un intervalo de temperaturas de 190°C a 225°C, estas tienen un máximo en aproximadamente 210°C (pico de brillo V). Que probablemente y según Sagastileza y Alvarez-Rivas, estas son el resultado de la asociación de grupos de átomos intersticiales de Fluoruro, los cuales forman agregados intersticiales que son estables a esta temperatura, dando lugar a la emisión del pico de brillo V.

La figura 5.16. muestra la respuesta del pico de brillo V en función del tiempo de exposición, nótese el aumento en la intensidad TL desde 5 hasta 45 minutos, seguida de un drástico decrecimiento en su respuesta, esto se debe a la disminución de captura de los electrones liberados de las impurezas de Mg.

La figura 5.17 muestra la superposición de las curvas de brillo obtenidas del LiF: Mg, Ti expuesto a 0.1 kGy de dosis gamma. Tratamiento de pre-irradiación de 380°C y exposiciones a radiación UV de 5 hasta 60 minutos.

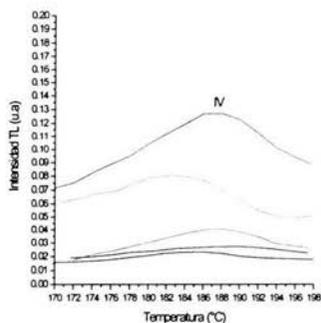


Figura 5.17. Superposición de curvas de brillo del LiF: Mg, Ti para - 5, - 15, - 30, - 45 y - 60 minutos de radiación UV. Tratamiento térmico 380°C y sensibilización de 0.1 kGy con gammas.

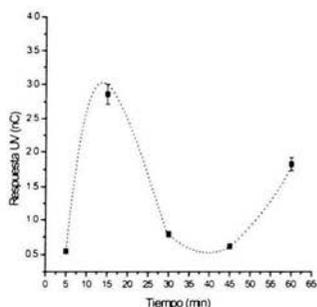


Figura 5.18. Respuesta UV del pico IV del LiF: Mg, Ti en función del tiempo de exposición. Tratamiento térmico 380°C y sensibilización de 0.1 kGy con gammas.

El gráfico muestra la existencia de una emisión TL en un intervalo de temperaturas de 170°C a 200°C con un máximo en aproximadamente 186°C correspondiente al pico de brillo IV. De esta manera, siguiendo lo establecido por Horowitz ^[46], esto probablemente se deba a que durante la radiación UV, ésta excita a los electrones de una captura electrón - hueco, permaneciendo solamente un hueco dentro de la configuración TC/LC [TC = Centro de Captura, LC = Centro Luminiscente), y dando lugar a ésta emisión. La figura 5.18 muestra la respuesta TL en función del tiempo de exposición; se puede observar, que existe una eficiencia máxima en la respuesta de esta emisión, para 10 minutos de exposición, decayendo considerablemente dentro de un intervalo de tiempo de 10 a 45 minutos, e incrementándose nuevamente hasta 60 minutos.

Las figuras 5.19 y 5.20 muestran la superposición y respuesta TL del LiF: Mg, Ti para una dosis gamma de 1 kGy y un tratamiento térmico de 380°C.

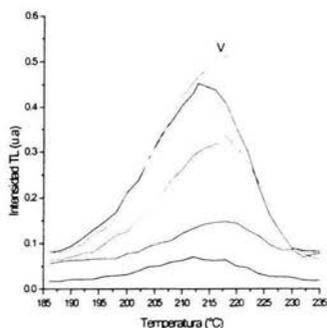


Figura 5.19. Superposición de curvas de brillo del LiF: Mg, Ti para - 5, - 15, - 30, - 45 y - 60 minutos de radiación UV. Tratamiento térmico 380°C y sensibilización de 1 kGy con gammas.

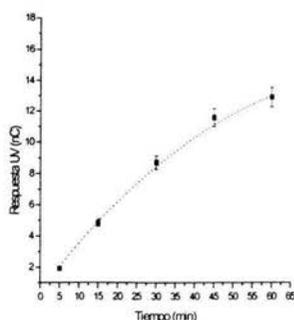


Figura 5.20. Respuesta UV del pico V del LiF: Mg, Ti en función del tiempo de exposición. Tratamiento térmico 380°C y sensibilización de 1 kGy con gammas.

La figura 5.19 muestra una emisión en un intervalo de temperaturas de 200°C a 230°C, con un máximo en aproximadamente en 216°C correspondiente al pico de brillo V. Nótese que para un incremento en la dosis gamma, el pico de brillo IV desaparece, dando lugar al pico V, el cual, probablemente se genera por un complejo TC/LC, capturando solamente un electrón. La figura 5.20 muestra la respuesta en la intensidad TL.

Las figura 5.21 y 5.22 muestran la superposición y respuesta del LiF: Mg, Ti para una dosis de 3 kGy. Tratamiento térmico de 380°C y diferentes tiempos de exposición UV.

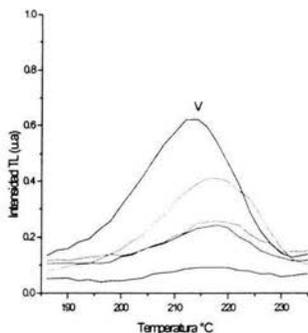


Figura 5.21. Superposición del pico de brillo V del LiF: Mg, Ti para - 5, - 15, - 30, - 45 y - 60 minutos de radiación UV. Tratamiento térmico 380°C y sensibilización de 3 kGy con gammas.

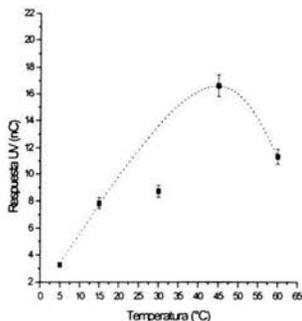


Figura 5.22. Respuesta UV del pico V del LiF: Mg, Ti en función del tiempo de exposición. Tratamiento térmico 380°C y sensibilización de 3 kGy con gammas.

La figura 5.21 muestra una emisión dentro de un intervalo de temperaturas de 200°C a 230°C con un máximo de temperatura en aproximadamente 218°C correspondiente al pico de brillo V, el cual, como se mencionó anteriormente, es generado por el complejo TC/LC. La figura 5.22 muestra la respuesta TL en función del tiempo de exposición. La intensidad crece hasta 45 minutos, no linealmente debido probablemente al aumento en la exposición gamma.

La tabla 5.3, muestra la temperatura en la cual se encuentran los máximos de las emisiones obtenidas para diferentes tratamientos térmicos de pre-irradiación y dosis gamma de ^{60}Co .

Tratamiento térmico 120°C con 0.1 kGy de gammas.	
Pico de brillo	Temperatura (°C)
V	220°
Tratamiento térmico 120°C con 1 kGy de gammas.	
Pico de brillo	Temperatura
V	220
VII	290
Tratamiento térmico 120°C con 3 kGy de gammas.	
Pico de brillo	Temperatura
IV	185
V	215
VII	290
Tratamiento térmico 200°C con 0.1 kGy de gammas.	
IV	180
V	220
Tratamiento térmico 200°C con 1 kGy de gammas.	
IV	178
V	210
Tratamiento térmico 200°C con 3 kGy de gammas.	
V	210
Tratamiento térmico 380°C con 0.1 kGy de gammas.	
IV	186
Tratamiento térmico 380°C con 1 kGy de gammas.	
V	216
Tratamiento térmico 380°C con 3 kGy de gammas.	
V	218

Tabla 5.3. Temperatura de los máximos obtenidos para diferentes tratamientos térmicos de pre-irradiación y dosis gamma de ^{60}Co .

De los máximos obtenidos, puede observarse que para el pico IV, existe una variación de $\pm 5^\circ\text{C}$, para el pico V de $+ 5^\circ\text{C}$, mientras que el pico VII permanece estable.

Parte III. Emisión UV para diferentes tratamientos térmicos de pre-irradiación con 3 kGy.

La estructura de la curva de brillo del LiF: Mg, Ti (TLD-100) depende de los tratamientos térmicos de pre-irradiación^[44,45], estos se atribuyen a los agregados y precipitados de las impurezas de Mg de acuerdo a la asociación de impurezas y vacancias: $Mg^{2+} - V_{Li} \Leftrightarrow$ dipolos \Leftrightarrow trímeros \Leftrightarrow precipitados que pueden dar lugar a cambios en la estructura del cristal. Los cristales fueron tratados térmicamente en la región de temperaturas entre 120°C y 600°C seguidos de un enfriamiento rápido hasta la temperatura ambiente ($\approx 20^\circ C/s$) para guardar condiciones de equilibrio, situándolas en placas de lucita de 0.5 cm y en la oscuridad, sensibilizados con 3 kGy de gammas de ^{60}Co y nuevamente tratadas térmicamente e irradiadas en un intervalo de tiempo de 5, 10 y 15 minutos con luz UV.

El propósito de este parte es estudiar el comportamiento de las emisiones del cristal de LiF: Mg: Ti para diferentes tratamientos térmicos. Los resultados muestran una fuerte dependencia de las emisiones con respecto a la temperatura de pre-irradiación.

Para explicar los resultados obtenidos se divide el intervalo de temperatura en tres regiones con el siguiente criterio:

(i) Región 1: 120°C-200°C, donde la forma de la curva de brillo sufre efectos drásticos debido a la baja temperatura. (ii) Región 2: 200°C-400°C, en la cual la estructura de la curva de brillo y las sensibilidades de los picos de brillo durante el horneado de pre-irradiación^[33,34] recobran las fuertes modificaciones inducidas durante el horneado de pre-irradiación de la región anterior y (iii) Región 3: 400°C-600°C el cual se encuentra por arriba del límite de solubilidad de la formación de precipitación. (iv) Se realiza una comparación de los máximos obtenidos de cada emisión con los datos de la curva de brillo característica (capítulo IV, tabla 4.1) y los datos de calibración (tabla 5.1)^[47].

La tabla 5.4 muestra los datos de calibración del máximo de temperatura de los picos de brillo del LiF: Mg, Ti. Realizada en el equipo de termolumiscencia Harshaw 3500 y en el Gammabeam del Instituto de Ciencias Nucleares UNAM.

Pico	T _{Máx.} (°C)	FWHM (°C)
	± 1	
I	65	
II	120	
III	156	32 \pm 2
IV	186	21 \pm 1
V	212	25 \pm 1
VI	234	40.4
VII	274	40.4
VIII	307	32
IX	333	32

Tabla 5.4. Máximos de calibración de los picos de brillo del LiF: Mg, Ti^[47] expuesto a 3 kGy.

La figura 5.23 muestra la superposición total de las curvas de brillo del LiF: Mg, Ti expuesto a 5 minutos de irradiación UV.

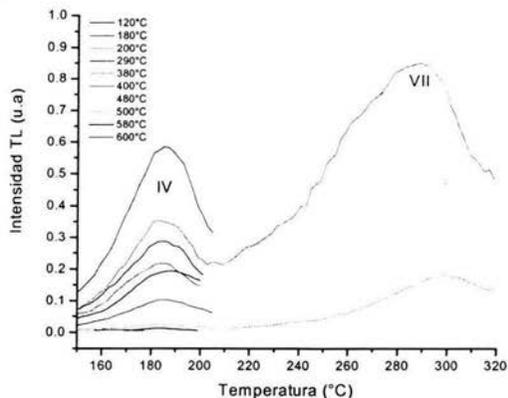


Figura 5.23. Superposición de curvas de brillo del LiF: Mg, Ti Para diferentes tratamientos térmicos y sensibilizados con 3 kGy Expuesto a 5 minutos de radiación UV

Las figuras 5.24 y 5.25 muestra la superposición de las curvas de brillo del LiF: Mg, Ti para los diferentes intervalos de temperatura, expuesto a 5 minutos de irradiación UV.

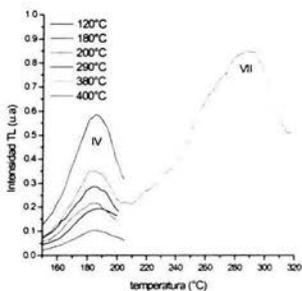


Figura 5.24. Superposición de curvas de brillo del LiF: Mg, Ti, para la región de temperaturas de 120 a 400°C con 3 kGy. 5 minutos de radiación UV.

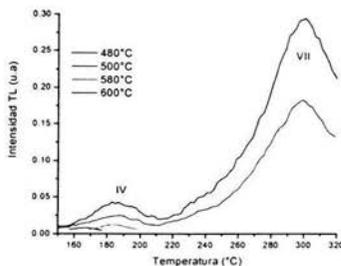


Figura 5.25. Superposición de curvas de brillo del LiF: Mg, Ti, para la región de temperaturas de 280 a 320°C con 3 kGy. 5 minutos de radiación UV.

Las figuras 5.4 muestra las emisiones obtenidas del LiF: Mg, Ti expuesto a 5 minutos de radiación UV para diferentes tratamientos térmicos. Estas ocurren en el intervalo de 160°C a 190°C con un máximo de temperatura promedio de 183°C correspondientes al pico de brillo IV y de 285°C a 305°C con un máximo de temperatura promedio de 296°C, correspondiente al pico de brillo VII.

El proceso termoluminiscente que produce estos picos de brillo (según lo propuesto por Horowitz) se debe principalmente a una recombinación entre un electrón térmicamente liberado de un centro de captura (TC) basado en la impureza de Mg y en un hueco capturado en un centro luminiscente (LC) distinto^[47]. Nótese que para temperaturas menores a 380°C solamente existe un incremento en la sensibilidad de respuesta del pico de brillo IV y la desaparición total del pico de brillo V. Esto se debe a que todos los electrones correspondientes a la emisión del pico de brillo V se transfieren hacia una región de menor temperatura aumentando la sensibilidad del pico IV, debido a la ionización y difusión en la banda de conducción. Además se observa un incremento en la sensibilidad del pico de brillo VII para temperaturas de 380°C seguido de un fuerte decaimiento en la respuesta para este pico en 480°C y 500°C. Los máximos de temperatura obtenidos para los diferentes tratamientos térmicos se muestran en las tablas 5.5 y 5.6.

Pico obtenido IV Tratamiento térmico (°C)	Temperatura (°C)
120	188
180	185
200	184
290	185
380	183
400	185
480	183
500	187
580	183
600	167

Tabla 5.5. Comparación de los máximos de temperatura de calibración y característicos del pico de brillo IV del LiF: Mg, Ti con respecto a los obtenidos.

Se puede observar una variación de $\pm 4^\circ\text{C}$ con respecto al valor obtenido en la calibración para éste pico, la cual es de 186 ± 1 .

Pico VII Tratamiento térmico (°C)	Temperatura (°C)
120	
180	
200	
290	
380	289
400	
480	301
500	299
580	
600	

Tabla 5.6. Comparación de los máximos de temperatura de calibración y característicos del pico de brillo VII del LiF: Mg, Ti con respecto a los obtenidos.

Se puede observar una variación de 27°C con respecto al valor obtenido en la calibración para éste pico, la cual es de 274 ± 2 .

La figura 5.26 muestra la superposición de curvas de brillo del LiF: Mg, Ti expuesto a 10 minutos de radiación UV para diferentes tratamientos térmicos de pre-irradiación.

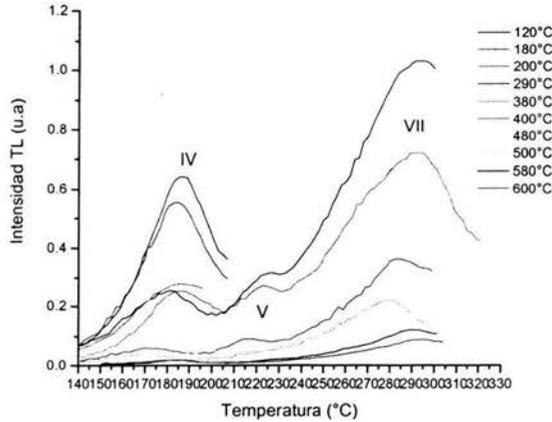


Figura 5.26. Superposición de curvas de brillo del LiF: Mg, Ti Para diferentes tratamientos térmicos con 3 kGy Expuesto a 10 minutos de radiación UV.

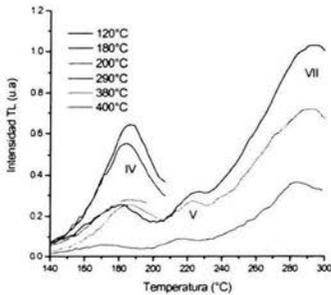


Figura 5.27. Superposición de curvas de brillo del LiF: Mg, Ti para la región de temperaturas de 120 a 400°C con 3 kGy 10 minutos de radiación UV.

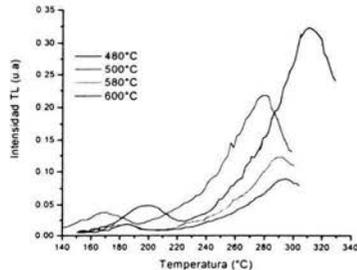


Figura 5.27. Superposición de curvas de brillo del LiF: Mg, Ti para la región de temperaturas de 120 a 400°C. Dosis 3 kGy 10 minutos de radiación UV.

Las figuras 5.27 y 5.28 muestran las emisiones obtenidas para una exposición de 10 minutos de radiación UV. La primera correspondiente al pico de brillo IV, la cual se encuentra en el intervalo de temperaturas de 170°C a 195°C , con un máximo en aproximadamente 192°C . La segunda correspondiente al pico de brillo V la cual se encuentra en el intervalo de temperaturas de 210°C a 225°C con un máximo en 222°C .

Nótese que estas emisiones solamente ocurren en las dos primeras regiones de investigación, esto es, en la región de 120°C a 400°C.

Esto, siguiendo lo indicado por Horowitz^[46], se deba probablemente a que, el tratamiento térmico aplicado de pre-irradiación, crea una difusión de electrones en la banda de conducción, lo cual permite la captura de un hueco, debido a la ionización electrónica de las trampas del pico V, aumentando la sensibilidad de respuesta del pico de brillo IV. La tercera, correspondiente al pico de brillo VII en el intervalo de temperaturas de 275°C a 315°C con un máximo de temperatura de 293°C. Esta emisión solamente se encuentra para temperaturas altas de pre-irradiación, esto es en el intervalo de 480°C a 600°C, esto se debe (según Sagastibelza y Alvares-Rivas) a la existencia de grupos de precipitados de Mg creados por las altas temperaturas de horneado, notando de nueva cuenta que la respuesta decrece drásticamente.

Los máximos de temperatura obtenidos para los diferentes tratamientos térmicos se muestran en la tablas 5.7, 5.8 y 5.9.

Pico IV	
Tratamiento térmico (°C)	Temperatura (°C)
120	182
180	185
200	186
290	186
380	187
400	171
480	195
500	170
580	179
600	184

Tabla 5.7. Comparación de los máximos de temperatura de calibración y característicos del pico de brillo IV del LiF: Mg, Ti con respecto a los obtenidos.

Pico V	
Tratamiento térmico (°C)	Temperatura (°C)
120	226
180	
200	
290	
380	223
400	216
480	
500	
580	
600	

Tabla 5.8. Comparación de los máximos de temperatura de calibración y característicos del pico de brillo V del LiF: Mg, Ti con respecto a los obtenidos.

Pico VII Tratamiento térmico (°C)	Temperatura (°C)
120	
180	
200	
290	
380	
400	
480	311
500	279
580	289
600	293

Tabla 5.9. Comparación de los máximos de temperatura de calibración y característicos del pico de brillo VII del LiF: Mg, Ti con respecto a los obtenidos.

La figura 5.28. muestra la superposición de curvas de brillo del LiF: Mg, Ti para diferentes tratamientos térmicos, expuesto a 15 minutos de radiación UV con una dosis 3 kGy.

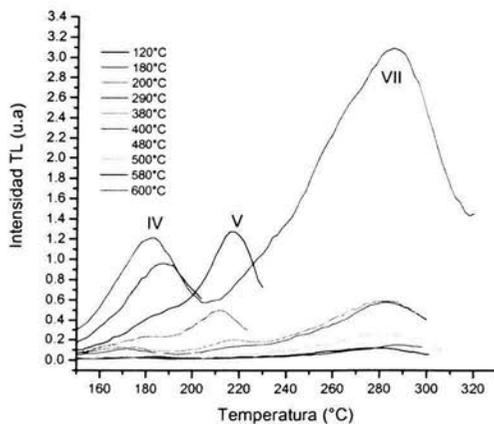


Figura 5.28. Superposición de curvas de brillo del LiF: Mg, Ti Para diferentes tratamientos térmicos con 3 kGy Expuesto a 15 minutos de radiación UV.

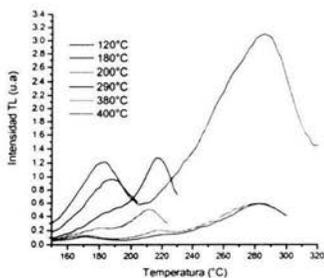


Figura 5.29. Superposición de curvas de brillo del LiF: Mg, Ti Para la región de temperaturas de 120 a 400°C con 3 kGy 15 minutos de radiación UV.

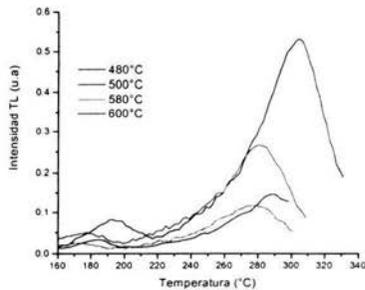


Figura 5.30. Superposición de curvas de brillo del LiF: Mg, Ti Para la región de temperaturas de 480°C a 600°C con 3 kGy 15 minutos de radiación UV.

La figura 5.29 muestra la región de temperaturas de 120°C a 400°C. Nótese la existencia de dos emisiones para la región de 120°C a 200°C donde la figura de la curva de brillo sufre cambios drásticos^[43]. Para un tratamiento térmico de 120°C se tiene una emisión correspondiente al pico de brillo V más un hombro en la región de baja temperatura (pico de brillo IV), con máximos de temperatura en 184°C y 217°C. Para 180°C el efecto es diferente, dado que la emisión correspondiente al pico de brillo IV (182°C) crece cuando se aumenta la temperatura de pre-irradiación, desapareciendo la emisión del pico V y dando paso a la emisión del pico de brillo VII (285°C), esto probablemente (según lo propuesto por Horowitz) se deba a que el hueco capturado en un centro luminiscente (LC) que da lugar al pico IV, se recombina de nueva cuenta con los electrones liberados de un centro de captura (TC), basado en el Mg, disminuyendo la intensidad del pico IV y aumentando la población de grupos de dipolos y por consecuencia aumentando la emisión del pico VII, esto hace pensar en una correspondencia existente entre los picos IV y VII, como una consecuencia del decrecimiento del pico V. En 200°C el comportamiento es similar a la región de 120°C, la intensidad del pico de brillo V (212°C) aumenta, disminuyendo la intensidad de la emisión del pico IV (188°C). Esto se debe a la recombinación de un par electrón – hueco capturado en un complejo TC – LC^[46,48] según Horowitz.

Región de 290°C a 400°C

Para un tratamiento de pre-irradiación de 290°C existe una única emisión correspondiente al pico de brillo IV en aproximadamente 172°C. En 380°C y 400°C donde podemos asegurar la solubilidad de precipitados^[43], existen tres emisiones correspondientes a los picos de brillo IV (172°C y 193°C), V (216°C y 218°C) y VII (282°C). Nótese de nueva cuenta la probable existencia de una correspondencia entre los picos IV y VII, debido a lo anteriormente mencionado.

Región de 480°C a 600°C

Esta presenta dos emisiones, una correspondiente al pico de brillo IV la cual se encuentra en la región de 170°C a 190°C, con un máximo en aproximadamente 178°C.

Note la desaparición total del pico de brillo V dado que los electrones liberados se ionizan y se difunden creando un incremento en el pico de brillo IV a expensas del decrecimiento en éste. Puede observarse la probable correspondencia de los picos IV y VII el cual aparece en la región entre 275°C y 305°C cuyo máximo aparece en aproximadamente 289°C.

Las tablas 5.10, 5.11 y 5.12 muestran los máximos obtenidos durante el trabajo de tesis.

Pico IV Tratamiento térmico (°C)	Temperatura (°C)
120	184
180	182
200	188
290	172
380	172
400	193
480	177
500	170
580	179
600	184

Tabla 5.10. Comparación de los máximos de temperatura de calibración y característicos del pico de brillo IV del LiF: Mg, Ti con respecto a los obtenidos.

Pico V Tratamiento térmico (°C)	Temperatura (°C)
120	217
180	
200	212
290	
380	216
400	218
480	
500	
580	
600	

Tabla 5.11. Comparación de los máximos de temperatura de calibración y característicos del pico de brillo V del LiF: Mg, Ti con respecto a los obtenidos.

Pico	
VII	
Tratamiento térmico (°C)	Temperatura (°C)
120	
180	
200	
290	
380	
400	
480	305
500	282
580	279
600	289

Tabla 5.12. Comparación de los máximos de temperatura de calibración y característicos del pico de brillo VII del LiF: Mg, Ti con respecto a los obtenidos.

Las tablas muestran una variación del máximo de temperatura obtenido para cada región, que al compararlos con los datos de calibración y característicos; estos muestran un movimiento en el máximo encontrado, lo cual probablemente, se deba al incremento en la temperatura de pre-irradiación; dado que la altura de los picos, depende fuertemente del tratamiento térmico. Lo cual está de acuerdo con los resultados obtenidos para el LiF dopado con impurezas de Mg, Cu, Na y Si^[49].

CAPITULO 6. Conclusiones.

Parte I.

Las emisiones TL para los cristales expuestos a 3 kGy se encontraron entre 170 y 240°C, cuyos máximos se conservaron en 214°C bajo las condiciones experimentales citadas. No así para los cristales expuestos a 0.1 kGy, en los cuales el máximo representativo del pico de brillo IV se encuentran entre 140 y 200°C; para el pico de brillo V entre 200 y 240°C y para el pico de brillo VII entre 240 y 320°C. Se ha encontrado que el cristal de LiF impurificado con Mg y Ti, bajo el tratamiento térmico y condiciones de pre-irradiación de 3 kGy responde de una manera diferente a la radiación UV en un intervalo de tiempo muy corto (5 a 15 minutos), con respecto a lo obtenido en los cristales expuestos a 0.1 kGy. Sin embargo, al exponerse a tiempos muy largos de irradiación UV, él mismo presenta una región bastante aceptable de respuesta lineal, hasta 120 minutos (Fig. 5.3). Pero al llegar a 210 minutos la respuesta TL decae más drásticamente para los cristales expuestos a 0.1 kGy que los expuestos a 3 kGy. En este caso, la participación de los defectos generados en el cristal, principalmente los centros F, V_K y H, participan de manera eficiente, aislando al pico dosimétrico de sus otros componentes, pero al transcurrir tiempos largos de irradiación, éstos modifican su participación en la emisión TL.

Es posible, que en periodos largos de tiempo, el cristal sufra blanqueo óptico, debido a la misma lámpara, lo que se traduce en la pérdida de respuesta. Aún así, éste material presenta propiedades de detector de radiación UV para un cierto intervalo de tiempo a temperatura ambiente. Falta por realizar mayor investigación sobre la recombinación y el papel que estos defectos juegan en la emisión TL del cristal. Por lo tanto, se puede tener, con este tipo de tratamiento térmico y de pre-irradiación establecida, la detección UV.

Parte II.

Se puede observar que al variar los tratamientos térmicos y de radiación con gammas, se obtienen las mismas emisiones, correspondientes a los picos de brillo IV, V y VII. En particular, podríamos pensar en una relación existente entre los picos de brillo IV y V. Esto lo podemos explicar con ayuda del Modelo de Interacción Unificado, propuesto por Horowitz, el cual establece que el pico de brillo V es el resultado de la recombinación vía la difusión electrónica en la banda de conducción, seguido de la liberación térmica de un electrón atrapado en la estructura TC/LC. El pico de brillo IV se deriva de un hueco capturado en la misma estructura TC/LC.

La alta eficiencia en la conversión del pico de brillo V en el pico IV, se debe a la ionización óptica del electrón dentro del par electrón-hueco, dejando, simplemente un hueco atrapado (pico de brillo IV), siendo éste, un mecanismo directo relativamente de procesos de competencia. La ionización óptica del electrón capturado (pico de brillo V), sin embargo, puede producir al pico de brillo IV, si se involucra el transporte de los portadores de carga en la banda de conducción, éste mecanismo sí está sujeto a procesos de competencia, y, por lo tanto, se puede observar un decrecimiento en la magnitud de la conversión de eficiencia.

Parte III.

El simultáneo crecimiento y decrecimiento en la intensidad de los picos de brillo IV y V se debe al tiempo de blanqueo UV. De esta manera, el incremento en el pico de brillo IV se deriva directamente de la ionización de electrones en la estructura de captura de la composición del pico de brillo V. Los electrones en la banda de conducción están completamente de-localizados, y de esta manera, están sujetos a un cierto número de procesos de competencia. Por lo tanto, el re-atrapamiento de electrones en la banda de conducción y la estructura de captura del pico de brillo IV, puede dar una conversión menor en la eficiencia. De ahí que el pico de brillo IV se deba a un hueco de captura y no a un electrón capturado. Si se considera esto, el electrón liberado de la trampa del pico de brillo V, puede convertirse en un hueco.

Esto concuerda con el modelo propuesto por Mayhugh, en el cual, los electrones ópticamente ionizados en las trampas del pico de brillo V, son capturados por centros V_3 que liberan huecos; los huecos que se encuentran térmicamente inestables en los centros V_K migran hacia la banda de valencia y son eventualmente capturados por trampas desocupadas del pico de brillo IV. Este proceso involucra la difusión de portadores de carga.

De lo anterior, se puede establecer, que existe una correspondencia entre los picos de brillo IV y V, tomando en cuenta, el Modelo de Interacción Unificado, propuesto por Horowitz; a su vez, se observa que también se involucra una emisión correspondiente al pico de brillo VII. Esto de alguna manera, se podría explicar, involucrando una probabilidad existente entre la emisión de estos tres picos de brillo. De esta manera, se ha obtenido un método y caracterización del LiF impurificado con Mg y Ti, para la detección UV, llegando, éste a tener propiedades de un dosímetro.

Los resultados muestran, que es posible encontrar una respuesta adecuada del LiF: Mg, Ti a la radiación UV; los mecanismos responsables de la emisión termoluminiscente son difíciles de identificar. Sin embargo, este trabajo contribuye a la ubicación de los máximos de emisión, y logra un método para usar el LiF: Mg, Ti como un detector UV a temperatura ambiente, mediante la sensibilización con radiación gamma. Aunque debe tenerse en cuenta factores como: los tipos de impurezas, la velocidad de calentamiento, los tratamientos térmicos y las dosis de sensibilización, las cuales contribuyen enormemente en las distintas emisiones en alturas y formas que emite el cristal LiF: Mg, Ti. C

Cabría señalar finalmente que sería interesante, considerando los mismos tratamientos, realizar mediciones a baja temperatura de nitrógeno líquido con este cristal, pues mediciones en el LiF impurificado con Mg, Cu, P, muestran evidencias en las señales TL, las cuales pueden ser reproducibles hasta 1200 Gy e irradiándolos a razón de dosis baja de 1.19 Gy/min^[50]. Se esperaría que las emisiones térmicamente estimuladas del LiF: Mg, Ti, sufrieran algún desplazamiento menor en las curvas de brillo, que las presentadas a temperatura ambiente en este trabajo de tesis y, además, sus señales pueden presentar mayor reproducibilidad e incluso tener una mejor reducción de los picos de brillo, como los picos IV, V y VII, respectivamente, cuyas emisiones son muy claras y pueden ser útiles para dosimetría.

Puesto que esto ayudaría a aclarar la relación entre los picos IV y VII, ya que el pico de brillo IV está junto al pico de brillo V, y éste a su vez decae drásticamente, ayudando a crecer rápidamente al pico de brillo VII.

Hasta ahora los resultados obtenidos no permiten aclarar suficientemente dicha relación. En este sentido, habría que realizar trabajos adicionales en un futuro, abriendo las puertas al interés de cualquier estudiante de ciencias que lo desee.

Referencias.

1. R.M. Grant and J.R. Cameron, **J. Phys.** 37, 3791 (1966).
2. L. Delgado and A. Delgado, **J. Appl. Phys.** 55, 515 (1984).
3. Barrett C.R., Nix W.D., Tetelman A.S., **"The principles of Engineering Material"** Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. (1973), pp. 65-98.
4. Nink. R y Kos H.J. **Phys. Stat. Sol. (b)** **182**, 261 (1994).
5. E. Cruz-Zaragoza, R. Meléndez, V. Chernov, M. Barboza-Flores, T.M. Píters, J.A. Hernández y H.S. Murrieta. **Radiation Protection Dosimetry**, vol. 100 (1-4), 455 (2002).
6. Nink. R y Kos H.J. **Phys. Status Solidi** 35, 121 (1976)
7. H.J. Kos, R. Nink, **Phys. Stat. Sol. (a)** 57 (1980) 203.
8. A.J. Dekker, **Solid State Physics**. Prentice-Hall, Inc. (1967)
9. S. Ramos Bernal, A. Negrón-Mendoza, E. Cruz-Zaragoza. **Rad. Phys. Chem.** **57**, 735 (2000)
10. E. Cruz-Zaragoza, S. Ramos Bernal, A. Negrón-Mendoza. **Radiation Physics and Chemistry**, **61**, 445 (2001)
11. S. Ramos Bernal, E. Cruz-Zaragoza, A. Negrón-Mendoza, E. Bustos. **Rad. Phys. Chem.** **63**, 813 (2002)
12. S. Ramos Bernal, A. Negrón-Mendoza, E. Cruz-Zaragoza. **Rad. Phys. Chem.** **57**, 735 (2000)
13. Bosi, L and Galo, D. **Phys. Stat.sol. (b)** **182**, 261 (1994).
14. McKinlay., **"Thermoluminescence Dosimetry"** Adam Hilger Ltd. (1981), pp. 13-22.
15. A. Estrada-García, V.M. Castaño-Meneses, E. Cruz-Zaragoza, F. García-Flores. **Emisión Luminiscente del LiF: Mg,Ti expuesto a la radiación UV**. XV Congreso Nacional de Dosimetría de Estado Sólido, 11, 12 y 13 Septiembre 2002, 109.
16. P.D. Townsend. **Phys. Rev.** 155 (3), 908 (1967).
17. M. Oberhofer and Scharmann., **"Applied Thermoluminescence Dosimetry"**. Adam HilgerLtd, Bristol, Great Britain. (1981), pp. 11-36.
18. Horowitz, Y.S. In: **Thermoluminescence and Thermoluminescent Dosimetry**", Vol. I, ed. Y.S. Horowitz (CRC Press, Boca Raton) (1984).
19. Böhm M, Cord B, Hofstaetter A, Scharmann A and Parot P. **"J. Luminiscence"** (1975). pp. 17, 91.
20. Nahum, J. and Wiegand, D. A., **Phys. Rev.** **154**, 817 (1967).
21. Nahum, J., **Phys. Rev.** **174**, 1000 (1968).
22. S.W.S. McKeever. **"Thermoluminescence of solids"**. Cambridge Univerity Press. Cambridge, London New York New Rochelle Melbourne Sydney. (1985). pp. 1-11.
23. Nink, R. & Kos, H.J. **"On the Role of Z-centres in trapping Mechanism of the Thermoluminescent Lithium Fluoride"**. *Phys. Status Solidi* a **35**(1), 121-129 (1976).
24. Nink, R. & Kos, H.J. **"Lithium Fluoride Dosimetry. Part. 1. the Z-centre Model. A new Concept for the Description of the trapping Process in Dosimetric LiF: Mg: Ti"**. *Nucl. Instrum. Methods* **175**, 15-16 (1980).

25. Folkard, M. J. Roper y B. D. Michael, “Sensitivity enhancement effects in the thermoluminescence of LiF TLD-100 at radiation doses” *Phys. Med. Biol.* 32, 769-773 (1987).
26. Randzhabov, E. A. & Nepomnyachikh, A. I. “Magnesium Color Centres at 3.5 and 5.0 eV in Lithium Fluoride”. *Phys. Status Solidi* a 68, 77-81 (1981).
27. G. Baldacchini, A.T. Davidson, V.S. Kalinov, A.E. Kozakiewicz, R.M. Montereali, A.P. Voitovich, “Effects of bleaching on the thermoluminescence of gamma-irradiated TLD-100 crystals” *Journal of Luminiscence*, Vol. 1, 1-3 (1999).
28. Sagastibelza, F. and Alvarez-Rivas, J.L., *J. Phys. C: Solid States Phys.* 14, 1873 (1981).
29. Cooke, D.W. and Rhodes, J.F., *J. Appl. Phys.* 52, 3606 (1981).
30. McKeever, S.W.S. and Horowitz, Y.S., *Radiat. Phys. Chem.* 36, 35 (1990).
31. W.S. McKeever, M. Moscovitch and P. Townsend. “*Thermoluminescence Dosimetry Materials: Properties and Uses*”. Nuclear Technology Publishing. Ashford, Kent TN23 IYW England. Chapter III, 45-55, 1995.
32. Lakshmanan, A.R., Chandra, B., Bhatt, R.C., Hoffman, W. and Spallek, R., *J. phys. D: Appl. Phys.* 18, 1673 (1985).
33. Moscovitch, M., Taylor, P.L., Rodgers, J.E. and McRae, D.A., *Radiat. Prot. Dosim.* 47, 505 (1993).
34. Folkard, M. Roper, M.J., and Michael, B.D., *Phys Med. Biol.* 34, 707 (1989).
35. Horowitz, Y.S., *Radiat. Prot. Dosim.* 30, 219 (1990).
36. Cameron, J.R., Suntharalingam, N. and Kenney, G.N., *Thermoluminescence Dosimetry* (Univ. Wisconsin Press, Madison) (1968).
37. Regula, D.F., In: *Applied Thermoluminescence Dosimetry*, eds M. Oberhofer and A. Sharmann (Adam Hilger, Bristol) p. 123 (1981).
38. Zimmerman, D.W., Rhyner, C.R., and Camerosn, J.R. In: *Proc. 1st Int. Conf: on Luminescence Dosimetry*, Stanfor, CONC 650637, AEC Symposium Series 8 (NTIS, Springfield, VA) p. 87 (1967).
39. Sunta, C.M., Mazzaro, A.C. and Sordi, G.M.A.A., *Health Phys.* 25, 694 (1992).
40. Harshaw Company. <http://offo2.epa.state.oh.us/FUSRAP/f>.
41. A.J.J. Bos, R.N.M. Vijverberg, T.M. Piters, S.W.S. McKeever, *J. Phys. D* 25 (1992) 1249.
42. P. Bassi, G. Busuoli. “*A Practical Dosimeter for UV*”. *Nuclear Instrument and Methods* 143 (1977) 195-197.
43. A. Necmeddin Yazici, Zihni Öztürk, “*Thermoluminescence properties of Newly generated glow peak 3a in TLD-100 after pre-irradiation heat treatment at 150 °C*”. *Nuclear Instrument and Methods in physics Research*, DTD = 4.3.1. 13 December 2002.
44. G. Kitis, C. Furetta, *Nuclear Instrument and Methods*. B 94 (1994) 441.
45. G. Kitis, A. Tzima, C. Furetta, G.C. Cai, *Journal Physics D* 29 (1996) 203.
46. *Theory of thermoluminescence gamma dose response: The Unified Interaction Model*. Y.S. Horowitz. *Nuclear Instrument and methods in Physic Research B* 184 (2001) 68 – 84.

47. M. I. Gamboa de Buen. “**Medida de la respuesta termoluminiscente (eficiencia y Supralinealidad) del LiF: Mg: Ti; expuesto a radiación altamente ionizante**”. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias. 34 – 60. México (1996).
48. Y. Weizman, Y.S. Horowitz, L. Oster. “**Optically induced conversion of glow peaks 4 and 5 in LiF: Mg, Ti due to localized and de-localized recombination mechanisms** “. Journal of Luminiscence 87 – 89 (2000) 552 – 554.
49. Kaiyong Tang. **Radiation Measurements**, 37, 133-140 (2003).
50. S. Ramos-Bernal, E. Cruz-Zaragoza, A. Negron-Mendoza, E. Bustos. **Rad. Phys. Chem.** 63, 813 (2002).

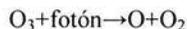
APÉNDICE.

Radiación ultravioleta

Los átomos y moléculas sometidos a descargas eléctricas producen este tipo de radiación. No debemos de olvidar que la radiación ultravioleta es la componente principal de la radiación solar. La energía de los fotones de la radiación ultravioleta es del orden de la energía de activación de muchas reacciones químicas lo que explica muchos de sus efectos. El oxígeno se disocia en la ozonósfera por la acción de la radiación ultravioleta. Una molécula de oxígeno absorbe radiación de longitudes de onda en el intervalo entre 1600 Å y 2400 Å (o fotones de energía comprendida entre 7.8 eV y 5.2 eV) y se disocia en dos átomos de oxígeno.



El oxígeno atómico producido se combina con el oxígeno molecular para formar ozono, O₃, que a su vez se disocia fotoquímicamente por absorción de la radiación ultravioleta de longitud de onda comprendida entre 2400 Å y 3600 Å (o fotones de energía entre 5.2 eV y 3.4 eV).



Estas dos reacciones absorben prácticamente toda radiación ultravioleta que viene del Sol por lo que solamente llega una pequeña fracción a la superficie de la Tierra. Si desapareciese de la capa de ozono, la radiación ultravioleta destruiría muchos organismos a causa de las reacciones fotoquímicas. La radiación ultravioleta y rayos X producidos por el Sol interactúa con los átomos y moléculas presentes en la alta atmósfera produciendo gran cantidad de iones y electrones libres (alrededor de 10¹¹ por m³). La región de la atmósfera situada a unos 80 km de altura se denomina por este motivo ionosfera.

Algunas de las reacciones que ocurren más frecuentemente son:

- $\text{NO} + \text{fotón} \rightarrow \text{NO}^+ + e$ (5.3 eV)
- $\text{N}_2 + \text{fotón} \rightarrow \text{N}_2^+ + e$ (7.4 eV)
- $\text{O}_2 + \text{fotón} \rightarrow \text{O}_2^+ + e$ (5.1 eV)
- $\text{He} + \text{fotón} \rightarrow \text{He}^+ + e$ (24.6 eV)

Entre paréntesis se indica la energía de ionización. Como resultado de esta ionización tienen lugar muchas reacciones secundarias. El color blanco está formado como la superposición de todas las frecuencias del espectro visible mientras que el negro supone que no existen componentes espectrales en la banda visible. Los colores indicados en el margen visible se corresponden con los que se obtendrían para una formada por una única frecuencia pura y se denominan colores monocromáticos. Las tonalidades rojas tienen longitudes de onda que van desde los 760 nm hasta los 650 nm, las tonalidades amarillas están situadas en el margen de 630 nm a 560 nm, las verdes de 540 nm a 500 nm, las azules de 500 nm a 420 nm y las violetas de 420 nm a 400 nm.

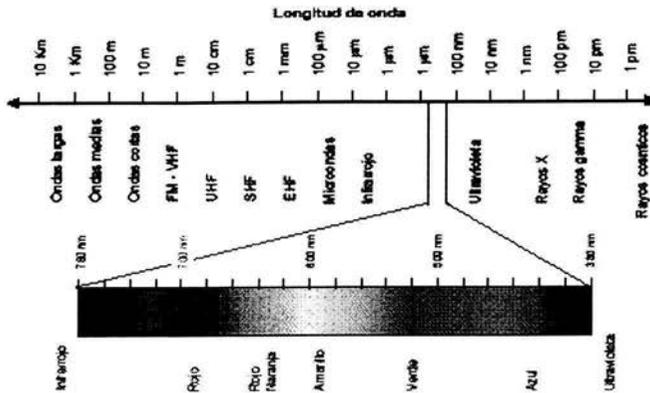


Fig. 1.2 Espectro de radiofrecuencia y frecuencias del visible

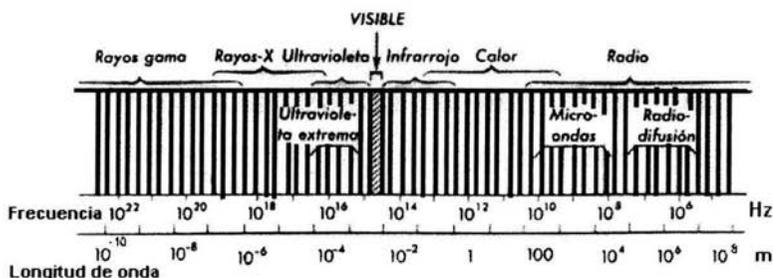
Fig. 1.2 Espectro de radiofrecuencia y frecuencias del visible

La tabla a continuación muestra el espectro electromagnético, con sus longitudes de onda, frecuencias y energías.

	Longitud de onda	Frecuencia	Energía
Rayos gamma	< 10 pm	>30.0 Hz	>19.9E-15 J
Rayos X	< 10 nm	>30.0 PHz	>19.9E-18 J
Ultravioleta Extremo	< 200 nm	>1.5 PHz	>993E-21 J
Ultravioleta Cercano	< 380 nm	>789 THz	>523E-21 J
Luz Visible	< 780 nm	>384 THz	>255E-21 J
Infrarrojo Cercano	< 2.5 um	>120 THz	>79.5E-21 J
Infrarrojo Medio	< 50 um	>6.00 THz	>3.98E-21 J
Infrarrojo Lejano/submilimetrico	< 1 mm	>300 GHz	>199E-24 J
Microondas	< 30 cm	>1.0 GHz	>1.99e-

			24 J
Ultra Alta Frecuencia <u>Radio</u>	<1 m	>300 MHz	>1.99e-25 J
Muy Alta Frecuencia <u>Radio</u>	<10 m	>30 MHz	>2.05e-26 J
Onda corta <u>Radio</u>	<180 m	>1.7 MHz	>1.13e-27 J
Onda Media(AM) <u>Radio</u>	<650 m	>650 kHz	>4.31e-28 J
Onda Larga <u>Radio</u>	<10 km	>30 kHz	>1.98e-29 J
Muy Baja Frecuencia <u>Radio</u>	>10 km	<30 kHz	<1.99e-29 J

Las ondas electromagnéticas se agrupan bajo distintas denominaciones según su frecuencia, aunque **no existe** un límite muy preciso para cada grupo. Además, una misma fuente de ondas electromagnéticas puede generar al mismo tiempo ondas de varios tipos.



Ultravioleta: Comprende de $8 \cdot 10^{14}$ Hz a $1 \cdot 10^{17}$ Hz. Son producidas por saltos de electrones en átomos y moléculas excitados. Tiene el rango de energía que interviene en las reacciones químicas. El sol es una fuente poderosa de UVA (rayos ultravioleta) los cuales al interaccionar con la atmósfera exterior la ionizan creando la ionosfera. Los ultravioleta pueden destruir la vida y se emplean para esterilizar. Nuestra piel detecta la radiación ultravioleta y nuestro organismo se pone a fabricar melanina para protegernos de la radiación. La capa de ozono nos protege de los UVA.

Rayos gamma: comprenden frecuencias mayores de $1 \cdot 10^{19}$ Hz. Se origina en los procesos de estabilización en el núcleo del átomo después de emisiones radiactivas. Su radiación es muy peligrosa para los seres vivos.

3.2. UNIDADES DE MEDIDA:

Las unidades de medida de la radiación son algo complejas, pues a las tradicionales - Roentgen, Rad y Rem- se han unido más recientemente las equivalentes en el sistema internacional de unidades (SI).

3.2.1. Unidades tradicionales:

El Roentgen es una unidad utilizada para la medición de la exposición a la radiación. Solamente puede ser usada con propiedad para medir cantidades de radiación ionizante electromagnética, es decir, rayos gamma o X, y solamente en el aire. Un roentgen es la energía radiante que deposita $2.58 * 10^4$ culombios por kilogramo de aire seco. Es realmente una medida de la ionización existente en las moléculas de una masa de aire. A pesar de las mencionadas limitaciones, la ventaja de esta unidad es que es fácil de medir de forma directa.

El rad es una unidad de medida de la dosis de radiación absorbida. Se relaciona con la cantidad de energía absorbida por un material, y puede ser utilizada para cualquier tipo de radiación y para cualquier material. Se define como la absorción de 100 ergios por gramo de material. A pesar de las ventajas reseñadas, no describe los efectos biológicos de las diferentes radiaciones. Por ello se describió el rem (rad equivalent man). Es una unidad utilizada para cuantificar los efectos biológicos de la radiación. No todas las radiaciones tienen el mismo efecto biológico, incluso con la misma cantidad de dosis absorbida. Para determinar la dosis equivalente -rem- hay que multiplicar la dosis absorbida en rads por un factor de calidad q , propio de cada tipo de radiación. Para las radiaciones electromagnéticas, el rad y el rem coinciden en su valor, puesto que se les asigna un valor q de 1. Las dosis suelen expresarse en términos de milésimas de rem, o mrem.

3.2.2. Unidades SI:

Las unidades SI son cada vez más utilizadas:

El Gray (Gy) es una medida de la dosis absorbida. Como el Rad., su equivalente en el sistema tradicional, puede utilizarse para cualquier tipo de radiación, y para cualquier material. Un Gray es igual a un Julio de energía depositado en un kilogramo de materia. Como el rad, no describe los efectos biológicos de la radiación. La dosis absorbida se expresa a menudo en centésimas de Gray o centigrays. Un Gy es equivalente a 100 rads.

El Sievert (Sv) es una unidad utilizada para describir la dosis equivalente en efectos biológicos. Es pues paralela al rem, y equivalente a 100 rem. A menudo debe utilizarse en unidades fraccionarias, hasta de millonésimas de Sievert, o micro-Sievert.

UNIDADES DE MEDIDA DE LA RADIATIVIDAD.

Un Becquerel (Bq) es la actividad de una fuente radiactiva en la que se desintegra un núcleo por segundo en un dado instante. El Curie (Ci) es la unidad antigua de medida de radiactividad, definida como la actividad de un gramo del isótopo Ra-226, su equivalencia es: $1\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{Bq}$.

Se emplean frecuentemente los múltiplos o submúltiplos de estas unidades, como el kilobecquerel (KBq), o el milicurie (mCi), microcurie (μCi), etc.

Un coulomb representa la unidad de carga eléctrica y equivalente a 10^{19} electrones. Al atravesar la materia la radiación genera cargas eléctricas. Se define en base a esta idea el Röntgen:

$$3876 \text{ Röntgen (R)} = 1 \text{ coulomb/kg}$$

que representa la ionización que se produce en un kilogramo de aire.

La intensidad de un campo de rayos gamma es medida por:

$$\text{Coulomb/kg seg o R/seg.}$$

Pero el efecto biológico depende de la energía que absorbe un tejido biológico, los efectos de las radiaciones dependen de la energía que se absorbe por unidad de masa de cualquier material. Entonces la cantidad de dosis absorbida está definida como la energía por unidad de masa que se deposita en el material. La unidad es el Gray (Gy), que equivale a un joule por kilogramo. Tradicionalmente se ha usado el RAD (Röntgen absorbed dose), que equivale a 100 erg/gr.

La conversión de unidades es entonces:

$$1 \text{ Gy} = 1\text{J/kg} = 10.000 \text{ erg/g} = 100 \text{ rad}$$

Pero, aunque el efecto biológico depende fuertemente de la dosis absorbida, también resulta importante cuan rápidamente se absorbe, cuan uniforme es y el tipo de radiación. Para considerar estos tres aspectos se usa, la dosis equivalente definida por:

$$\text{dosis equivalente} = \text{dosis absorbida} \times \text{factores de cualidad}$$

La unidad es el sievert (Sv), aunque tradicionalmente se ha utilizado el rem (Röntgen equivalente en hombre)

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

El factor de cualidad vale para rayos γ y χ para β de baja energía, 1.7 y 20 para radiación α .

Entonces para: γ y χ :

$$\begin{aligned}1 \text{ Gy} &\approx 1 \text{ Sv} \\1 \text{ rad} &\approx 1 \text{ rem}\end{aligned}$$

En el país no se han detectado zonas pobladas que tengan altas tasas de exposición a la radiación natural, ni alta concentración de radionucleidos naturales en alimentos y agua que puedan dar origen a dosis de radiación que se aparten significativamente de los valores promedios mundiales.

Si los efectos estudiados son biológicos, se emplea la Dosis efectiva. Su unidad también es el Sievert, pero en el cálculo aparecen factores de ponderación con los que se toma en cuenta la sensibilidad de los tejidos irradiados.