

Capítulo 2: Radiación y procesos luminiscentes en materiales

Este capítulo hace una breve revisión de ciertos tipos de radiación y la manera en que estas interactúan con la materia, también se explican los procesos provocados por diferentes estímulos, que llevan a la emisión de diferentes tipos de radiación. Tanto los factores que intervienen en la excitación del material como los que provocan dichas excitaciones se resumen con el fin de tener una mejor perspectiva de los posibles fenómenos que están ocurriendo en el SRO, al momento de ser irradiado o estimulado con algún tipo de radiación, la explicación de los tipos de radiación se limita a la radiación ultravioleta (UV) y la radiación β , ya que son las utilizadas en el desarrollo experimental de este trabajo.

Los procesos de luminiscencia en materiales han sido de los temas de mayor interés del siglo XX, esto llevó al desarrollo de dispositivos ópticos y optoelectrónicos en un amplio rango de aplicaciones. La luminiscencia se define como la emisión de fotones en exceso de un material que es irradiado con algún tipo específico de energía y depende de la fuente de excitación del material luminiscente. Existen diferentes tipos de luminiscencia, en particular, se revisarán brevemente 4 de ellos: fotoluminiscencia, cátodoluminiscencia, electroluminiscencia y la termoluminiscencia. Existen otros tipos de luminiscencia como la triboluminiscencia, bioluminiscencia, quimioluminiscencia, entre otros, pero en esta tesis se explicarán los 4 señalados. Una manera más general de clasificar la luminiscencia que no depende del tipo de energía irradiada, sino del tiempo de duración, es decir, el tiempo en que decae la luz emitida después de la relajación del electrón de un estado energético mayor a uno menor, es como fluorescencia y fosforescencia. Al proceso luminiscente cuya duración de luz emitida es del orden de 10^{-8} o menos, se le denomina fluorescencia. Por otro lado, la emisión cuya duración es mayor que la anteriormente mencionada y puede ser hasta de algunos segundos (en algunos casos mucho más tiempo), se denomina fosforescencia.

2.1 Radiación ultravioleta

La radiación UV o luz UV es una onda electromagnética al igual que la luz visible, ésta última en el rango de 380 nm hasta 780 nm, como se muestra en la figura 2.1. Las ondas electromagnéticas están compuestas por campos eléctricos y magnéticos oscilantes y son capaces de propagarse por el espacio libre y en la materia. El rango de la radiación UV comprende desde los 100 nm hasta 380 nm, justo por debajo de las

longitudes de onda de la luz visible. La energía de un fotón es inversamente proporcional a la longitud de onda del fotón, por lo que la radiación UV es más energética que la luz. El rango del UV se subdivide en: UVA en 315-380 nm, UVB en 280-315 nm y UVC en 100-280 nm [12].

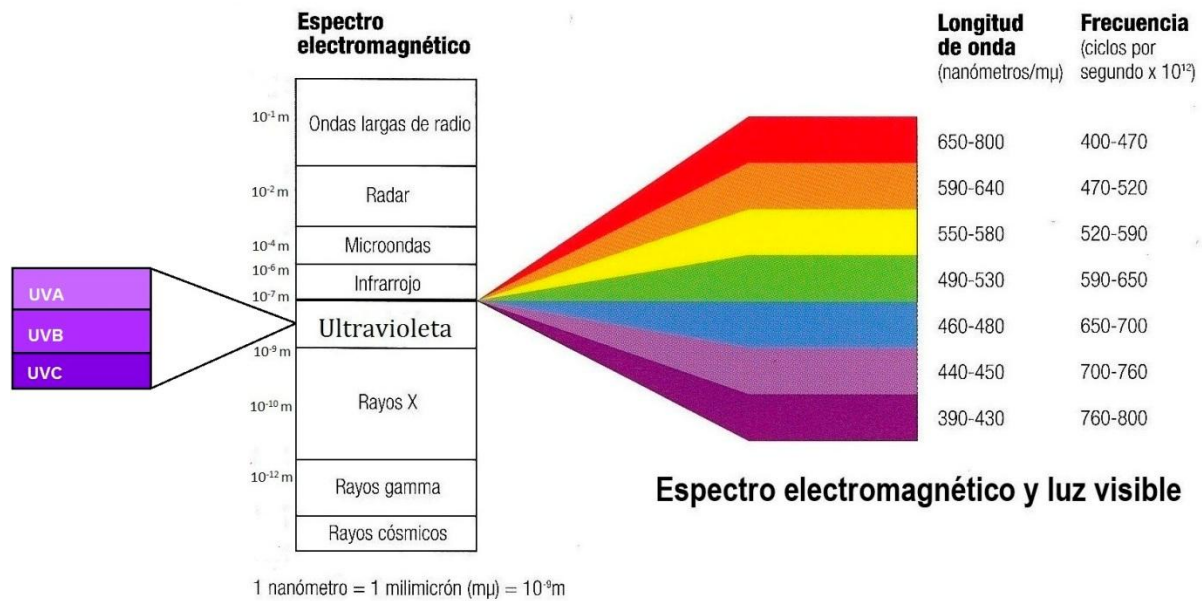


Fig. 2.1: Espectro electromagnético y acercamiento en la región de la luz visible.

La fuente natural más común de luz UV es el sol, el cual dentro de su espectro contiene longitudes de onda correspondientes a la región del ultravioleta. Distintos dispositivos emiten luz UV de forma artificial, por ejemplo lámparas de descarga de gas y bulbos de halógeno incandescentes. Aplicaciones de esta radiación han sido desarrolladas para impresoras, para desinfectar alimentos, esterilizar el aire en edificios, inspeccionar fallas en materiales, entre otras [12].

La radiación electromagnética (EM) puede ser caracterizada por diferentes parámetros como la velocidad de la onda, su frecuencia y longitud de onda, estos parámetros se relacionan mediante la siguiente expresión:

$$c = \lambda \nu \quad (\text{Ec. 2.1})$$

En donde c es la velocidad de la luz expresada en metros sobre segundo, λ es la longitud de onda de la luz, expresada en metros y ν es la frecuencia de la luz con unidad de Hertz (Hz)

Cuando la radiación interactúa con la materia, procesos hacen que la onda de luz pierda energía (absorción) y cuando estas pérdidas son constantes por unidad de longitud, se dice que el material es homogéneo, ya que sus propiedades se mantienen

constante en todo el material [12]. Los conceptos utilizados para describir las características energéticas de un campo de luz UV son la irradiancia (Watts/m^2) y la exposición radiante. La irradiancia es la potencia por unidad de área (Joules/m^2) y la exposición radiante es la energía por unidad de área. La exposición radiante también es llamada dosis y sus unidades son Joules/kg o Grays (Gy).

2.2 Radiación β

En la segunda mitad del siglo XIX Wilhelm Röntgen descubrió los rayos X (en 1895), al realizar experimentos para estudiar las descargas eléctricas en gases, este descubrimiento llevó al desarrollo de los modelos que describen a la radiación ionizante y un año después, en 1896, Becquerel realizando observaciones relacionadas al descubrimiento de Röntgen, hizo observaciones acerca de la particular actividad radiactiva de cristales de sales de uranio, lo que ahora es conocido como el descubrimiento de la radiactividad natural. Estas observaciones dieron lugar al estudio de este tipo de materiales y en 1913, los materiales radiactivos conocidos hasta ese entonces, ya habían sido acomodados en sus lugares en la tabla periódica y sus series de transformaciones habían sido estudiadas extensamente. Un concepto importante en la radiactividad natural es que cuando un elemento radiactivo emite una partícula, cambia a otro elemento químico. En la emisión de una partícula β , un neutrón es convertido a un protón y un electrón, el primero se queda en el núcleo como una carga positiva adicional y aumenta el número atómico en 1. El electrón es emitido y la masa atómica no es afectada, ya que la masa del electrón es despreciable [13].

Las partículas betas están cargadas y tienen una masa muy pequeña, pueden producir ionización y ser desviadas por campos magnéticos. Este tipo de partículas producen menos pares iónicos por centímetro que las partículas α (de 10 a 50 en comparación con 30 mil). Las partículas β recorren más distancia que las partículas α en aire, hasta unos 2 m a comparación de unos pocos centímetros. El análisis espectral de la radiación β muestra un espectro continuo de energía, y fue Pauli quien sugirió por primera vez una explicación de esto: Propuso que el neutrón se convierte en un protón, un electrón y una pequeña partícula sin carga llamada neutrino, cuya masa es mucho menor a la del electrón, también que la energía se repartía entre el electrón y el neutrino. Sobre esto, Pauli calculó la probabilidad de emisión de un electrón con cierta energía, lo cual comprobó indirectamente la existencia del neutrino. Otros experimentos más sofisticados que involucraban la interacción de átomos de hidrógeno en un gran recipiente con líquido centellador orgánico, también confirmaron esta explicación de Pauli.

2.3 Fotoluminiscencia

En los semiconductores, la fotoluminiscencia es explicada por transiciones energéticas en pares electrón-hueco, específicamente en el tipo que produce recombinación radiativa y puede ser entre las bandas de conducción y de valencia o estados dentro de la banda prohibida, que resultan de defectos en el material o impurezas. La emisión de fotones es una transición electrónica de energía inicial E_i a una final E_f . La energía de estas transiciones se relaciona con la longitud de onda mediante la ecuación 2.2:

$$E_f - E_i = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Es decir, la longitud de onda se relaciona por una constante hc , donde c es la velocidad de la luz y h la constante de Planck. Es importante señalar que los materiales con banda prohibida directa, donde el mínimo de la banda de conducción coincide con el máximo de la banda de valencia, la transición electrónica es vertical y cuando el fotón recibe energía realiza una transición desde la banda de valencia hacia la banda de conducción. En el caso de los materiales con banda indirecta, la recombinación necesita la participación de otros agentes para la conservación de momento. En materiales dopados o que tienen defectos en la red, se crean estados en la banda prohibida donde los portadores pueden relajarse y por lo tanto, resultar en recombinación que podría dominar el espectro de luz emitida. El número de transiciones electrónicas depende de la densidad de estados, inicial y final, así como de la probabilidad de ocupación del estado inicial y final.

Los mecanismos que llevan a la emisión de fotones en sólidos no difieren para los diferentes tipos de excitación. Se distinguen tres procesos básicos: (1) absorción de la energía de excitación y estimulación de transiciones electrónicas, (2) la transferencia de esa energía y su transformación y (3) conversión de esa energía en fotones en la relajación de electrones a estados de más baja energía. La probabilidad de recombinación directa es poca y generalmente, los procesos de recombinación radiativa predominan en los estados en la banda prohibida. En la fotoluminiscencia en semiconductores, existen tres procesos de interacción entre un fotón y un electrón: la absorción, emisión espontánea y la emisión estimulada. La absorción se refiere al proceso de interrumpir el equilibrio de los átomos en un sólido, al ser excitado con la energía del fotón incidente y depende, como se mencionó anteriormente, de la densidad de estados y su probabilidad de ocupación. Un claro ejemplo de ello es la absorción en la parte visible del espectro, aquellos materiales que absorben todo el espectro son llamados opacos y aquellos que no absorben en el visible son llamados

transparentes. La emisión espontánea de fotones se presenta cuando el estado del electrón se vuelve inestable al estar excitado y existe una transición después de poco tiempo a un estado de menor energía. La emisión estimulada se presenta cuando un fotón incide sobre un electrón en estado excitado y posteriormente se estimula la relajación al estado de menor energía. Los fotones emitidos son de la misma energía, por lo que se crea un haz monocromático de luz con la misma orientación de fase y dirección de propagación que la onda excitadora [14].

Los procesos de recombinación se llevan a cabo una vez que el estado del electrón se encuentra excitado en la banda de conducción o en trampas. Esto lo hace posible la absorción óptica, ya que crea un exceso de portadores a comparación de los que se encontraban en reposo térmico. Esto indica que posterior a la excitación del electrón, éste se recombina y en algunos casos emite un fotón, éste proceso puede ser visto como el inverso de la absorción óptica y se describen en la figura 2.2 y 2.3.

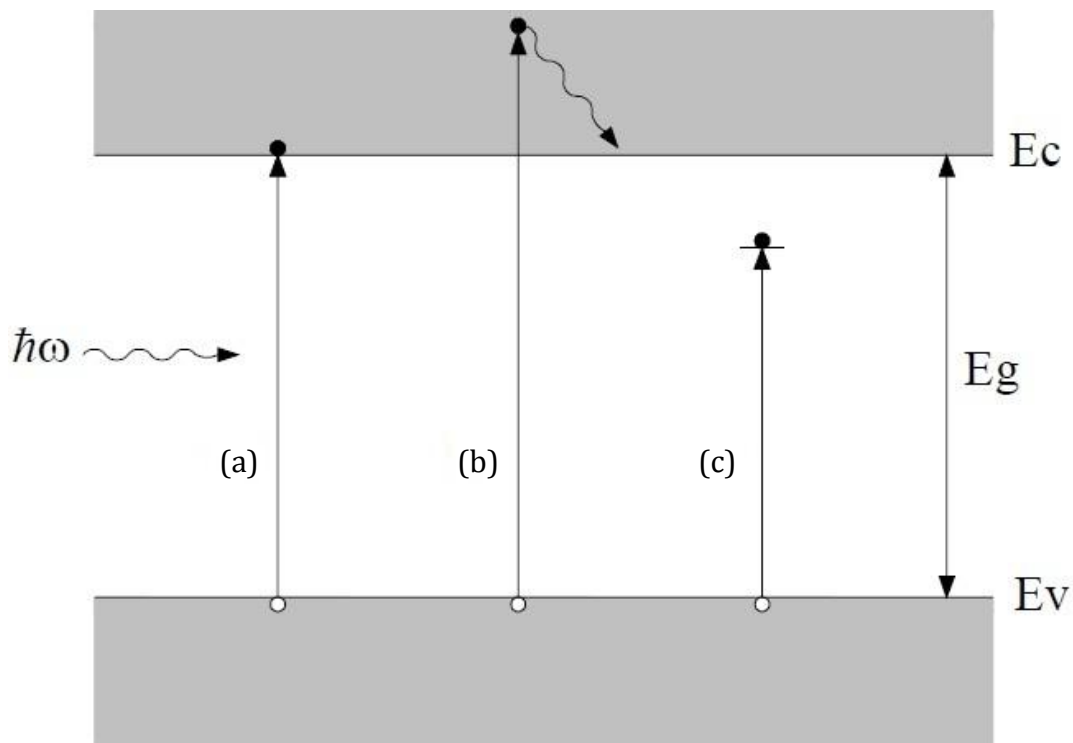


Figura 2.2: Absorción óptica. (a) Fotón con energía igual a E_g , (b) Fotón con energía mayor a E_g , (c) Fotón con energía menor a E_g .

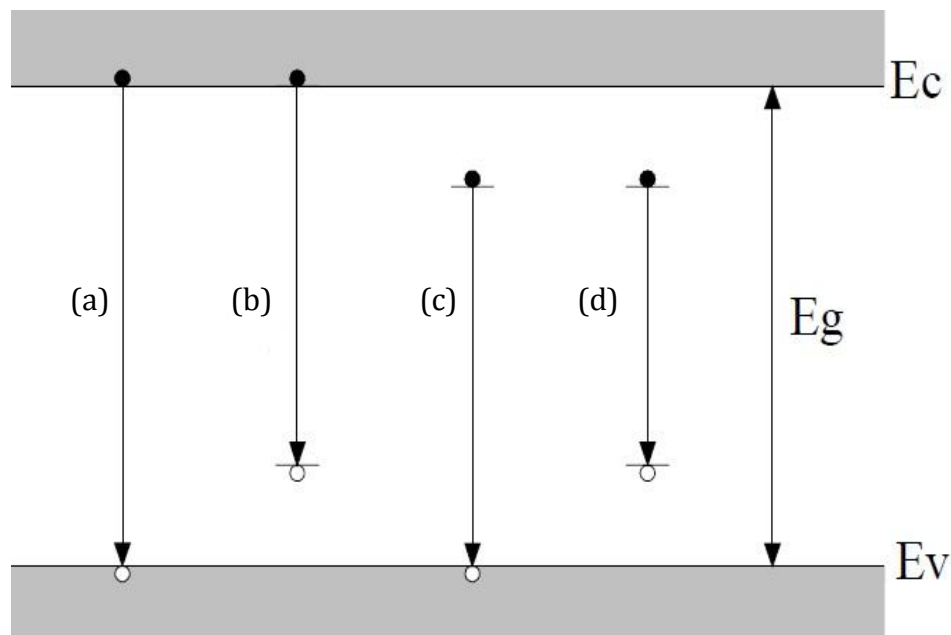


Figura 2.3: Procesos de recombinación. (a) Banda a banda, (b) Banda de conducción a aceptor, (c) Donador a banda de valencia, (d) Donador a aceptor.

2.4 Cátodoluminiscencia

La cátodoluminiscencia (CL) puede compararse con la fotoluminiscencia (FL) ya que los mecanismos de emisión no difieren para distintas fuentes de excitación. Aun así, existen diferencias que detallan el proceso de excitación en cada tipo de luminiscencia, una de ellas es la razón de pares electrón-hueco, otra el volumen de excitación [16]. También podemos distinguir la FL tomando en cuenta sus inconvenientes, entre ellos, la dificultad que presenta para determinar la densidad de estados de interface y por impurezas. La CL puede aportar gran cantidad de información al variar la energía del haz de electrones y generalmente este tipo de excitación permite la emisión de todos los centros luminiscentes presentes en el material. Otra diferencia de la CL con la FL, es la capacidad de generar órdenes de magnitud más altos de pares electrón-hueco con un solo electrón incidente, mientras que en la FL, un fotón sólo crea un par electrón-hueco. La luminiscencia puede ocurrir de dos maneras: la CL intrínseca a la red y se relaciona con la falta de estequiometría, imperfecciones estructurales, entre otras; mientras que la CL extrínseca resulta de impurezas que son llamadas “activadores”. También existen defectos en el material que pueden llevar a procesos no luminiscentes, ya que crean nuevos niveles en la banda prohibida y pueden crear procesos de transferencia de energía o emisión a bajas frecuencias [14]. Durante la irradiación de partículas con alta energía como los electrones, una parte de la energía puede transformarse en calor, que influye como proceso no luminiscente y por consecuencia, disminuir la señal de intensidad de la CL.

Para describir el proceso de CL, es necesario saber de qué manera interactúan los electrones con los sólidos, este proceso, indica que los primeros electrones pueden ser retro dispersados mediante colisiones elásticas o inelásticas en lo muestras lo suficientemente delgadas, es decir que no pierden energía y que pierden energía, respectivamente; otros electrones se absorben en el material y crean emisión de diferente tipo de luz como rayos X, ultravioleta, luz visible e infrarroja. Otro aspecto importante es la profundidad de penetración y por consecuencia, de excitación, lo que depende de la energía de los electrones incidentes. De esta manera, puede utilizarse la información obtenida en la CL para analizar electrónica, química y estructuralmente a materiales. La figura 2.4 muestra un diagrama en donde se representa los diferentes procesos de absorción y cómo responden los electrones al interactuar con el sólido.

Es importante señalar que la eficiencia cuántica para la CL es del orden de 10^3 [16], mientras que para la FL, como un fotón provoca la generación de un par electrón-hueco, su valor máximo es de 1. Bajo irradiación de un haz de electrones, los centros luminiscentes en fósforos son excitados de dos maneras: excitación directa y excitación indirecta. En fósforos en forma de polvo, la penetración de los electrones irradiados es menor a $1\mu\text{m}$, menos que el tamaño de la muestra ($4\mu\text{m}$), por lo que la generación de CL se limita a partículas en las primeras capas de la superficie del material [16]. Los electrones que penetran en el material crean un volumen de dispersión V_s , menor al volumen de la partícula V_p . Se dice que el número de iones activadores en el material es proporcional al volumen creado por la dispersión y estos iones son los que son excitados de manera directa por los electrones incidentes en el material y están contenidos en V_s . Esta proporción llega a un máximo y empieza a decrecer por efectos de auto-supresión en la concentración (del inglés: *self-quenching*). Por otra parte, la excitación indirecta se produce cuando los electrones incidentes producen pares electrón-hueco y actúan como portadores de carga móviles en el material y se recombinan en centros activadores en el volumen de la partícula. Se denomina *volumen efectivo* V_{eff} al volumen que comprende a los diferentes tipos de activadores y es diferente a V_s .

La tasa de excitación directa en V_s es del orden de 10^{-3} , por lo que el proceso que domina en la CL es la recombinación de pares electrón-hueco, es decir, el mecanismo de excitación indirecta.

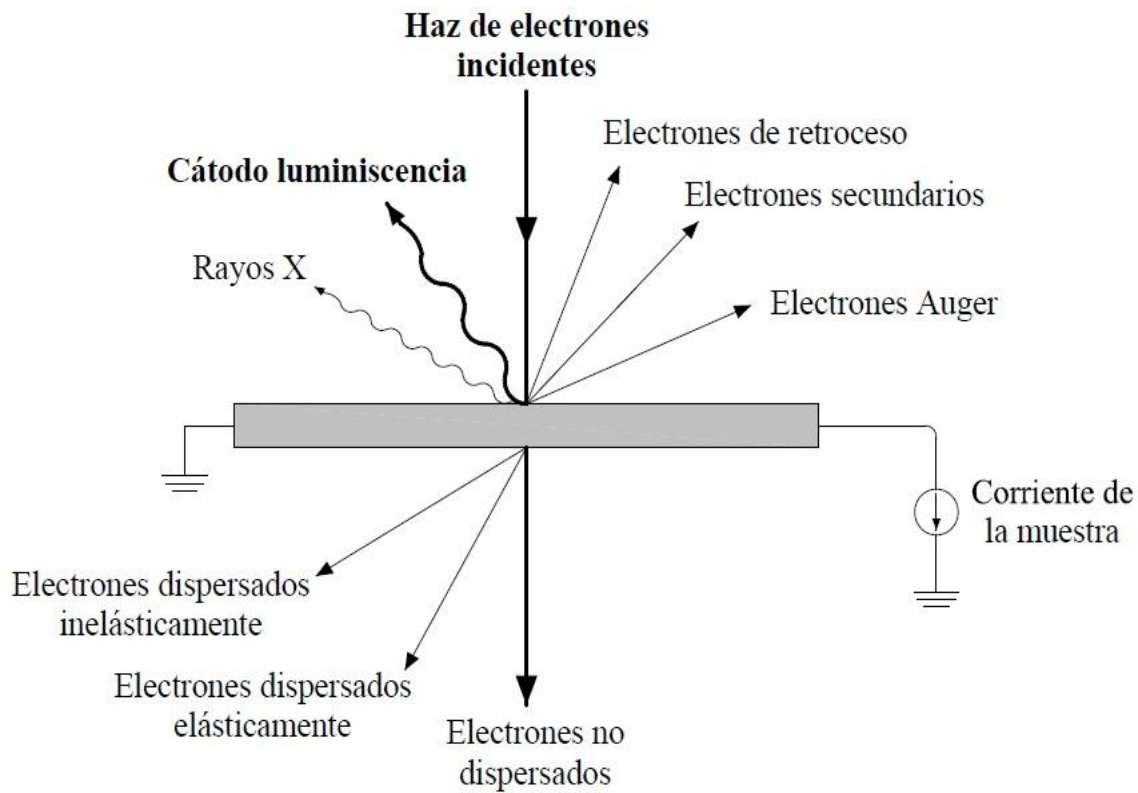


Figura 2.4: Interacción de electrones con sólidos [9].

La perfección del cristal alrededor de centros luminiscentes es un factor que afecta la probabilidad de transiciones radiativas y ha sido extensamente estudiada para ciertos fósforos, por ejemplo, el fósforo ZnS:Cu:Al.

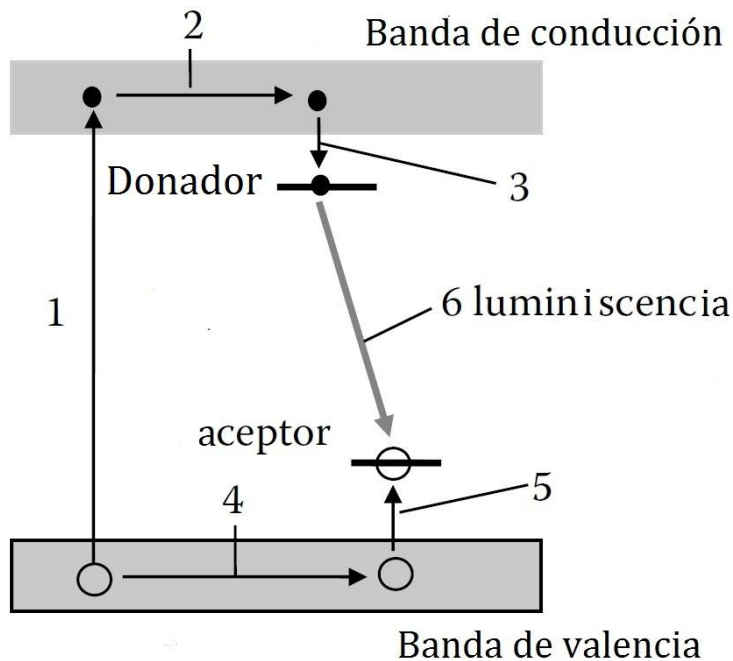


Fig. 2.5: Proceso de transporte para electrones y huecos en el fósforo ZnS:Cu:Al, así como de recombinación para donadores y aceptores [16].

La figura muestra la explicación del transporte de electrones y huecos en la banda de conducción y la banda de valencia, respectivamente. Se muestra en (1) la excitación del electrón de la banda de valencia a la banda de conducción, en (2) el transporte del electrón en la banda de conducción, (3) el electrón es atrapado en el nivel del aceptor (Al^{2+}), en (4) se muestra la migración del aceptor por la banda de valencia, en (5) queda atrapado en el nivel del aceptor (Cu^{2+}) y finalmente en (6) se produce la transición radiativa de donador a aceptor. La luminiscencia de este fósforo es verde y puede ser bien explicada en base a este modelo de bandas que predice el principal pico de emisión de la luminiscencia.

2.5 Electroluminiscencia

La electroluminiscencia (EL) es la excitación luminiscente de un material cuando se le aplica una diferencia de potencial. Este tipo de luminiscencia ha sido reportada desde la primera mitad del siglo pasado, y en general, los materiales que se han encontrado como emisores de luz se les denomina con el nombre de fósforos. La definición de la EL incluye la inducción de la luminiscencia por cualquier mecanismo que inyecte electrones o huecos al fósforo, o cualquier mecanismo que genere portadores libres de carga como resultado de la energía de una diferencia de potencial eléctrico. Se excluye a la catodoluminiscencia ya que los electrones que bombardean provienen de un campo eléctrico externo.

Se sabe que en estado sólido, la luminiscencia es originada por sistemas de impurezas en el material, llamados activadores, estos centros luminiscentes o activadores tienen distancias en el orden de distancias interatómicas. Para irradiar luz en el espectro visible, el sistema de activadores debe estar 2 eV arriba del estado no excitado [17]. Si el activador se encuentra en un estado excitado, al regreso a su estado no excitado se liberará un fotón.

El primer proceso y el más directo de EL es la ionización de campo del sistema activador, mientras que también existe otro procesos en donde es posible excitar estas impurezas y hacer que colisionen inelásticamente con electrones. Estos electrones si se aceleran con suficiente fuerza como para que obtengan energía cinética considerable, tienen bastante probabilidad de excitar o ionizar a los activadores por colisiones inelásticas. De una manera totalmente análoga, huecos pueden ser inyectados en la banda de valencia y provocar el mismo tipo de colisiones. Un tercer método se conoce que no implica un campo muy alto para la emisión EL, consta de la inserción de ambos tipos de portadores en una región particular del cristal. Puede realizarse mediante la inyección de los portadores por la superficie del cristal o con uniones **p-n** polarizadas directamente. Para el caso de un material tipo **n** el nivel de Fermi estaría por encima del nivel los centros activadores, por lo que éstos mantendrían dicho nivel ocupado. Si se inyectara un hueco en la banda de valencia y

quedara atrapado por uno de estos activadores, ionizaría el centro activador. El centro entonces atraparía electrostáticamente a un electrón de la banda de conducción y después de la relajación de dicho electrón, liberaría un fotón. Para el caso de un material tipo p , la energía de los centros activadores se encuentra por arriba de la banda de valencia y cuando un electrón sea atrapado por dicho centro, resultará en luminiscencia [17].

Para una unión $p-n$ sin potencial aplicado, excitación térmica puede resultar en inyección de portadores, por lo que puede generarse alguna corriente de fuga que resultará en emisión luminiscente, lo que indica que para uso de potencial eléctrico pequeño, la emisión sería fuertemente dependiente de la temperatura, la EL dependerá también del tiempo de vida de los portadores de carga inyectados. Otro factor que puede influir es la absorción de fotones como modulación del mecanismo de inyección de portadores. Sumando a estos factores que los fotones puedan crear portadores de carga que queden atrapados en centros activadores, creando carga espacial que facilite la conducción de la corriente, es posible realizar amplificación de luz. Un ejemplo de este tipo de mecanismo de EL se le atribuye al SiC.

Resumiendo los 3 mecanismos, se puede afirmar que estos difieren por el umbral de campo eléctrico necesario para la excitación EL, para la ionización directa de campo y excitación por impacto son necesarios campos del orden de 10^7 y 10^5 V/cm, respectivamente. Para la excitación por inyección de portadores no existe umbral de campo para la ionización y utilizado a baja energía el proceso es muy propenso a ser muy dependiente de la temperatura.

2.6 Termoluminiscencia

La teoría de la termoluminiscencia (TL) viene de hace más de 3 siglos, cuando Sir Robert Boyle reportó un trabajo llamado *“Experiments and considerations upon colours with observations on diamond that shines in the dark”* y describía cómo brillaba un diamante en la oscuridad cuando lo calentaba con su propio cuerpo. No sólo al diamante se le encontró esa propiedad, ejemplos conocidos son el cuarzo, los feldespatos, calcitas, entre otros. Una de las primeras aplicaciones de la termoluminiscencia fue fechar minerales, por lo que se estudiaron y establecieron los mecanismos de TL. Tres siglos después, en 1989, se estableció la primera ley de la termoluminiscencia, que establece que la TL del mineral es aproximadamente proporcional a la dosis a la que ha estado expuesto. Una observación importante en la TL es que si el material es calentado de nuevo, no se emitirá luz de nuevo, ya que habría que exponer al material a radiación para obtener una señal de TL.

El mecanismo básico de la TL es la estimulación térmica de luz en un semiconductor o un aislante previamente irradiado con energía ionizante, y es posible entenderlo mediante la estructura de bandas energéticas de un material aislante. Es bien conocido que en un aislante existen dos bandas de energías, la banda de valencia y la banda de conducción, se diferencian en que la banda de valencia se encuentra casi llena de portadores y la banda de conducción está casi vacía, estas bandas están separadas por una banda “prohibida” o band gap, lo que significa que no existen estados de energía permitidos entre la banda de valencia y la banda de conducción. La diferencia de energía entre bandas o el band gap tiene una energía E_g , la figura a continuación muestra el mecanismo básico de la TL en la estructura de bandas de un aislante.

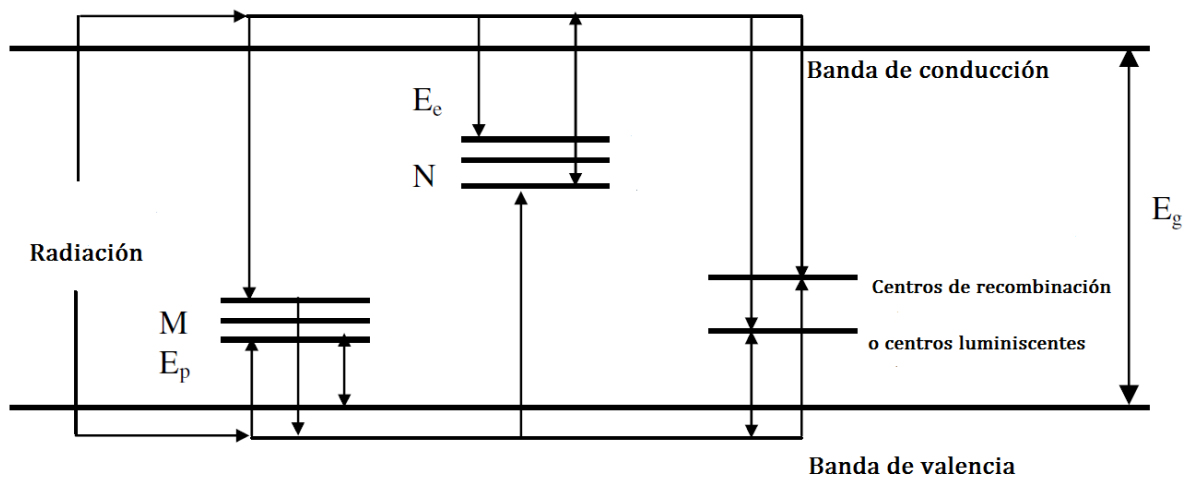


Fig. 2.6: Representación en niveles de energía para el proceso de luminiscencia térmicamente activada o termoluminiscencia. N es la concentración de trampas de electrones con energía E_e , y M la concentración total de huecos con energía E_p [18].

Es posible que existan defectos o impurezas en el material que causen estados energéticos localizados dentro de la banda prohibida, sus posiciones en los niveles energéticos dependen de la naturaleza de los defectos en la red del cristal. Estas impurezas o defectos pueden atrapar a un electrón o a un hueco y son llamados centro de electrón atrapado o centro de hueco atrapado, respectivamente. Uno de los centros de electrones atrapados más conocidos es el centro-F. Cuando el número de centros-F es suficiente, el cristal absorbe luz en un rango limitado del espectro, por lo que adquiere color. Otro tipo de imperfecciones pueden ser impurezas como iones de transición, que muchas veces explica el color particular de ciertos minerales. El color se debe a transiciones energéticas dentro de la banda prohibida.

El proceso por el cual la TL se lleva a cabo se divide en dos etapas:

Irradiación: Al momento de exponer un sólido a radiación, se producen pares de electrones y huecos libres, estos electrones viajan a través del sólido en la banda de

conducción por un periodo corto de tiempo y pueden quedar atrapados en defectos o “caer” a la banda de valencia recombinándose de forma radiativa o no radiativa con huecos o podría ser capturado también por centros luminiscentes (trampas muy profundas) que ya han sido previamente excitados con huecos. El proceso anterior es análogo para el caso de los huecos.

Calentamiento: Los electrones atrapados durante la irradiación obtienen la suficiente energía para escapar de las trampas hacia la banda de conducción, en donde pueden ser (a) re-atrapados en trampas, (b) volver a la banda de valencia y recombinarse radiativa o no radiativamente o (c) recombinarse de manera radiativa con los centros luminiscentes activados por huecos. Este último proceso corresponde a la TL [19].

Transiciones ópticas entre niveles de energía localizados dentro de la banda prohibida pueden realizarse sólo si se cumplen ciertas condiciones que dependen de la simetría del estado excitado y no excitado, además puede existir transiciones de niveles energéticos dentro de la banda prohibida hacia estados libres en la banda de conducción, lo que resultaría en una trampa vacía en el band gap. Estos electrones en la banda de conducción podrían entonces volver a caer en estas “trampas” fenómeno conocido en inglés como “*re-trapping*” (re atrapamiento). Las trampas electrónicas pueden ser definidas como defectos del material localizados en donde los electrones, ya sean de la banda de conducción o algún otro centro, pueden ser atrapados. Estos centros pueden estar llenos o vacíos.

La misma descripción se da para los centros de huecos, ya se mencionó que la banda de valencia está casi llena de electrones, sin embargo, aún existen algunos huecos, el atrapamiento y re-atrapamiento de huecos es análoga a la descrita anteriormente para los centros-F. Una gran cantidad de defectos diferentes de los dos tipos presentados anteriormente se pueden producir durante la exposición a radiación ionizante. Ejemplo de ello son los centros-F, junto con centros-V. Los centros-V se caracterizan por que absorben la parte de energía en el espectro óptico que corresponde al color violeta, razón por la cual su nombre es centro-V.

Debido a la radiación ionizante electrones de transfieren a la banda de conducción en concentraciones significantes, en este proceso se producen excitaciones a estados ligeramente más pequeños que la energía de banda prohibida, éstos son llamados *excitones*, en el proceso de de-excitación se llevan a cabo procesos donde pueden quedar desplazados iones o defectos en la red cristalina, lo que se denomina defectos inducidos por radiación. Cuando el número de defectos inducidos por radiación es pequeño, es posible aumentar éste número con mayor dosis de radiación. Para altas dosis se esperaría que la red se saturara y llegara a un valor máximo. La continua producción de electrones y huecos como resultado a la radiación ionizante es

necesaria para la creación de defectos suficientemente estables como para producir la TL.

Una trampa se caracteriza por su energía E que atrapa a un electrón que adquiere dicha energía por vibraciones de la red para pasar a la banda de conducción (y a la banda de valencia para el caso de los huecos). Existe una temperatura característica a la cual los electrones son liberados debido a las vibraciones de la red cristalina. Algunos electrones llegan a centros luminiscentes, que están ocupados por huecos, por lo que al proceso de recombinación se emite luz.

La energía de activación o profundidad de trampa E (eV) se refiere a la energía de un nivel meta estable dentro de la banda prohibida, también es llamada profundidad de trampa. Si la energía E es lo suficientemente grande como para que $E \gg kT$ donde k es la constante de Boltzmann, la carga atrapada puede durar bastante tiempo en la trampa [18]. Las ecuaciones utilizadas para describir el proceso de TL se basan principalmente en dos casos: el primero es llamado *Cinética de primer orden* y se propuso en los trabajos de Randall y Wilkins; asume que el proceso de TL tiene una fuerte tendencia a la recombinación, por lo que al calentar el material los electrones son excitados hacia la banda de conducción, en donde rápidamente se recombinan con huecos atrapados, esto conlleva que el re-atrapamiento de electrones es despreciable. El segundo se denomina *Cinética de segundo orden*. Fue propuesta por Garlick y Gibson en 1948 y toma en cuenta que el proceso dominante de TL es el re-atrapamiento de electrones en centros de recombinación, y al contrario del anterior, existe mayor probabilidad de que un electrón se re-atrape en una trampa electrónica en vez de recombinarse con un hueco en un centro luminiscente.

La expresión obtenida en el modelo general de Randall y Wilkins para la intensidad de la luz emitida en la TL es:

$$I = A_m n_c m = A_m v(T) \frac{nm}{A_N(N-n) + A_m m} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Donde: I : Intensidad de la luz emitida.

N : Número de trampas electrónicas disponibles con profundidad de trampa E_e .

n : Número de trampas ocupadas por electrones.

m : Número de trampas ocupadas por huecos.

A_m : Probabilidad de que un electrón se recombine con una trampa ocupada con un hueco.

A_N : Probabilidad de que un electrón sea re-atrapado.

$v(T) = \frac{-1}{n} \frac{dn}{dt} = s \exp(-E_e/k_B T)$: Factor de frecuencia para electrones atrapados (s).

Al considerar un comportamiento de *Cinética de primer orden*, es decir, que el proceso que domina la emisión de TL es la recombinación de electrones excitados en la banda de conducción con huecos en centros luminiscentes, podemos expresar que:

$$A_m m \gg A_N (N - n) \quad (\text{Ec. 2.4})$$

En este caso, para la intensidad de luz de TL se describe como:

$$I \approx \frac{A_m v(T) n m}{A_m m} = n v(T) = s \exp\left(\frac{-E_e}{k_B T}\right) n \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Ahora, para el caso de la *Cinética de segundo orden*:

$$A_N (N - n) \gg A_m m \quad (\text{Ec. 2.6}) \quad A_N N \gg A_N n, A_m m \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Estas condiciones se definen para que la probabilidad de recombinación de un electrón al ser excitado hacia la banda de conducción, tenga una probabilidad mucho más alta de ser re-atrapado por una trampa electrónica que por un centro de recombinación con un hueco. Es importante tomar en cuenta que $n \gg n_c$, donde n_c es la concentración de electrones excitados, ya que los electrones excitados se atrapan muy rápidamente [18].

La expresión que describe la intensidad de TL para una *Cinética de segundo orden* es:

$$I = \frac{A_N}{A_m} v(T) \frac{nn}{N-n} = \frac{A_N s}{A_m n} \exp\left(\frac{-E_e}{k_B T}\right) n^2 \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Hasta el momento no existen reportes acerca de la termoluminiscencia en el dióxido de silicio rico en silicio, este trabajo presentan los primeros resultados obtenidos de termoluminiscencia en este material con la intención de dar inicio a una línea de investigación relacionada a la termoluminiscencia estimulada de diferentes formas. Los resultados presentados son para tres diferentes maneras de excitación previa: (1) ópticamente estimulada con radiación ultravioleta (UV), (2) radiación de partículas β y (3) eléctricamente estimulada. Esta última forma de excitación es un fenómeno que no ha sido documentado anteriormente, en el cual se obtiene una señal luminosa al calentar el material después de haber sido puesto a una diferencia de potencial durante un tiempo determinado.