

Implementación de un Servicio de Dosimetría para el Personal Ocupacionalmente Expuesto de la ESFM-IPN

Yamani Hernández Apodaca

Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias; Dr. Barragán 779, Col. Narvarte Pte.
Delegación Benito Juárez, México, Distrito Federal
yamani.hernandez@cnsns.gob.mx

Alonso Álvaro Sánchez Ríos

Escuela Superior de Física y Matemáticas del IPN, Av. Instituto Politécnico Nacional Edificio 9, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Zacatenco, Delegación Gustavo A. Madero, C.P. 07738, México, Distrito Federal
asanchez@esfm.ipn.mx

Pablo Víctor Cerón Ramírez; Teodoro Rivera Montalvo

Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología Avanzada, Unidad Legaria; Av. Legaria 694, 11500, DF. México
victceronr@hotmail.com; riveramt@hotmail.com

Héctor René Vega Carrillo

Unidad Académica de Estudios Nucleares de la Universidad Autónoma de Zacatecas
C. Ciprés 10, Fracc. La Peñuela, 98068 Zacatecas, Zac. México
fermineutron@yahoo.com

Resumen

Debido a que el manejo de radiaciones ionizantes implica un riesgo para la salud, es necesario llevar un control de la cantidad de radiación que el Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE) recibe durante su trabajo diario con radiaciones ionizantes. Para este propósito existen varios tipos de dosimetría y varias empresas que proporcionan el servicio, sin embargo y aprovechando que la Escuela Superior de Física y Matemáticas del Instituto Politécnico Nacional (ESFM-IPN) posee un equipo de termoluminiscencia (TL) se optó por desarrollar un servicio de dosimetría personal para gammas, con cristales de termoluminiscentes del tipo TLD-100.

Lo que se hizo primero es una caracterización de los cristales, para lo cual se lavaron los cristales con una solución de alcohol metílico, sin frotarlos a fin de no dañarlos; después del secado, se sometieron a una temperatura de 400° C durante una hora y posteriormente se dejaron 100° C por dos horas con el objeto de borrarles la información de fondo que pudieran tener. Posteriormente se expusieron unos 200 cristales a radiación gamma proveniente de una fuente de Cobalto 60 que se tiene en la ESFM-IPN con el objeto de seleccionar los cristales que tuvieran una respuesta cuya precisión cayera dentro de una desviación estándar.

De esta caracterización se seleccionaron 80 dosímetros que presentaban mejor respuesta de acuerdo a las lecturas obtenidas así como de sus curvas de brillo. Estos cristales TLD-100 seleccionados se fueron irradiando a diferentes dosis de radiación gamma y con esas lecturas se

construyó una curva de respuesta dosis en mR contra lecturas de carga eléctrica en pico Coulombs (pCou). La curva de respuesta fue una línea recta o curva de calibración.

Como ejercicio final se tomaron algunos cristales de este lote seleccionado, se irradiaron a dosis no conocidas por la persona que realizaba las lecturas y se comprobó que los resultados eran congruentes con la curva de calibración.

Finalmente estos dosímetros fueron colocados en unos portadosímetros que para tal efecto se tenían para proporcionarlos a los POE's del área de Ingeniería Nuclear de la ESFM.

También se elaboraron guías de borrado de dosímetros, de uso del equipo y de lectura de los dosímetros.

1. INTRODUCCIÓN TEÓRICA

Las aplicaciones de la termoluminiscencia (TL) comienzan cuando Farrington Daniels y colaboradores en 1953 empiezan a estudiar el LiF en la Universidad de Wisconsin. Sin embargo tuvo que suspender su trabajo en 1956, debido a las características poco adecuadas de este material para dosimetría, ya que el LiF en su forma pura exhibe relativamente baja termoluminiscencia. En 1960 la Compañía Harshaw Chemical, en colaboración con J. R. Cameron desarrollaron el LiF de grado termoluminiscente, como TLD-100, TLD-600 y TLD-700. Esto lo lograron introduciendo al LiF impurezas de Mg y Ti. La abundancia de los isótopos Li6 y Li7 [1] se muestran en la siguiente tabla:

Tabla I: Composición isotópica de algunos fósforos de LiF.

Isótopo	TLD-100	TLD-600	TLD-700
Li ⁶	7.5 %	95.6 %	0.01 %
Li ⁷	92.5	4.4	99.99 %

El TLD-100 contiene Li en su proporción isotópica natural y no obstante que tiene algunas características desfavorables, es aún el dosímetro termoluminiscente (DTL) más popular. En este trabajo se utilizan dosímetros TLD-100. Los tres TLD enlistados anteriormente tienen un amplio uso para mediciones de campos mixtos de gammas y neutrones. El TLD-100 contiene Li en su concentración natural y responde a gammas y neutrones térmicos. Los neutrones térmicos los detecta a través de la reacción (n, α) con el Li6, el cual tiene una sección eficaz de 950 b para energías térmicas. [2]

El TLD-600 contiene litio enriquecido al 95.6 de Li6, lo cual lo hace extremadamente sensitivo a neutrones térmicos y también a gammas. El TLD-700 contiene 99.99 % de Li7, lo cual lo hace sensitivo a gammas solamente, porque la sección eficaz del Li7 para neutrones es muy pequeña

(0.037 b). En un campo mixto de neutrones y gammas, uno puede lograr la discriminación de $\alpha - n$ exponiendo al campo de radiación un TLD-100 más un TLD-700 o un TLD-600 más un TLD-700. La diferencia en respuesta entre estos dos pares de dosímetros nos dará la dosis debida solo a neutrones.

La **Luminiscencia** es un proceso que se presenta en materiales inorgánicos y orgánicos, para los primeros en forma de electrones libres y vacancias, mientras que para los segundos se da en función de la formación de radicales libres. Si el fenómeno de la luminiscencia es mantenido solamente durante la excitación del material con un tiempo de 10^{-10} a 10^{-8} segundos, se le conoce como **fluorescencia**; cuando se deja de excitar al material, este vuelve a su estado fundamental a través de la emisión de un fotón con una frecuencia menor que la de la radiación incidente, es decir, con una longitud de onda más larga [3].

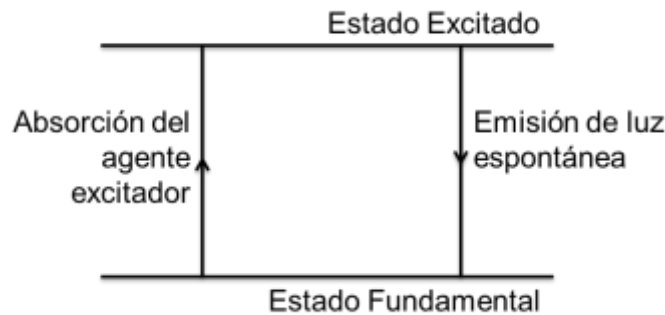


Figura 1: Fenómeno de luminiscencia

Por otro lado, si la excitación es la misma pero el regreso al estado fundamental es más lento, tomando en promedio de 10^{-2} a 10^2 segundos, el proceso es conocido como **fosforescencia**. El retraso de la llegada al estado fundamental del material es debido a estados excitados **metaestables**; dichos estados se ven superados mediante una excitación complementaria. Los estados metaestables funcionan como trampas en la que el sistema no puede liberarse hasta que adquiere cierta energía, si después de que escapar no es recapturado por el estado metaestable, el sistema regresa a su estado fundamental emitiendo un fotón.

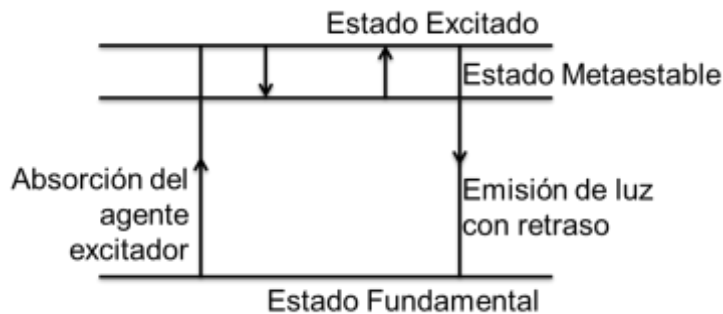


Figura 2: Fenómeno de fosforescencia

Para los cristales, se ha considerado usar el modelo de bandas, el cual define tres espacios de energías continuas y llamadas Banda de Valencia (**BV**), Banda de Prohibida (**BP**) y Banda de Conducción (**BC**). Respectivamente se refieren a los electrones de la capa externa del átomo (electrones de valencia), los estados energéticos que los electrones no pueden ocupar y estados con exceso de energía.

Previamente a la excitación, los cristales permanecen en su estado fundamental, al ser expuesto a un agente excitador, algunos electrones podrán adquirir energía suficiente para salir de su órbita en la BV y transferirse a la BC, dejando vacancias en sus posiciones iniciales.

Las existencias de alteraciones en la red cristalina son conocidas como defectos o imperfecciones. Se conocen dos tipos de defectos en los cristales:

- Defectos **Schottky**, se producen cuando un ion es desplazado de su posición normal en el arreglo cristalino hacia la superficie del cristal. Se debe hacer notar que este tipo de imperfección mantiene la neutralidad eléctrica del cristal, pues se liberan iones de signos contrarios con el fin de autocomplementarse, dejando vacancias en sus espacios de la red cristalina.

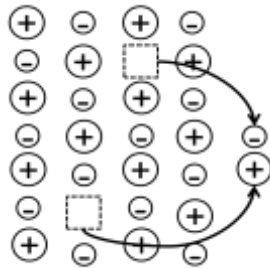


Figura 3: Defecto Schottky

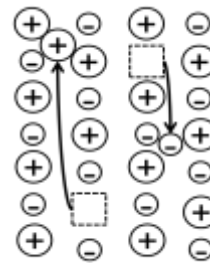


Figura 4: Defecto Frenkel

- Defectos **Frenkel**, aquí el ion es desplazado hacia una posición intersticial dentro de la red cristalina. Es más común su existencia en los cristales, lo cual le permite mayor movilidad iónica a estos sólidos. Aunque sea un solo ion el desplazado, el cristal seguirá siendo eléctricamente neutro pues no hay liberación de ningún ion.

Los defectos en la estructura del cristal favorecen la creación de niveles locales de energía metaestables en la banda prohibida, los cuales está “permitido” que ocupen los electrones. Si el agente excitante del cristal es la radiación ionizante, ésta produce los electrones libres y sus respectivos agujeros. Los electrones viajan a través del arreglo cristalino hasta que son atrapados por las imperfecciones por medio de atracción o repulsión coulombiana, llegando a este punto se forman **Centros de Color**.

El centro de color [4] es una configuración electrónica originadas por defectos de la red cristalina que permite al cristal absorber longitudes de onda en las que normalmente es transparente, haciendo ver que el cristal está coloreado. Los posibles centros de color son [5]:

- **Centro F**: un electrón atrapado en una vacancia de ion negativo.
- **Centro F'**: dos electrones atrapados en una vacancia de ion negativo.
- **Centro V_F**: un agujero colocado en la vacancia de un ion positivo.
- **Centro M**: agrupación de dos centros F.
- **Centro R**: agrupación de tres centros F.
- **Centro N**: agrupación de cuatro centros F.

La creación de centros de color se puede provocar por medio de la inducción de estados metaestables agregando impurezas a la red cristalina. En el caso de los cristales utilizados a lo largo de este estudio, su estructura básica es de LiF mientras que las impurezas son pequeñas cantidades de Mg y Ti conocidos también como activadores.

La luminiscencia recibe nombres particulares dependiendo del agente excitador que se esté utilizando, en este caso, al ser la radiación ionizante dicho agente se le dará el nombre de **Radioluminiscencia**. Si el medio utilizado para liberar los electrones atrapados en las imperfecciones es la energía térmica, es denominado **Radiotermoluminiscencia**, o más comúnmente, como termoluminiscencia (TL).

El proceso termoluminiscente [6] es fácilmente explicado por medio del **modelo de bandas**, el cual se divide en dos etapas: la ionización acompañada de la captura de electrones o agujeros, y la recombinación de los electrones o agujeros. Se le denomina agujero a la vacancia dejada por un electrón, que al igual que este, puede viajar a lo largo de la red cristalina.

La radiación ionizante es absorbida en el material y se producen electrones libres, esto es equivalente a decir que los electrones de la BV son transferidos a la BC. En esta banda, los electrones son libres de desplazarse por el cristal hasta que son atrapados por las imperfecciones en la BP.

Estas capturas de electrones o agujeros forman centros de color. Algunos agujeros son térmicamente inestables y decaen rápidamente a temperatura ambiente. Los electrones atrapados permanecerán en sus trampas hasta que adquieran suficiente energía para escapar, lo cual a su vez se determina por la profundidad de las trampas y la temperatura del material. Cuando ésta se eleva, los electrones se liberan y recombinan con agujeros formando **centros luminiscentes L**, mientras que el exceso de energía es irradiado como fotones en rangos UV y luz visible.

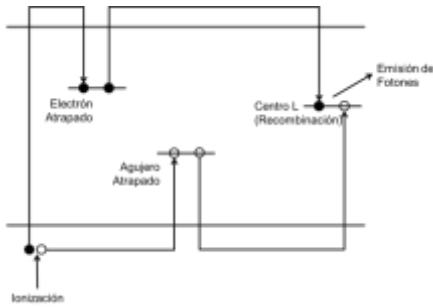


Figura 5: Modelo de bandas del proceso termoluminiscente

2. DESCRIPCION DEL EQUIPO Y MATERIALES USADOS

El equipo de lectura para los dosímetros es un equipo de la marca Harshaw, Modelo 2000-A y 2000-B como el mostrado en la figura 6-a. y 6-b.



Figura 6-a: Equipo de termoluminiscencia, marca Harshaw, modelo 2000-A y 2000-B

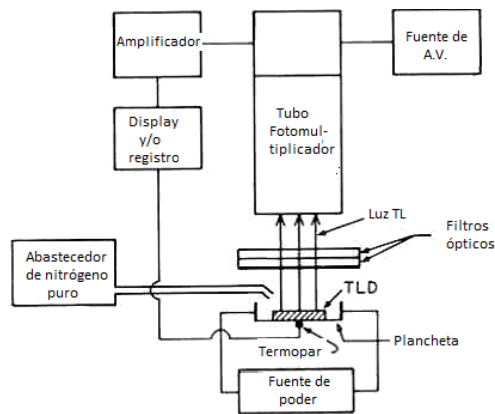


Figura 6-b: Esquema de funcionamiento del sistema lector de TL.

Para el borrado de los cristales se utilizaron: un horno de fabricación casera, capaz de alcanzar una temperatura superior a los 400 ° C como el que se muestra en la figura 7 y otro horno comercial cuya temperatura máxima es de 250 ° C, mostrado en la figura 8.



Figura 7: Horno de fabricación casera



Figura 8: Horno comercial,

En la figura 2 se puede notar que la temperatura se controla con la variación de un reóstato o variac y que la temperatura se mide con un termómetro de mercurio de 0° C a 400° C

Los cristales TLD-100 y los portadosímetros se aprecian en la figura 9:



Figura 9: Cristales TLD-100 y portadosímetro



Figura 10: Graficadora

3. PROCEDIMIENTOS UTILIZADOS Y RESULTADOS

El primer paso para el comienzo de las actividades de este trabajo fue la limpieza de los cristales TLD-100. Se comenzó eliminando el polvo acumulado con un baño de alcohol metílico y se dejaron secar a temperatura ambiente. El siguiente paso realizado fue el calentamiento para eliminar toda carga acumulada por causa de la radiación de fondo, para lo cual se colocaron los cristales dentro de un horno a 400°C durante dos horas, dejándolos enfriar después a 100°C durante dos horas y se concluyó con el descenso de temperatura hasta el nivel ambiental ~25°C*.

Los cristales se acomodaron en arreglos de 5x5, 3x3 y 2x2 para ser irradiados con una fuente de ^{60}Co , con una actividad de 250.86 MBq (6.78 mCi), a distintas dosis a fin de obtener puntos para una curva de calibración.

Para realizar la lectura de los cristales, se ingresan individualmente en el equipo Harshaw. Los parámetros del equipo se establecieron de forma que haya un precalentamiento hasta $\sim 80^\circ\text{C}$, un incremento lineal de la temperatura desde esta hasta 300°C donde la integración se realiza entre 150 y 250°C ; el tiempo total del procedimiento es de 30 segundos. Se espera a que baje la temperatura hasta menos de 80°C para extraer el cristal y colocar el siguiente.

Los datos obtenidos experimentalmente para trazar la curva de calibración se muestran en la siguiente tabla y gráfica.

Tabla II: Datos obtenidos para la curva de calibración

$X(\text{mR})$	5	10	20	30	40	50
$Q(\text{pCou})$	80	112.5	161.75	220	275.5	332.75
	87	105	171	216	274	317.75
	93	111.75	168.25	230	280	315.9
	92	108.75	170.5	225	289.25	328.8
$Q(\text{pCou})$						
<i>promedio</i>	88	109.5	167.875	222.75	279.6875	323.8
<i>Desv. Stand</i>	5.94418483	3.40954542	4.25489914	6.07590871	6.86590307	8.24853522
<i>Promedio</i>	88 ± 5.94	109.5 ± 3.40	167.87 ± 4.25	222.75 ± 6.97	279.68 ± 6.86	323 ± 8.24

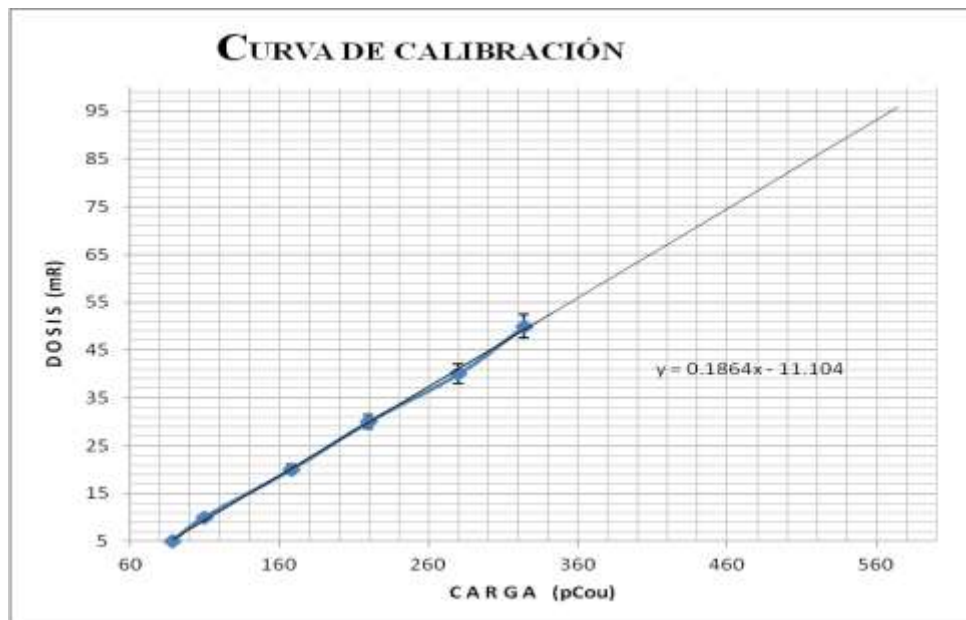


Figura 11: Curva de calibración del sistema TL

Posteriormente se colocaron cuatro cristales TLD-100 en portadosímetros como los mostrados en la Figura 9 y se irradiaron a dosis de 8, 25 y 45 mR para comprobar los resultados obtenidos mediante la curva de calibración y las dosis calculadas teóricamente, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla III y la figura 12.

Tabla III. Datos de exposición “desconocida”

X (mR)	8	Exp.	Err (%)	25	Exp	Err. (%)	45	Exp	Err (%)
Q(pCou)	107	8.84	10.5	199	25.98	3.9	289	42.76	4.9
	115	10.33	29.5	193	24.87	0.5	324	49.28	17.15
	99	7.34	8.1	186	23.56	5.7	305	45.74	1.6
	109	9.21	15.1	186	23.56	5.7	299	44.62	0.8
Promedio	107.25±6.55	8.88	11	191±6.27	24.49	2	304.25±14.72	45.56	1.2

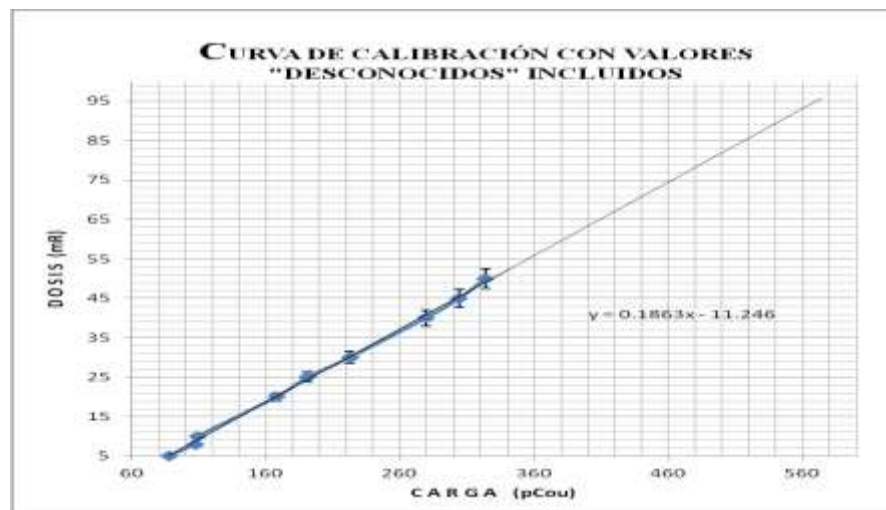


Figura 12: Curva de calibración con datos de exposiciones “desconocidas” incluidas

Como tanto en la curva de calibración como en la curva de la Figura 12 se graficaron los promedios se ve que la curva experimental coincide bastante bien con la línea de ajuste, sin embargo en los resultados parciales se puede observar que hay lecturas cuyos errores son grandes especialmente a dosis bajas. Algunos comentarios al respecto los encontraremos en las conclusiones.

En estas gráficas se incluyeron banderas de error de un 5 %, las cuales pueden verse en las figuras anteriores, lo cual nos indica que la incertidumbre de nuestros resultados está por debajo de este porcentaje.

Cabe mencionar que tuvimos problemas con el cambio automático de escala de lectura de los dosímetros, pero en el rango de cero a 60 mR no tuvimos problemas. Además consideramos que

los POE's y nuestros estudiantes difícilmente alcanzarán esas dosis debido a la baja intensidad de las fuentes radiactivas que se manejan en los laboratorios.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- Aunque los dosímetros TLD-100 tienen un rango útil desde mR hasta 3×10^5 R [7], según nuestros resultados vemos que nos serán de utilidad para el rango de dosimetría que pretendemos dar a los estudiantes de los Laboratorios de la ESFM-IPN donde se utilizan radiaciones ionizantes.
- Habrá que realizarse una caracterización más estricta del lote a utilizar a fin de que los resultados de los cristales en cada portadosímetro sean más uniformes y con eso reducir el error de los resultados parciales.
- Consideramos que es un tanto normal que el error sea mayor a bajas dosis, pero estamos hablando de dosis debajo de 0.1 mSv (10 mrem). Como los dosímetros se espera leerlos cada mes, las dosis que esperamos debido a las actividades de las fuentes que manejan nuestros estudiantes serán muy bajas, por lo que no constituirán un riesgo para la salud de los usuarios.
- Para la ESFM-IPN sin embargo es importante poder contar con un servicio propio de dosimetría a fin de cumplir con la reglamentación de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias.
- Una vez que se haya revisado el equipo para poder leer sin problemas dosis más altas, lo haremos, además de medir dosis debidas a neutrones, mediante la utilización de cristales TLD-600 y TLD-700.
- Como conclusión final podemos decir que de acuerdo a los recursos con que contamos en el área de Ingeniería nuclear de la ESFM-IPN respecto al equipo, ya estamos listos para que durante el próximo semestre a iniciar podamos dar el servicio de dosimetría gamma al personal ocupacionalmente expuesto y a los estudiantes de los Laboratorios de Ingeniería Nuclear donde se manejan radiaciones ionizantes.

REFERENCIAS

1. R. Cameron, N. Suntharalingam, G. N. Kenney.”, *Thermoluminescent Dosimetry*”, The University of Wisconsin Press, Madison, Milwaukee, 1968.
2. Nicholas Tsoufanidis. “*Measurement and Detection of Radiation*”, Second edition. Taylor and Francis Publishers. 1995
3. Curie D. “*Luminiscence in crystals*”. Methwen, London, 1963.
4. Fowler W. V. *Physics of Color Centers*” Academic Press, New York, 1968.
5. Klick C. C. et all. “*TL and Color Center*” **J. Appl. Phys.** **38**, **3867**, 1977.
6. Glenn F. Knoll. “*Radiation Detection and Measurement*”. Second edition. John Wiley and sons. New York, 1977.
7. The Harshaw Chemical Company. *Instruction manual of models 200-A Thermoluminescence Detectors*.