

El estudio del daño radiacional en los materiales en el Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN)

📧 Carlos M. Cruz Inclán, 📧 Antonio Leyva Fabelo

Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN). Calle 30 Esq. 5ta Ave. Miramar, Playa, La Habana.
aleyva@ceaden.edu.cu; antonioleyvafabelo@gmail.com

Resumen

El Laboratorio de Daño del Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN) acumula más 30 años de experiencia en las investigaciones en la temática del daño radiacional en los materiales. Por la mira del grupo han pasado multitud de blancos: superconductores de altas temperaturas, diferentes nanoestructuras, semiconductores clásicos y avanzados, perovskitas, dispositivos detectores de radiaciones, etc. Fuentes de rayos gamma, electrones de altas energías, iones pesados, etc., han sido empleadas en las investigaciones. Múltiples técnicas de caracterización y simulación, modernas metodologías de cálculo han estado en las manos de los especialistas para hacer su trabajo. Centenares de publicaciones y participaciones en eventos científicos, cuatro Premios Nacionales de la Academia de Ciencias de Cuba (ACC), dos medallas Carlos J. Finlay, entre otros, más una encomiable labor docente, son parte de los resultados del colectivo. Una muy resumida historia de esta trayectoria científica dentro de la línea de trabajo de este Laboratorio es presentada en este trabajo.

Palabras clave: daño radiacional, desplazamientos atómicos, superconductores, semiconductores, nanoestructuras, simulación matemática

The study of radiation damage to materials at the Center for Technological Applications and Nuclear Development (CEADEN)

Abstract

The Damage Laboratory of the Center for Technological Applications and Nuclear Development (CEADEN) accumulates more than 30 years of experience in research on the subject of radiational damage to materials. A multitude of targets have passed through the group's sights: high-temperature superconductors, different nanostructures, classical and advanced semiconductors, perovskites, radiation detection devices, etc. Gamma ray sources, high energy electrons, heavy ions, etc., have been used in investigations. Multiple characterization and simulation techniques, modern calculation methodologies have been in the hands of specialists to do their job. Hundreds of publications and participation in scientific events, four National Awards from the Cuban Academy of Sciences (ACC), two Carlos J. Finlay medals, among others, plus commendable teaching work, are part of the results of the group. A very summarized history of this scientific trajectory within the line of work of this Laboratory is presented in this work.

Key words: radiation damage, atomic displacement, superconductors, semiconductors, nanostructures, mathematical simulation.

Introducción

El efecto de la radiación ionizante sobre los materiales, conocido como daño radiacional (DR), puede conducir a la degradación de sus propiedades mecánicas, eléctricas, ópticas, etc., llevando a su deterioro e incapacidad de correcto desempeño en la aplicación donde se encuentra. Sin embargo, también se ha demostrado

que, bajo determinadas condiciones, los efectos de las radiaciones pueden tener un resultado contrario, potenciando la optimización de la estructura del blanco, que conduce a una manifestación más eficiente de algunas de sus propiedades.

El conocimiento de la resistencia a la radiación de los materiales semiconductores, nanoestructurados, superconductores, etc., garantizará que éstos se

puedan emplear de forma segura en las aplicaciones médicas, científicas o industriales que las requieran, a la par de que faciliten el desarrollo de nuevos y más útiles materiales.

El Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN) desde el año 1990 tiene en su Departamento de Física un colectivo de especialistas de las ramas nucleares y de la ciencia de los materiales que orientaron sus esfuerzos científicos al estudio del DR en materiales sólidos de interés nuclear. Hasta el día de hoy estos colegas desarrollan investigaciones teóricas y experimentales en este campo con blancos que van desde cerámicas superconductoras de alta temperatura crítica (SCAT), hasta avanzados materiales semiconductores como el GaAs:Cr empleado en la fabricación de detectores.

Este trabajo pretende hacer un muy resumido recorrido por las principales actividades que ha realizado este colectivo de especialistas, mostrando algunos de sus resultados.

Materiales y métodos

Los superconductores de altas temperaturas críticas (SCAT) fueron el primer material estudiado por los especialistas de DR del CEADEN. Sus potencialidades para el transporte económico y sin pérdidas de muy altas corrientes, imprescindible en las ciencias nucleares, despertaron el interés hacia ellos. El $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO), sintetizado en el propio CEADEN [1], fue el SCAT masivo más profusamente estudiado, aunque también se investigaron sus capas gruesas, cerámicas de $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+y}$ y otros.

Una vez que el CEADEN logró dar sus primeros pasos en el campo de las nanociencias al sintetizar nanocarbón (NCC) [2], estas y otras formas alotrópicas del carbono pasaron a ser también blancos de los estudios del DR.

En colaboración con el Instituto Unificado de Investigaciones Nucleares (IUIN) de Rusia, se estudió la resistencia a la radiación de un grupo de detectores híbridos. Estos detectores estaban destinados a la realización de experimentos de Física de las Altas Energías y aplicaciones de imagenología médica y otras. Entre los materiales sensores de esos detectores se seleccionó el arseniuro de galio compensado con cromo (GaAs:Cr) [3], al ser el más prometedor, pero también se estudiaron el CdTe y los clásicos Si y Ge, etc.

Otros materiales que en distintos momentos fueron objeto de los estudios sobre el DR en el CEADEN se pueden mencionar al silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H), las perovskitas ferralíticas, los cristales centelleadores, etc.

Los blancos de las investigaciones siempre se irradiaron a temperatura ambiente. Como fuentes de rayos gamma se emplearon las dos cámaras gammas ^{60}Co MPX- γ -25M e ISOGAMMA-LLCo del CEADEN, y algunas fuentes patrones, como las de ^{57}Co y ^{137}Cs .

Como fuente de electrones se utilizó el acelerador lineal LINAC-200 de IUIN con una energía de salida de

aproximadamente 20 MeV, mientras que el ciclotrón U-400M de esa misma Institución se empleó para irradiar los blancos con iones pesados de ^{22}Ne acelerados hasta energías de 77 y 158 MeV.

Para la caracterización galvanomagnética se utilizaron métodos clásicos como el de Kelvin y la susceptibilidad magnética dinámica. También se midieron las características voltampéricas, capacitancia vs. voltaje, eficiencia de colección de cargas, y otras propiedades de los detectores, siempre en función del tipo, energía y dosis de radiación.

Para los estudios microestructurales se emplearon la Difracción de Rayos X (DRX), la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y la Espectroscopía Raman.

Como herramienta complementaria se empleó la simulación matemática de los procesos físicos. Para eso se utilizaron sistemas de códigos profesionales, como el MCNPX [4] y el SRIM-2013 [5], de conjunto con programas propios.

Entre estos últimos se contó con el MCCM (Método Clásico asistido por Monte Carlo) para el cálculo de las distribuciones del número de desplazamientos por átomos (*dpa*) en materiales sólidos [6]. Este programa hace uso de las teorías de dispersión elástica de los electrones y de las salidas del sistema de códigos MCNPX, permitiendo incluir el aporte de los positrones en los cálculos y analizar la contribución de cada especie atómica.

También se desarrolló y utilizó en las investigaciones una nueva metodología denominada "Simulación de Desplazamientos Atómicos mediante el Método de Monte Carlo" (MCSAD) [7] en la que se hace énfasis en simular y realizar el muestreo estadístico del proceso de formación de los *dpa* durante el transporte de las radiaciones gamma y electrónica.

Otras metodologías teóricas se emplearon ampliamente, como la Dinámica Molecular (DM) y la Teoría del Funcional de Densidad (DFT).

Algunos resultados obtenidos

Las muestras de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, cerámica SCAT por excelencia, al ser expuestas a las radiaciones gamma revelaron que, en general, a bajas dosis y para diferentes energías de la radiación, tienen una respuesta sistemática y característica [8]. Se esclareció que a nivel intragranular se inducen efectos positivos que fortalecen los mecanismos de la superconductividad. Este efecto resulta simultáneamente modulado por una acción radiacional que debilita las junturas de Josephson, lo que trae como consecuencia un detrimento sistemático de las propiedades extrínsecas de transporte.

La figura 1(a) presenta la dependencia de la temperatura crítica, T_c , con la dosis de exposición para dos muestras. La T_c del material crece con la dosis hasta un valor máximo, tras el cual, comienza a caer de forma continua. El pico de T_c ocurre para una dosis ubicada entre los 100 y 200 kGy. Esta acción peculiar de la radiación gamma sobre los SCAT se sustenta principalmente en dos efectos: el relacionado con la demostrada capacidad de los rayos gamma de estimular la reorganiza-

ción de la estructura cristalina del material; y el asociado a la intensificación de los movimientos difusivos de las vacancias de oxígeno inducida por la interacción de la radiación electrónica secundaria con el material.

La dependencia de los parámetros de la red con la dosis en una de las cerámicas se presenta en la figura 1(b), y corrobora la capacidad de las radiaciones del ^{60}Co , a bajas y medianas dosis, de facilitar el reordenamiento de los oxígenos estructurales, proceso que conduce a la uniformidad cristalina de las cadenas Cu-O. Alcanzada la estructura termodinámicamente más estable, cualquier incremento de la dosis conlleva a un sobredopaje de defectos que modifica la estructura negativamente.

El estudio de las nanoestructuras se inició con el empleo de la MEB, orientada a un grupo de muestras de NCC, detectándose que estas eran inhomogéneas [9], pues además de las NCC se observaban la presencia de NTC simples y de paredes múltiples, carbono amor-

fo, etc. Luego de la exposición a las radiaciones gamma aparecían evidencias de un fenómeno de ruptura en los nanotubos presentes, con la consiguiente reducción de su longitud.

La dependencia de R vs. dosis en las NCC mostró un incremento inicial que alcanzó un valor máximo ubicado entre 100 kGy - 140 kGy, seguido de una caída monótona en el resto del intervalo de dosis (figura 2 (a)). Este comportamiento es consecuencia de la competencia entre los procesos de generación de nuevos defectos puntuales, su aniquilación y la formación de defectos más complejos que conducen al fortalecimiento de las uniones entre las nanopartículas presentes en la muestra. Las mediciones V-I para varias dosis, figura 2 (b), confirman que las propiedades de conducción de las muestras mejoran cuando la dosis de irradiación sobrepasa cierto valor umbral, manifestándose una transición de la conductividad eléctrica del tipo semiconductor al tipo metálico.

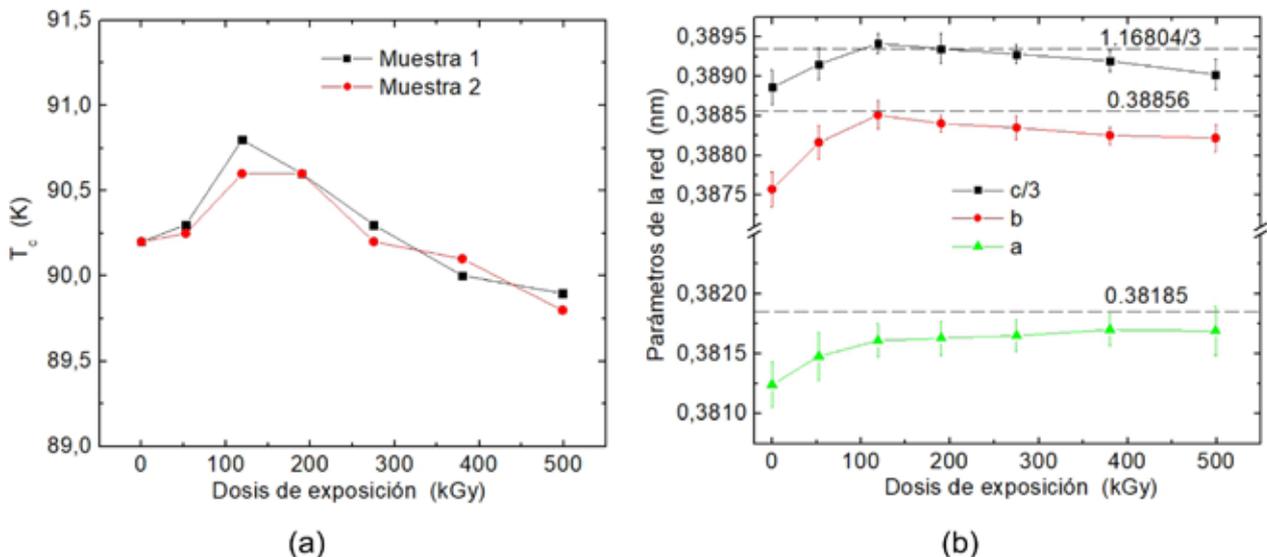


Figura 1. Dependencia de la T_c (a) y las dimensiones de la celda elemental (b) con la dosis de exposición en cerámicas de YBCO irradiadas con ^{60}Co .

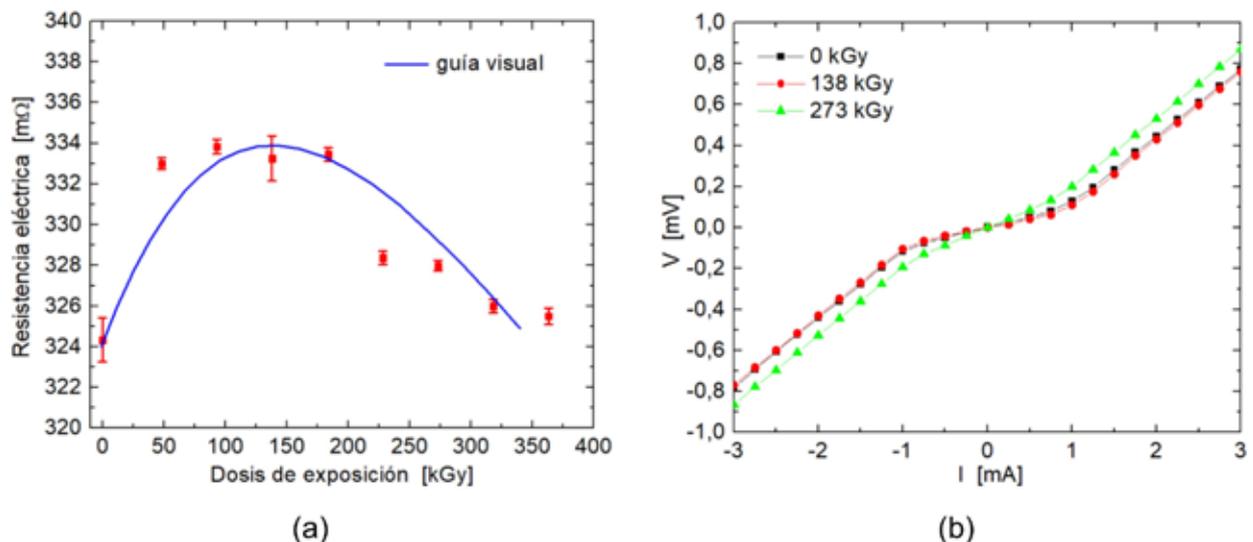


Figura 2. Dependencias de la resistencia eléctrica con la dosis (a), y de V-I para diferentes dosis de exposición (b) en muestras de nanocebollas de carbono.

La espectroscopía Raman ha resultado muy útil, por ejemplo, para estudiar el DR en los semiconductores, entre los que estuvo el GaAs:Cr. Las muestras de este material, base para la fabricación de detectores avanzados, fueron expuestas a los rayos gamma del ^{60}Co y a un haz de electrones de 20 MeV, y se analizaron mediante esta técnica. Un ejemplo de los espectros Raman tomados antes y después de la irradiación electrónica en una misma muestra se presenta en la figura 3(a).

Aunque a simple vista se aprecian sensibles diferencias, la deconvolución de los espectros (figura 3(b)), mostró que en el material estaban teniendo lugar significativos procesos estimulados por la radiación que conducen a la relajación del estado tensional de la estructura, al incremento de la cristalinidad, y a la disminución de la concentración de portadores libres, que en algunos casos llegó a ser del 2.31 % [10]. Los cambios observados deben estar relacionados con la generación de defectos de tipo Frenkel en la subred del arsénico, y a cambios radiacionalmente estimulados en la cantidad y características de defectos preexistente de mayor complejidad.

Se utilizaron también métodos galvanomagnéticos para caracterizar algunos detectores semiconductores, como el basado en GaAs:Cr, estudiándose la dependencia con la dosis recibida de importantes características como I-V y C-V. Los gráficos presentados en las figuras 4(a,b) muestran el comportamiento de estas dos características para diferentes valores de dosis de exposición al haz de electrones de 20 MeV [11].

Se aprecia la presencia de una ligera asimetría en I-V, más pronunciada a más altas dosis, que probablemente esté relacionado con la distribución asimétrica de potencial dentro del dispositivo, y que se modifica con el DR. Estas mediciones mostraron que la corriente de fuga aumentó de 3 a 7 veces con las dosis máximas alcanzadas, y puede ser debido a la introducción de daños por desplazamiento en el material, correspondientes a defectos primarios y complejos que conducen a la formación de nuevos niveles profundos en la banda prohibida.

En otro experimento, detectores Timepix con sensores GaAs:Cr y de Si fueron expuestos a haces de iones de neón de energías 77 y 158,4 MeV [12]. Se con-

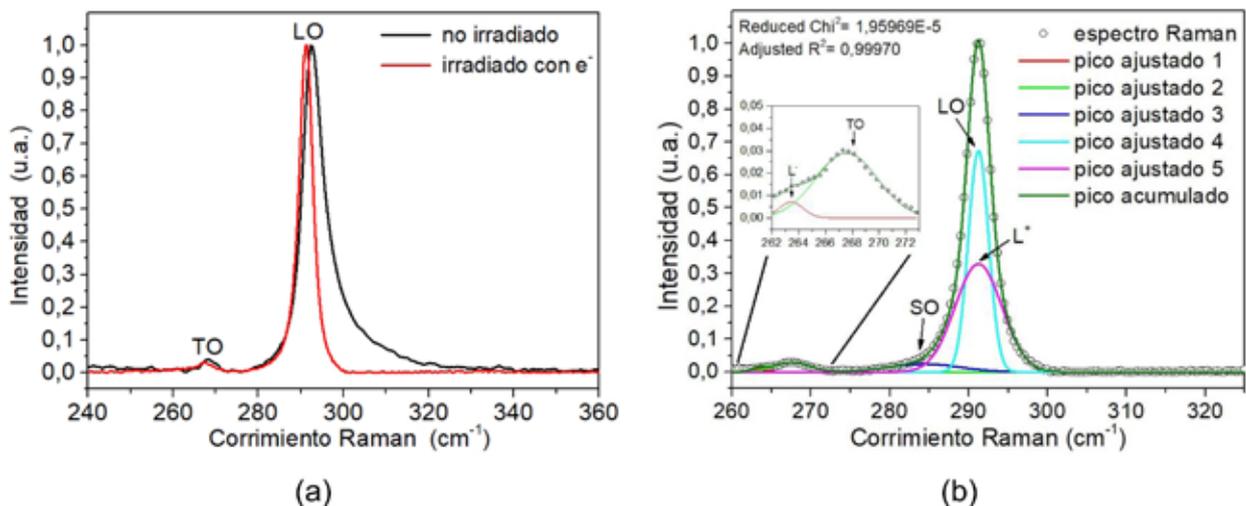


Figura 3. Superposición de los espectros Raman del GaAs:Cr antes y después de ser expuesto a electrones de 20 MeV (a), y espectro resuelto de la muestra irradiada (b).

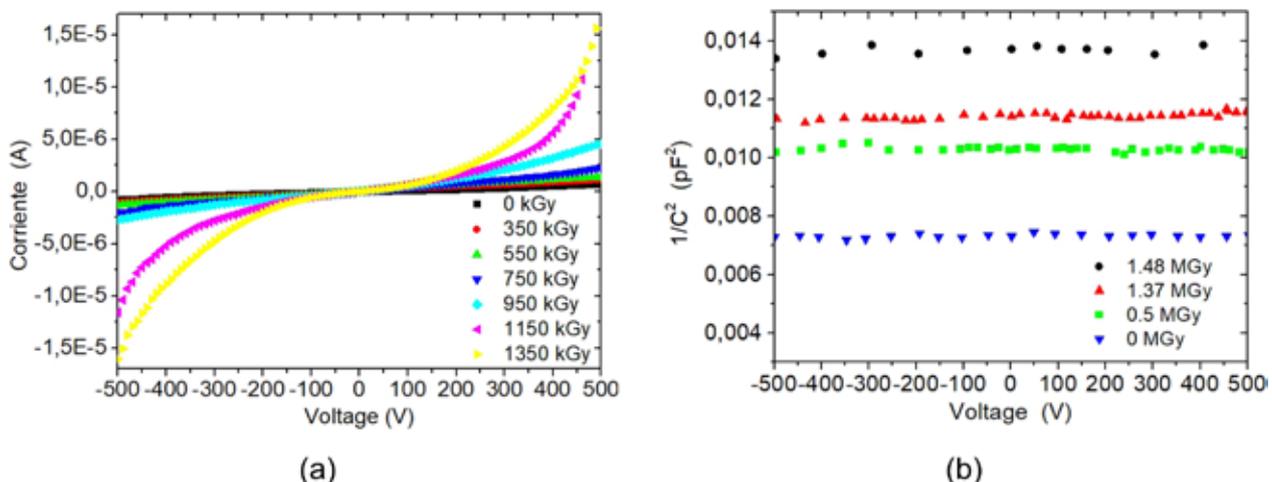


Figura 4. Característica volt-amperimétrica (a) y dependencia de la capacitancia con la tensión (b) para diferentes dosis de exposición en un detector de barrera de GaAs:Cr.

firmó la aparición del conocido como “efecto volcán” en el detector con sensor Si (tipo np), aunque estuvo absolutamente ausente en Timepix con sensor GaAs:Cr. Este fenómeno no se asocia a un posible DR, sino a efectos internos electrónicos vinculados con la protección para cargas de entrada muy altas en modo de recolección de huecos. Se empleó el sistema de códigos SRIM-2013 para calcular el alcance de los iones de ^{22}Ne para ambas energías en los dos blancos, y se estimó que en todos los casos más del 99.5 % de la energía depositada se pierde en procesos vinculados a la ionización, mientras que a la producción de daño en el material apenas va entre el 0.01 y el 0.008 %.

Múltiples trabajos teóricos y las dos metodologías desarrolladas en el Laboratorio (MCCM y MCSAD) han permitido evaluar en detalles el DR en un amplio espectro de materiales con resultados novedosos en este campo. Estos procedimientos posibilitaron calcular las energías umbrales de desplazamiento, T_d , para los átomos blanco, estudiar las secciones eficaces de producción de dpa , evaluar las distribuciones de los dpa con la profundidad y energía incidente, estimar los aportes de los sitios cristalinos y de cada especie atómica a los dpa , etc.

Las siguientes imágenes presentadas en la figura 5 son ejemplos de estas investigaciones. Por medio de los flujos de energía de partículas secundarias calculados con el MCNPX para detector GaAs:Cr de 900 μm , se pudo determinar con el código MCCM la distribución del número dpa , como se muestra en el ejemplo de la figura 5(a), para diferentes energías de fotones incidentes y para cada tipo de átomo [13]. Estas dependencias muestran que los perfiles de N_{dpa} aumentan con la energía del fotón, destacándose que con el aumento de la energía hasta los 6 MeV la cantidad de dpa correspondientes a los átomos de Ga y As se acercan entre sí; a partir de entonces la relación permanece inalterable.

La figura 5(b) presenta la distribución con la profundidad del número de vacancias calculado con el código SRIM, modelando la implantación de Mn^+ en un blanco de perovskita BaTiO_3 , a 250 keV [14]. La originalidad de esta simulación consistió en emplear para las diferentes especies atómicas las T_d calculadas aplicando los con-

ceptos de DM y DFT. Los resultados fueron comparados con ensayos similares reportados en la literatura.

Las siguientes referencias generales son el compendio de los trabajos más importantes del colectivo dedicado al DR en el CEADEN, y que por déficit de espacio no han podido ser presentados en estas páginas [6,8,15-19].

Finalmente se destaca que como resultado de las investigaciones en DR del CEADEN en el periodo 1990 al 2023 se publicaron 135 artículos científicos en diversas revistas, 1 capítulo de un libro [20], se presentaron 185 ponencias en eventos varios, y defendieron 42 Tesis de Licenciatura en Física Nuclear, tres Tesis de Maestría y tres Tesis de Doctorado [6, 8, 15], y se diseñó e imparte una asignatura docente vinculada a la temática del DR en el InSTEC. El Laboratorio fue distinguido con cuatro Premios de la ACC [15-19] y sus dos investigadores principales recibieron la Orden Carlos J. Finlay.

Los efectos de las radiaciones nucleares sobre las propiedades de los materiales sólidos continúan siendo de gran interés científico y tecnológico. Mantiene plena vigencia la necesidad del hombre de conocer en detalles el comportamiento de los materiales en los ambientes radiacionalmente agresivos donde se encontrarán. Bien puede ser en la imagenología médica, en la industria de la microelectrónica, la esterilización de productos, la nucleoenergética, las investigaciones básicas del micromundo, etc. Y no solo es imprescindible conocer cómo será el desempeño y la resistencia a las radiaciones de los diferentes materiales, sino que también estamos convocados a emplear eficientemente sobre ellos la llamada “ingeniería asistida por defectos”, posibilidad fascinante de modificar conscientemente las propiedades de un material bajo el efecto de las radiaciones.

En este contexto, la larga experiencia en el tema acumulada por los especialistas del CEADEN, y la pericia de éstos para dirigir sus esfuerzos a cualquier material que se entienda y constituya interés de la institución, la AENTA o el país, hacen que se cuente con una fortaleza única en Cuba apta para hacer frente a la tarea en la temática, por compleja o futurista que pueda parecer.

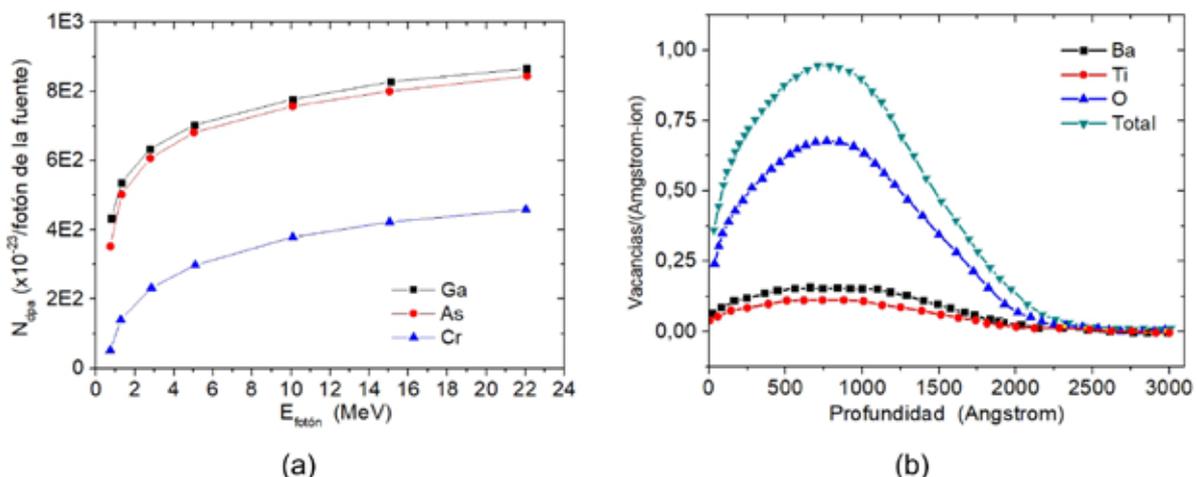


Figura 5. Dependencia del número de dpa con la energía de los fotones incidentes para cada especie de átomo en una muestra de GaAs:Cr (a), y distribución del número de vacancias con la profundidad para muestra de SrTiO_3 implantada con Mn^+ (b).

Conclusiones

El Laboratorio de DR del CEADEN durante más de treinta años de existencia ha tenido una trayectoria constante y fructífera en resultados, algunos de ellos expuestos muy brevemente en este trabajo. El núcleo del colectivo permanece activo y en su haber tienen más de 135 publicaciones, 185 ponencias en eventos, cuatro Premios de la ACC y otros altos estímulos, además de una muy amplia actividad docente. Indiscutiblemente, el CEADEN cuenta con una fortaleza humana única en Cuba apta para continuar acometiendo cualquier tarea en la temática.

Agradecimientos

Los autores queremos reconocer y agradecer la participación en las investigaciones aquí referidas a un grupo de colegas del CEADEN y estudiantes del InSTEC que en su momento contribuyeron decisivamente a la obtención de los resultados. Son ellos Ibrahim Piñera, Yamiel Abreu, Camilo Demyedenko, Eduardo González, Arturo Rodríguez, Adriana Torres, y otros. Igualmente agradecemos a los colegas del IUIIN que intervinieron en algunas de las investigaciones sobre el tema del DR que aquí se expusieron, destacando a Uladzimir Kruchonak, Said M. Abu Al Azm, Aleksei Zhemchugov y Piotr Smolyanskiy.

Referencias bibliográficas

- LEYVA A, CRUZ C, ARAGÓN B, SUÁREZ JC, MORA M. Obtención de cerámicas superconductoras con el empleo de reactivos cubanos. Optimización del método de síntesis. Reporte de la Comisión de Energía Atómica de Cuba. CEAC-R 1/91. p. 1-11.
- DARIAS J, CARRILLO E, CASTILLO R, ARTECHE J, et al. Sistema de descarga de arco sumergida para la síntesis de nanooxidos de carbono multicapas. Revista Cubana de Física. 2011; 28(1): 2-3. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00411-7>.
- AZENSHTAT GI, BUDNITSKY DL, KORETSKAYA OB, NOVIKOV VA, et al. GaAs resistor structures for X-ray imaging detectors. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2002; 487: 96-101. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)00951-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)00951-8).
- WATERS LS, MCKINNEY GW, DURKEE JW, FENSIN ML, et al. The MCNPX Monte Carlo Radiation Transport Code. AIP Conference Proceedings, 2007; 896(1): 81. <https://doi.org/10.1063/1.2720459>.
- ZIEGLER JF, ZIEGLER MD and BIERACK JP. SRIM the stopping and range of ions in matter. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2010; 268(11-12): 1818-1823. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2010.02.091>.
- PIÑERA I. Simulation of atom displacements distribution profiles induced by photons and electrons in solid materials [tesis doctoral]. Departamento de Física, Universidad de Amberes, Bélgica. Abril, 2014. Identifier: c:irua:116687. <https://hdl.handle.net/10067/1166870151162165141>.
- CRUZ CM, PIÑERA I, CORREA C, ABREU Y, et. al. MCSAD: Monte Carlo simulation of atom displacements induced by fast electrons in solids. IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. Valencia, Spain, 2011; RTSD.S-282: 4622-4626. DOI: 10.1109/NSSMIC.2011.6154746
- LEYVA A. Efectos de las radiaciones gamma sobre cerámicas superconductoras de interés en las tecnologías nucleares [tesis doctoral]. Facultad de Física, Universidad de La Habana. Cuba. Abril, 2014.
- LAGE J, LEYVA A, TOLEDO C, PIÑERA I, et. al. Electrical resistance behavior with gamma radiation dose in bulk carbon nanostructured samples. Proceedings of the XIV Workshop on Nuclear Physics and VIII International Symposium on Nuclear and Related Techniques. WONP-NURT'2013. Havana, Cuba. February 5-8, 2013. Identifier: PS-RP24: 141-144. ISBN 978-959-7136-98-9.
- LEYVA A, LEYVA D, RUBIERA JA, CRUZ CM, et. al. Study by Raman Spectroscopy of the induced radiation damage in GaAs:Cr exposed to 20 MeV electron beam. Revista Cubana de Física. 2021; 38(1): 4-9.
- KRUCHONAK U, ABOU EL-AZM S, AFANACIEV K, CHELKOVA, et. al. Radiation hardness of GaAs:Cr and Si sensors irradiated by electron beam. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2020; 975: 164204-164214. doi: 10.1016/j.nima.2020.164204.
- ABU AL AZM SM, CHELKOVA G, KOZHEVNIKOV D, GUSKOV A, et. al. Response of Timepix detector with GaAs:Cr and Si sensor to heavy ions. Physics of Particles and Nuclei Letters. 2016; 13(3): 363-369.
- LEYVA A, RUBIERA JA, LEYVA D, PIÑERA I, et. al. Monte Carlo simulation of the radiation transport in chromium compensated gallium arsenide detectors. Nucleus, 2018; (64): 19-23.
- GONZÁLEZ E, ABREU Y, CRUZ CM, PIÑERA I, et. al. Molecular-dynamics simulation of threshold displacement energies in BaTiO₃. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2015; 358: 142-145. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.06.015>
- ABREU ALFONSO Y. Hyperfine parameters and radiation damage in semiconductors and superconducting materials. [tesis doctoral]. Departamento de Física, Universidad de Amberes, Bélgica. Abril, 2014. Identifier: c:irua:116686. <https://hdl.handle.net/10067/1166860151162165141>
- CRUZ CM, LEYVA A. Estudio de la respuesta al daño radiacional gamma de materiales cerámicos superconductores. Premio de la Academia de Ciencias de Cuba, 2002. La Habana, Cuba.
- PIÑERA I, CRUZ CM, LEYVA A, ABREU Y. Método clásico asistido por Monte Carlo para la evaluación del daño radiacional en materiales sólidos. Premio de la Academia de Ciencias de Cuba, 2012. La Habana, Cuba.
- ABREU Y, CRUZ CM, PIÑERA I, LEYVA A, et. al. Estudio teórico de los parámetros hiperfinos y del daño radiacional en materiales semiconductores y superconductores. Premio de la Academia de Ciencias de Cuba 2016. La Habana, Cuba.
- CRUZ CM, PIÑERA I, LEYVA A, ABREU Y, et. al. Simulación numérica de procesos de desplazamientos atómicos inducidos por las radiaciones gamma y electrónica: herramientas y sistemática. Premio de la Academia de Ciencias de Cuba, 2016. La Habana, Cuba.
- CRUZ CM, PIÑERA I, LEYVA A, ABREU Y. Studies on the Gamma Radiation Responses of High Tc Superconductors. In: Superconductor. Chapter 7. p.135-160. 2010. doi: 10.5772/10122.

Recibido: 23 de enero de 2023

Aceptado: 17 de febrero de 2023

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en la realización, ni la comunicación del presente trabajo.

Credit/Conceptualización: Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Curación de datos:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Análisis formal:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Adquisición de datos:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Investigación:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Metodología:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Administración del proyecto:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Recursos:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Software:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Supervisión:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Validación:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Visualización:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Redacción – borrador original:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Redacción – revisión y edición:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo.