



*Facultad
de
Ciencias*

**Caracterización de sensores de silicio de
baja ganancia para aplicaciones con alta
resolución temporal**

(Characterization of Low-Gain Silicon Sensors for
High Temporal Resolution Applications)

Trabajo de Fin de Grado
para acceder al

GRADO EN FISICA

Autor: Shaokai Chen

Director: Jordi
Duarte-Campderros

Co-director: Efrén Navarrete
Ramos

Septiembre 2023

Agradecimiento

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a Jordi, mi tutor de trabajo, por ofrecerme la oportunidad de realizar este trabajo y brindarme un apoyo incondicional a lo largo de todo este proyecto. Su paciencia, orientación y disposición para resolver mis dudas, incluso cuando su carga de trabajo era abrumadora, han sido fundamentales para el éxito de este trabajo.

También quiero agradecer a Efrén, por su valiosa ayuda en la realización de las medidas y su disposición constante para aclarar mis interrogantes. Su experiencia y conocimientos fueron de gran importancia en cada etapa de este proyecto.

Ambos, Jordi y Efrén, han sido pilares fundamentales en mi camino hacia la finalización de este trabajo. Estoy profundamente agradecido por su generosidad y dedicación.

Resumen

El HL-LHC ((High-Luminosity Large Hadron Collider) es una actualización planificada del LHC (Large Hadron Collider) con el objetivo de aumentar aún más la luminosidad (la cantidad de colisiones de partículas que ocurren en un cierto período de tiempo) del LHC, para hacer frente a esta actualización, se requiere desarrollar una serie de tecnologías innovadoras. En el experimento de CMS (Compact Muon Solenoid), se ha desarrollado un nuevo sistema de detectores con alta resolución temporal, conocido como Minimum Ionizing Particle Timing Detector (MTD). En este trabajo, se llevó a cabo una caracterización eléctrica de uno de los componentes principales del MTD, conocido como Low Gain Avalanche Detector (LGAD). El objetivo fue comprender sus propiedades y comportamiento eléctrico, así como determinar sus puntos de trabajo para su posterior aplicación en experimentos de CMS. Para lograr esto, se realizaron mediciones de las relaciones corriente-voltaje (I-V) y capacitancia-voltaje (C-V) de estos sensores. Esto permitió determinar parámetros clave como el voltaje de la capa de ganancia, la capacitancia final y el voltaje de ruptura. Además, se llevó a cabo una investigación sobre el efecto de la irradiación en los sensores LGAD, revelando una variación significativa en su comportamiento eléctrico en función de los niveles de radiación.

Summary

The HL-LHC (High-Luminosity Large Hadron Collider) is a planned upgrade to the LHC (Large Hadron Collider) aimed at further increasing the luminosity (the number of particle collisions occurring within a certain period of time) of the LHC. Achieving this improvement requires the development of a series of innovative technologies. In the CMS (Compact Muon Solenoid) experiment, a new detector system with high temporal resolution has been developed, known as the Minimum Ionizing Particle Timing Detector (MTD). In this study, an electrical characterization of one of the main components of the MTD, called the Low Gain Avalanche Detector (LGAD), was conducted. The goal was to comprehend its properties and electrical behavior, as well as to determine its operational parameters for subsequent application in CMS experiments. To achieve this, measurements were carried out on the current-voltage (I-V) and capacitance-voltage (C-V) relationships of these sensors. This allowed for the determination of key parameters such as the gain layer voltage, final capacitance, and breakdown voltage. Furthermore, an investigation into the irradiation effect on LGAD sensors was conducted, revealing a significant variation in their electrical behavior based on radiation levels.

Índice

Índice	IV
1 Introducción	7
1.1 LHC-CMS	7
1.2 Detector MTD	8
2 Fundamentos de los detectores de partículas de silicio	11
2.1 Propiedades básicas del semiconductor	12
2.2 Unión PN	13
2.2.1 Anchura del espacio vacío de cargas	15
2.2.2 Capacitancia	16
2.2.3 Corriente de fuga	17
2.3 Funcionamiento básico del sensor LGAD	18
2.3.1 Avalanche photodiode (APD)	18
2.3.2 Low gain avalanche diodes (LGAD)	19
2.3.3 Estructura del sensor LGAD	19
2.4 Efectos de la radiación	20
3 Metodología	22
3.1 Muestras de LGAD	22
3.2 Curvas C-V	23
Montaje experimental para las curvas C-V	24
3.3 Curvas I-V	26
Montaje experimental para las curvas I-V	26
3.4 Caracterización de los sensores irradiados	27
4 Resultados	28
4.1 Curvas I-V	29
4.2 Curvas C-V	30
4.3 Perfil de dopado	32
4.4 Curvas C-V (sensores irradiados)	33
4.4.1 fluencia $\phi = 4 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$	33

4.4.2 fluencia $\phi = 25 \times 10^{14}n_{eq}/cm^2$	35
4.4.3 fluencias $\phi = 8 \times 10^{14}n_{eq}/cm^2$ y $\phi = 15 \times 10^{14}n_{eq}/cm^2$	36
4.5 Trampas de carga debido a radiación	37
5 Conclusiones	38
Bibliografía	39
Índice de Figuras	41
Índice de Tablas	43

1

Introducción

1.1 LHC-CMS

El LHC (Gran Colisionador de Hadrones) [1] es un acelerador de partículas ubicado en el CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear), y es el acelerador más grande del mundo. Tiene una forma de anillo circular con 27 kilómetros de circunferencia y está ubicado a una profundidad promedio de 100 metros, justo en la frontera entre Francia y Suiza. Fue diseñado para lograr diversos objetivos científicos, entre ellos la investigación de la física de partículas a niveles energéticos superiores y la búsqueda de partículas y fenómenos que podrían estar fuera de las predicciones establecidas en el Modelo Estándar de la física de partículas.

El funcionamiento del LHC se basa en el principio de aceleración de partículas cargadas utilizando campos electromagnéticos generados por imanes superconductores. Estos imanes se enfrían a temperaturas extremadamente bajas para alcanzar un estado superconductor, lo que les permite generar campos magnéticos muy fuertes sin pérdida de energía. Los imanes guían los haces de partículas a lo largo del anillo y mantienen su trayectoria circular [2], de esta forma, se puede dirigir con precisión la trayectoria de estas partículas y llevar a cabo colisiones entre los haces de partículas. Las colisiones de partículas tienen lugar en cuatro puntos específicos distribuidos a lo largo del anillo circular, alrededor de los cuales se realizan los experimentos y se construye una serie de detectores que se encargan de registrar y medir las partículas generadas durante las colisiones, capturando información sobre su trayectoria, energía, momento y otras propiedades específicas.

Uno de los experimentos de propósito general es CMS (Compact Muon Solenoid). El detector CMS [3] está construido alrededor de un enorme imán solenoide, que crea un fuerte campo magnético que curva las trayectorias de las partículas cargadas, permitiendo medir sus momentos. El detector adopta la configuración de un cilindro y se compone de múltiples subsistemas dispuestos en

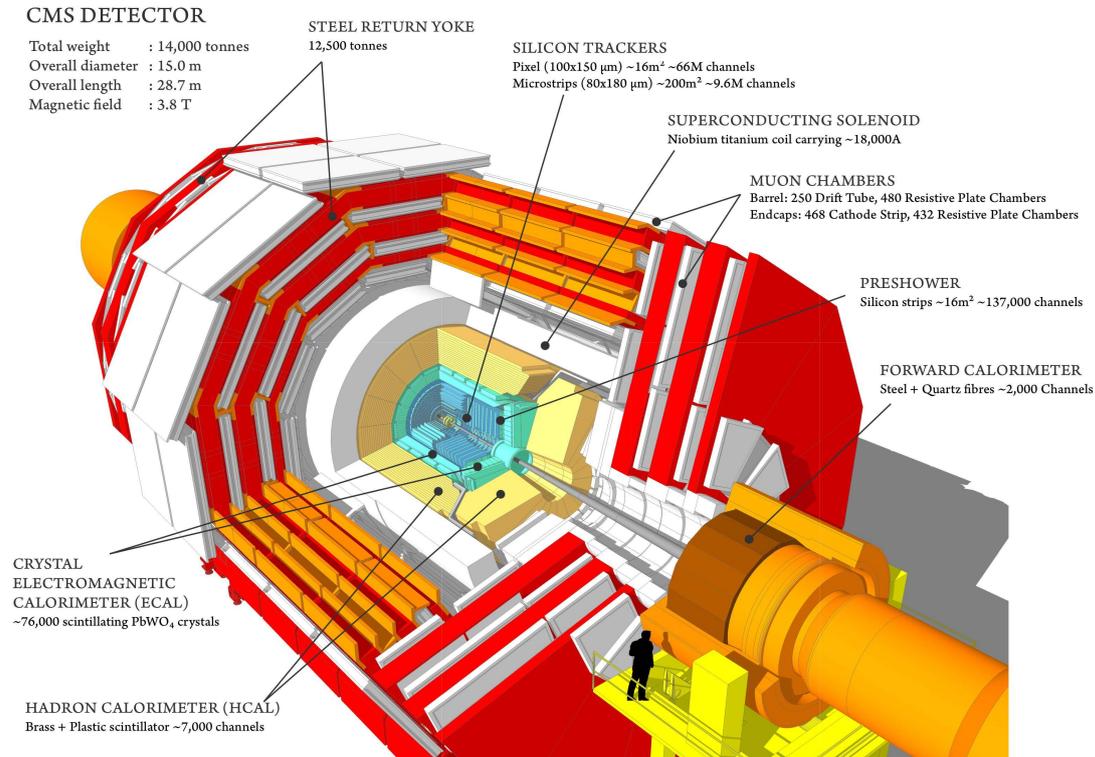


Figura 1.1: Esquema del detector CMS, mostrando sus componentes principales. [4]

capas cilíndricas. Estos subsistemas han sido diseñados con diversos propósitos. Uno de los subsistemas es el sistema de tracking (Tracker), que es un sistema de seguimiento ubicado en la capa más interna y está construido utilizando sensores basados en silicio. Estos sensores se distribuyen en una serie de capas formando unas superficies de píxeles, cada sensor individual es capaz de detectar la partícula cuando esta interactúa con él, registra la señal generada e indica la posición donde ocurrió la interacción, y con los datos registrados se puede reconstruir con alta precisión la trayectoria de las partículas resultantes, sus posiciones iniciales y los vértices de colisión. El detector CMS también tiene sistemas de calorimetría que incluyen Electromagnetic Calorimeter (ECAL) y Hadronic Calorimeter (HCAL). ECAL está diseñado para medir la energía de electrones y fotones que interactúan principalmente a través de la interacción electromagnética. Por otro lado, HCAL mide la energía de partículas hadrónicas como protones y neutrones, que interactúan a través de la interacción fuerte. Además, se encuentran las Cámaras de Muones, que se sitúan en la capa más externa, este subsistema está específicamente diseñadas para detectar y medir muones, que son las partículas capaces de atravesar las capas anteriores.

1.2 Detector MTD

En los últimos años, se está llevando a cabo una importante actualización del LHC denominado HL-LHC (El Gran Colisionador de Hadrones de Alta Luminosidad) [5]. El HL-LHC tiene como objetivo aumentar de manera notable la lu-

miniosidad (la cantidad de colisiones entre partículas que ocurren en una región específica y en un período de tiempo determinado) de las colisiones de partículas en comparación con el LHC original. Los estudios recientes mostraron que esta actualización permitirá que el acelerador alcance una luminosidad instantánea estable de $L = 5 \cdot 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ [6], alrededor de 5 veces mayor que la luminosidad actual.

Con el aumento de la cantidad de colisiones en cada instante, surge la necesidad de disponer de un detector cuya capacidad de resolución temporal sea aún más precisa y refinada, de tal forma que sea capaz de lidiar con las altas densidades de partículas que van a crearse. Para abordar esta necesidad de medir el tiempo, se ha desarrollado un nuevo detector de timing conocido como "MIP (minimum ionizing particles [7]) Timing Detector". Este sistema de MTD está construido principalmente para medir con precisión el tiempo de llegada de partículas cargadas que generan ionización mínima [8] en el material del detector, con una resolución temporal entorno a $t = (30 - 40)\text{ps}$ [6]. La información obtenida en este sistema de temporización se combina con los datos de obtenidos en otros componentes del detector, como el sistema de seguimiento, para lograr una reconstrucción completa de las trayectorias en términos espacio-temporales.

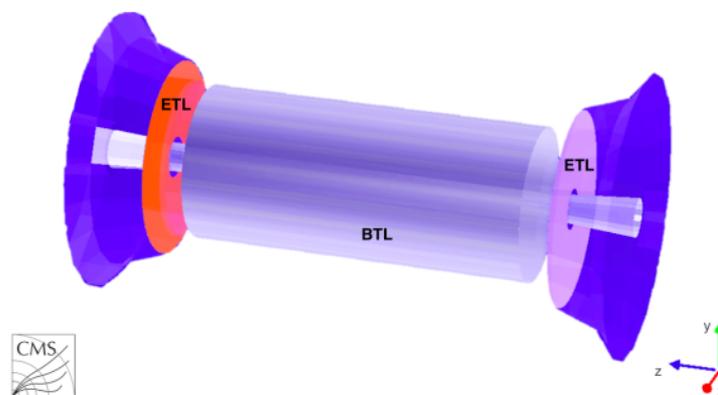


Figura 1.2: Esquema de un detector MTD, mostrando sus componentes principales como Barrel Timing Layer y Endcap Timing Layer. [6]

El MTD se compone de dos elementos principales [1]: Barrel Timing Layer (BTL) y Endcap Timing Layer (ETL). La capa BTL se encuentra en la región central del detector, conocida como "barril", mientras que la capa ETL se encuentra en las regiones extremas o endcap del detector. La tecnología de detección utilizada en estas capas es diferente, debido a la cantidad diferente de radiación que van a soportar. En el caso de BTL, se utilizan detectores fotomultiplicadores de estado sólido (SiPM).

En cuanto a ETL, esta capa consta de dos discos sobre los cuales se encuentran unos dispositivos de silicio conocidos como detectores LGADs (Low-gain avalanche diodes). Estos detectores se distribuyen de manera pixelada sobre las caras de los discos y son los elementos fundamentales encargados de detectar el paso de las partículas con una alta resolución temporal. Este trabajo se enfocará en el estudio de los sensores LGADs, centrándose en sus propiedades eléctricas y realizar las caracterizaciones necesarias para su futura aplicación en el detector CMS.

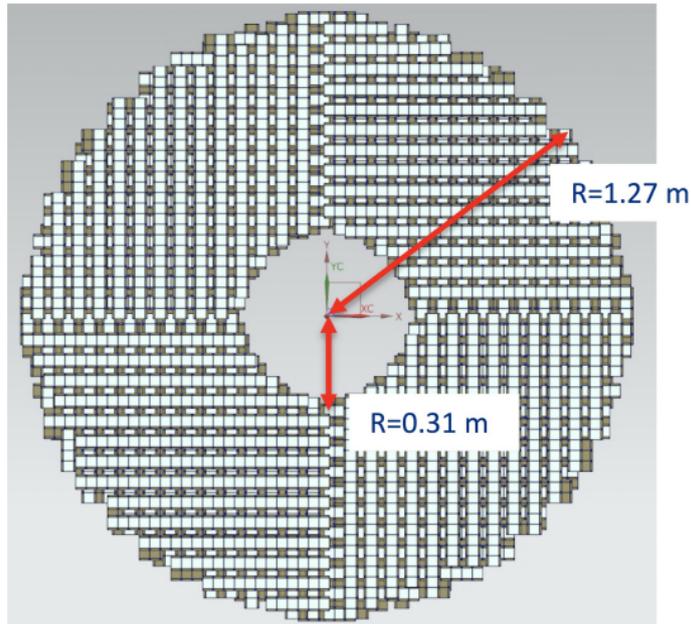


Figura 1.3: Disco de MTD, donde se encuentran los sensores LGADs [6].

2

de silicio

Fundamentos de los detectores de partículas

Los sensores LGADs son sensores basados en silicio, un material semiconductor. Para poder entender su funcionamiento, primero se explicará con detalle los fundamentos básicos de los detectores semiconductores.

El detector semiconductor es un tipo de detector de estado sólido comúnmente utilizado para la detección de partículas. Este tipo de detector está basado en materiales semiconductores como silicio o germanio [7]. El funcionamiento de un detector semiconductor es parecido al de una cámara de ionización, que consiste en un espacio lleno de gas o aire, típicamente a baja presión, entre dos electrodos cargados eléctricamente. Cuando la radiación ionizante interactúa con el gas dentro de la cámara, produce electrones e iones, creando una corriente eléctrica entre los electrodos. La cantidad de corriente eléctrica generada es proporcional a la cantidad de radiación incidente. Esto permite medir la intensidad de la radiación y, en algunos casos, determinar la energía de los fotones ionizantes. A diferencia de la cámara de ionización, el funcionamiento de un detector semiconductor se basa en un mecanismo denominado creación de pares. Cuando la radiación ionizante, como los rayos X, rayos gamma o partículas cargadas, penetra en el material semiconductor, interactúa con los átomos del semiconductor. Esta interacción puede transferir la energía a los electrones de la banda de valencia (se explicará más adelante), creando de esta forma pares electrón-hueco. Los electrones son partículas con carga negativa, mientras que los huecos son ausencias de electrones, por lo que se pueden considerar como cargas positivas, y estos portadores de cargas pueden ser recolectadas por un campo eléctrico, y generando de esta manera una señal eléctrica. Una diferencia clave de los detectores de semiconductor es que requieren una cantidad muy pequeña de energía para crear un par electrón-hueco en comparación con los detectores de gas. Por lo tanto, la cantidad de ionización producida por una radiación en un detector semiconductor es mucho mayor que en un detector de gas. Esto proporciona ciertas ventajas a este tipo de detectores, como una mayor resolución de energía y la capacidad de detectar partículas que depositan poca energía en el material.

2.1 Propiedades básicas del semiconductor

El silicio es un material semiconductor que tiene una estructura cristalina, está formado por una red tridimensional de átomos que se repiten de manera regular y periódica en todas las direcciones. Los electrones en los átomos de silicio están organizados en niveles de energía discretos, estos niveles están tan cercanos entre sí que pueden tratarse como un conjunto continuo, creando lo que se denominan las bandas de energía [7], que pueden estar ocupadas o vacías según la energía de los electrones.

La banda de energía más baja en un semiconductor se denomina la banda de valencia. Esta banda contiene los niveles de energía ocupados por los electrones que tienen una energía baja. Estos electrones en la banda de valencia están fuertemente ligados al núcleo y participan en los enlaces químicos que mantienen unidos los átomos en el material sólido, por lo tanto, no contribuyen a la conducción eléctrica. La banda de energía más alta se llama la banda de conducción, los electrones en la banda de conducción están menos ligados y, por lo tanto, pueden moverse libremente bajo la influencia de un campo eléctrico. Entre la banda de valencia y la banda de conducción existe una región donde no hay niveles de energía, a esta región se le denomina banda prohibida (también se conoce como gap). Es un rango de energías en el cual no hay estados electrónicos permitidos. Es decir, no hay electrones que puedan existir en esta región de energía en el material.

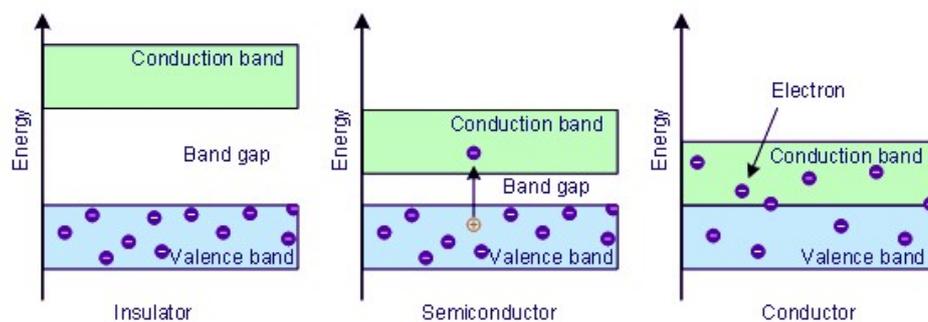


Figura 2.1: Comparación de la conductividad de un material a partir de su estructura de bandas de energía [11].

La anchura de la banda prohibida es la que determina el comportamiento eléctrico del material. El silicio, siendo un semiconductor, se encuentra en un comportamiento eléctrico intermedio entre los aislantes (son los que tienen una banda

prohibida relativamente grande) y los conductores (la banda de conducción y de valencia se solapan, por lo que no tienen gap). La anchura de la banda prohibida del silicio es relativamente pequeña, de manera que, a una temperatura $T = 0K$, todos los electrones se encuentran en la banda de valencia, por lo que comporta como un aislante, mientras a una temperatura mayor que $T = 0K$, los electrones adquieren una energía térmica, se excitan y saltan a la banda de conducción, de esta forma, pueden contribuir a la conducción eléctrica cuando hay un campo eléctrico externo. La energía de excitación también la puede proporcionar la radiación, cuando las partículas externas se inciden sobre el material semiconductor, estas partículas interactúan con los átomos del medio y les transfieren su energía, los electrones de la banda de valencia absorben esta energía y saltan a la banda de conducción, dejando huecos en la banda de valencia, a ese proceso se le denomina creación de pares electrón-hueco. Los huecos se comportan como cargas positivas y pueden moverse a través del material de la misma manera en que lo hacen los electrones en la banda de conducción. Estos portadores de carga creadas circulan por el material creando una corriente eléctrica, que posteriormente puede ser registrada como una señal eléctrica para el análisis. Sin embargo, la densidad de portadores en este tipo de semiconductor (conocido como semiconductor intrínseco) es muy pequeña y depende fuertemente de la temperatura. Para poder aumentar esta densidad de portadores, se introduce impurezas en el material semiconductor, a este proceso se le denomina dopaje. Los semiconductores dopados con impurezas se denominan semiconductores extrínsecos [7], y se clasifican en 2 grupos según el tipo impureza introducida. Por un lado, el semiconductor de tipo n, que se dopa el material con impurezas donadores (átomos que tienen un electrón adicional en su capa atómica más externa) que aportan electrones adicionales a la estructura cristalina. Este proceso aumenta la concentración de electrones en la banda de conducción. Por otro lado, el semiconductor de tipo p, aquí, el dopaje introduce átomos aceptores (átomos a los que le faltan un electrón para completar su capa atómica más externa) que crean huecos en la banda de valencia. Estos huecos actúan como portadores de carga positiva, y contribuyen a la conducción eléctrica. A pesar de que los principales portadores de carga en un semiconductor tipo n son los electrones (también denominado portadores de carga mayoritarias), contiene una pequeña cantidad de huecos libres, denominados portadores de carga minoritarias. De manera similar, en un semiconductor tipo p, los portadores de carga mayoritarias son los huecos, pero contiene una cantidad pequeña de electrones libres.

2.2 Unión PN

Actualmente, el funcionamiento de todos los detectores de semiconductor depende de la formación de una unión entre un semiconductor tipo p y un semiconductor tipo n. Existen diversas formas de conseguir la unión pn, la forma más sencilla es difundir suficientes impurezas de tipo p en un extremo de una barra homogénea de semiconductor de tipo n para convertir ese extremo en un semiconductor de tipo p. La formación de la unión pn lleva a cabo la creación de una región especial entorno a la superficie que separa los dos materiales (marcado con color gris en la Figura 2.2). Debido a la diferencia de la concentración de

portadores entre estas dos regiones, los electrones de la región n se difunden a la región p y se recombinan con los huecos de esta región, dejando así los iones donadores en la región n (cargas positivas fijas). Del mismo modo, los huecos de la región p se difunden a la región n y se recombinan con los electrones de esta región, dejando los iones aceptores en la región p (cargas negativas fijas). La diferencia de la densidad de carga induce un campo eléctrico interno y consecuentemente una diferencia de potencial, denominada built-in potential, V_{bi} , este potencial actúa como una barrera que impide el paso de electrones de la región n a la región p, y los huecos de la región p a la región n, es decir, no hay corriente apreciable que pase por esta región cuando no existe ningún campo eléctrico externo (puede existir una corriente pequeña denominada corriente de fuga, que se explicará más adelante), a esta región donde no existe ningún portador libre se le denomina espacio vacío de cargas (también denominada región vacía de portadores). Esta región se extiende desde la superficie de la unión hasta una distancia x_p en la región p, y una distancia x_n en la región n. Además, existe una relación entre la concentración de dopantes y la distancia extendida del espacio vacío de cargas [7]:

$$N_a x_p = N_d x_n \quad (2.1)$$

donde N_a es la concentración de átomos aceptores en la región p, y N_d es la concentración de átomos donadores en la región n. Esta ecuación nos indica que mayor sea la concentración de átomos donadores en la región n, N_d , menor será la distancia extendida del espacio vacío de cargas en esta región, x_n , como mostrado en la Figura 2.2.

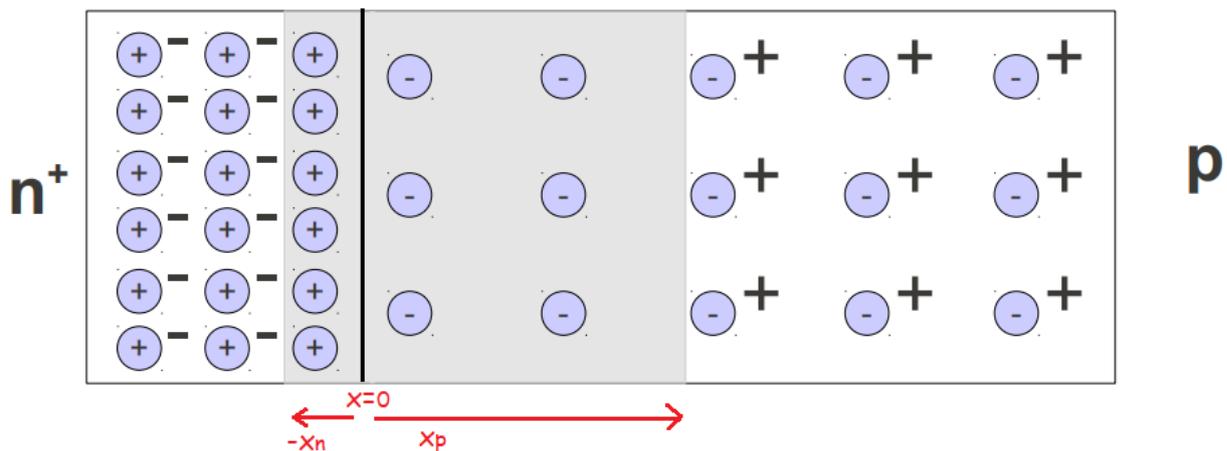


Figura 2.2: Unión P-N, la región de color gris corresponde al espacio vacío de cargas, la línea negra vertical corresponde a la superficie de la unión, las cargas de color azul son cargas fijas (iones). El espacio vacío de cargas se extiende desde la superficie de la unión hasta una distancia x_p en la región p, y una distancia $-x_n$ en la región n [14].

En una unión pn, la región vacía de portadores es la zona donde puede actuar como detector de partículas: cuando una partícula incidente interactúa con el medio, crea los pares electrón-hueco, que se desplazan bajo el campo eléctrico interno. Para aumentar el volumen de interacción, y aumentar también la velocidad de recolección de portadores de cargas (lo cual resulta en una detección más rápida), se aplica una diferencia de potencial externa en una configuración denominada polarización inversa (Reverse bias) [8]. En esta configuración, el vol-

taje negativo se aplica a la región p y el voltaje positivo a la región n (ver la Figura 2.3). De esta manera, se logra aumentar tanto el campo eléctrico total como la barrera de potencial del espacio vacío de cargas, así como su tamaño.

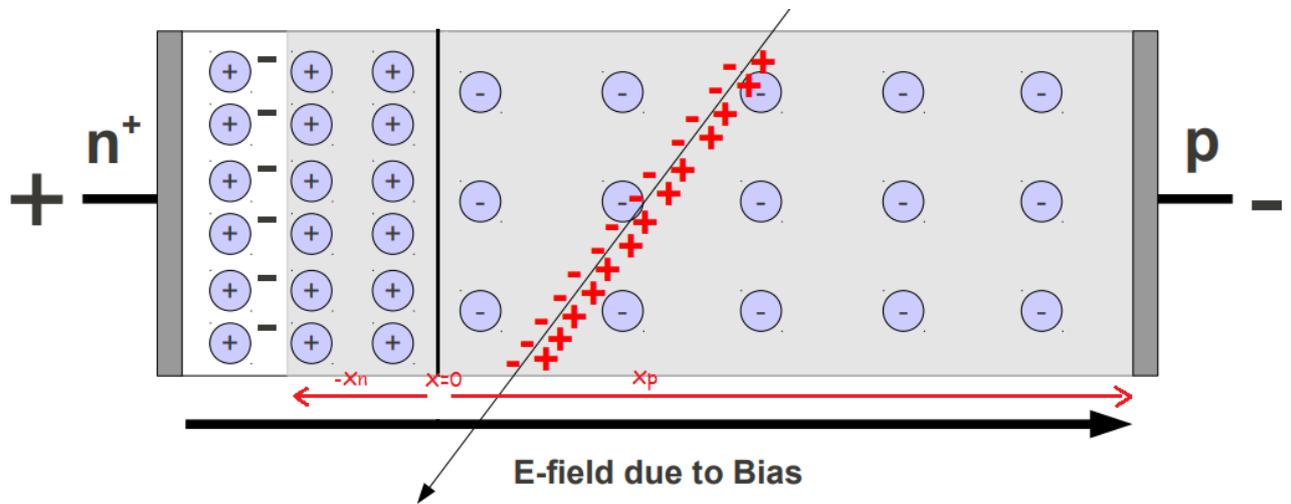


Figura 2.3: Esquema de la unión pn, mostrando el espacio vacío de cargas en la configuración de polarización inversa, también muestra el proceso de la creación de pares cuando se incide una partícula externa sobre la unión [14].

2.2.1 Anchura del espacio vacío de cargas

Cuando se aplica un voltaje en polarización inversa, el campo eléctrico resultante ejerce fuerza sobre los portadores de carga. En consecuencia, los electrones en la región n son atraídos hacia el extremo positivo, mientras que los huecos en la región p son atraídos hacia el extremo negativo. Esto provoca una expansión del espacio vacío de cargas, cuya anchura W (es la suma de x_p y x_n) se puede determinar mediante la siguiente ecuación [8]:

$$W = x_p + x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_R + V_{bi})}{q} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right)} \quad (2.2)$$

donde ϵ_s es la permitividad relativa del semiconductor, V_R es el voltaje aplicado, V_{bi} es el built-in voltage, q es la carga del electrón, N_a y N_d son la densidad de dopantes en la zona p y n respectivamente.

A través de esta ecuación, se observa que a medida que el potencial aplicado se aumenta, la anchura W tiende a crecer. A este proceso se le denomina "vaciar", puesto que se está expulsando las cargas libres. Es necesario tener en cuenta que en situación práctica este aumento viene limitado por el tamaño físico del sensor. Por lo tanto, la dimensión máxima alcanzable de W está limitada por la anchura del propio sensor utilizado

Frecuentemente, en los sensores se utiliza una unión pn en la que la concentración de una de las impurezas (bien sea N_a o N_d) es mucho mayor que la de

otra ($N_a \gg N_d$ o $N_a \ll N_d$), esta estructura se denomina one-side junction. Tomando como ejemplo el caso de $N_a \ll N_d$, de acuerdo con la ecuación (2.1), x_n debe ser mucho menor que x_p , por lo que la anchura del espacio vacío de cargas básicamente va a ser igual a x_p :

$$W \approx x_p \approx \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_R + V_{bi})}{q} \left(\frac{1}{N_a}\right)} \quad (2.3)$$

2.2.2 Capacitancia

En la unión pn de un dispositivo semiconductor, se produce una separación de cargas, donde las cargas negativas se acumulan en un lado y las cargas positivas en el otro (como un condensador). Esta distribución de cargas conduce a la formación de una capacitancia asociada a la unión. Como se mencionó anteriormente, cuando se aplica un potencial dV_R a la unión, la anchura del espacio vacío de cargas se expande, este proceso dará lugar a una variación en las cargas presentes en la zona, dQ . De esta forma se puede definir una capacitancia, denominada capacitancia de unión, de la siguiente manera [8]:

$$C = \frac{dQ}{dV_R} = A \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_a N_d}{2(V_d + V_R)(N_a + N_d)}} \quad (2.4)$$

donde A es el área de la sección transversal del semiconductor.

Comparando las ecuaciones (2.2) y (2.4), se puede establecer la siguiente relación:

$$C = \frac{\epsilon_s A}{W} \quad (2.5)$$

La expresión para la capacitancia de unión es parecida a la de un condensador de placas paralelas, con la diferencia de que esta primera depende de la anchura del espacio vacío de cargas y, por lo tanto, depende también del voltaje aplicado. Esta capacitancia disminuye a medida que se aumenta la anchura W , como se indicó anteriormente, esta anchura no se aumentará indefinidamente con el voltaje aplicado, llegará un punto en el cual el espacio vacío de cargas llenará todo el espacio disponible, y a partir de ese instante, la capacitancia alcanzará su valor mínimo y permanecerá constante.

Es importante tener en cuenta que la deducción de todas las ecuaciones anteriores se basa en una serie de aproximaciones. Por un lado, se ha supuesto que el dopaje es uniforme tanto en la región n como en la región p, y que la unión es abrupta. Por otro lado, se ha considerado una ionización total, lo que significa que todos los átomos de impurezas contribuyen con portadores de carga. Por lo tanto, en situaciones prácticas, no es posible aplicar directamente estas ecuaciones para determinar tanto la capacitancia como la anchura. Sin embargo, sí nos proporcionan una idea cuando analizamos el comportamiento eléctrico de estos sensores.

2.2.3 Corriente de fuga

En la situación ideal, una unión pn bajo polarización inversa no debería conducir corriente. Sin embargo, en la práctica, cuando se aplica el voltaje, emerge una pequeña corriente que fluye a través de la unión, a esta corriente se le denomina corriente de fuga [6], y debe mantenerse baja para controlar tanto el consumo de energía como el ruido de la señal.

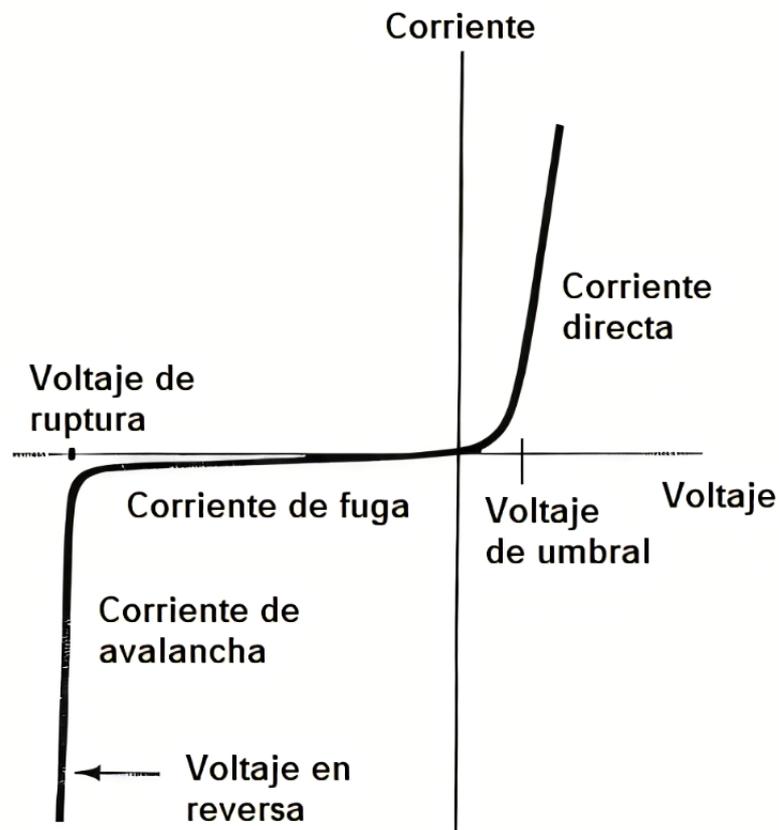


Figura 2.4: Corriente que circula por un diodo semiconductor en función del voltaje aplicado [14].

Cuando el voltaje aplicado es muy alto, puede llegar a superar el voltaje de ruptura (breakdown voltage), en este caso los portadores de carga pueden ganar tanta energía que llegan a liberar más electrones y huecos, macroscópicamente se traduce en un aumento rápido en la corriente eléctrica.

La aparición de esta corriente de fuga tiene varias causas. Una de ellas es el movimiento de los portadores de carga minoritarios, es decir, al aplicar el voltaje, los huecos de la región n se desplazan hacia la región p, mientras que los electrones de la región p se migran hacia la región n, generando de esta forma una corriente de fuga. Sin embargo, la contribución de estos portadores minoritarios a la corriente de fuga es relativamente pequeña[7]. La contribución principal viene de la creación de pares mediante energía térmica. A temperaturas más altas, la energía térmica disponible es mayor, lo que aumenta la probabilidad de que los electrones se excitan y saltan a la banda de conducción, generando de esta

forma pares electrón-hueco que pueden contribuir a la corriente de fuga, esta corriente aumenta a medida que se incrementa la temperatura (depende fuertemente de la temperatura), por lo que una forma eficiente de reducirla es enfriar el sensor cuando se realizan las medidas. La relación entre la corriente de fuga y la temperatura viene dada por la siguiente ecuación[8]:

$$I = I_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^2 \exp \left(\frac{E_g}{2kT_0} - \frac{E_g}{2kT} \right) \quad (2.6)$$

donde T es la temperatura actual a la que se evalúa la corriente de fuga, I_0 es la corriente de saturación inversa a una temperatura de referencia T_0 , E_g es la anchura de la banda prohibida del material semiconductor y k es la constante de Boltzmann.

2.3 Funcionamiento básico del sensor LGAD

2.3.1 Avalanche photodiode (APD)

En detectores de alta precisión, los sensores de silicio deben ser fabricados lo más delgados posible para minimizar la dispersión de partículas [6], pero esto tiene como consecuencia una señal reducida, lo que hace que las mediciones sean menos eficientes. Para abordar este problema, una solución consiste en amplificar la señal generada por las partículas externas. Esto implica multiplicar la carga recolectada mientras se mantiene su relación de proporcionalidad con la energía perdida por la radiación incidente. De esta manera, puede preservar la eficiencia de las mediciones.

Uno de los detectores fabricados que tienen la capacidad de amplificar la señal es el avalanche photodiode (APD)[16]. Este tipo de detector es diseñado de manera específica para instaurar un campo eléctrico interno que acelera los portadores de carga con suficiente energía para iniciar un proceso de multiplicación en avalancha. Cuando una partícula impacta en el material, se generan pares electrón-hueco que son seguidamente acelerados dentro del semiconductor bajo un campo eléctrico, lo que les permite adquirir energía suficiente para liberar otros electrones de los átomos del material mediante colisiones. Estos electrones liberados también pueden absorber energía y liberar más electrones, lo que genera una cadena de reacciones resultando en una avalancha de electrones. Así, la incidencia de una sola partícula ocasiona la creación de un número considerablemente mayor de pares electrón-hueco, amplificando la corriente inicial producida por el fotón y dando como resultado una señal final detectable. No obstante, los detectores APDs presentan algunas desventajas. Por ejemplo, pueden introducir ruido adicional debido al proceso de multiplicación en avalancha, lo que puede limitar la relación señal-ruido alcanzable, especialmente en aplicaciones con niveles de iluminación bajos. Otra desventaja es el voltaje de operación. Por lo general, los APDs requieren un voltaje de polarización más alto para mantener el proceso de avalancha, lo que podría complicar los requisitos de suministro eléctrico y el diseño del circuito. Además, existe la posibilidad de

es un semiconductor de tipo n altamente dopado, y es donde se encuentra el cátodo. En el borde del electrodo n^+ , se ubican unos componentes denominados "Junction Termination Extensions"(JTE), estos componentes superponen el borde de la unión principal con un semiconductor de tipo n de menor concentración, que se extiende más profundamente que el electrodo n^+ . Su función principal es evitar que se produzca una ruptura eléctrica y garantizar que los campos eléctricos se distribuyan uniformemente dentro del dispositivo. Otro componente importante es el anillo de guarda (Guard Ring), este componente rodea la región sensible del dispositivo, actuando como una barrera eléctrica que ayuda a evitar que los campos eléctricos externos interfieran con la región activa donde se produce la amplificación de avalancha. Además, es uno de los componentes que se pone en contacto con la sonda a la hora de realizar las medidas de la caracterización eléctrica. Por último, el p-stop tiene la función principal de limitar y controlar la propagación de la avalancha de electrones que se genera cuando una partícula cargada ingresa en la región de bulk del detector. El p-stop actúa como una especie de barrera eléctrica que ayuda a confinar la región de avalancha en la región de bulk, evitando que los electrones se propaguen hacia áreas no deseadas del detector."

2.4 Efectos de la radiación

Los detectores de semiconductor son sensibles al daño provocado por la radiación [7]. Cuando son expuestos a partículas de alta energía o radiación ionizante, se producen cambios y defectos en la estructura cristalina del material. Estos cambios dan lugar a diversas alteraciones en el rendimiento del detector, afectando su sensibilidad, respuesta de señal y eficiencia general.

Cuando las partículas de alta energía atraviesan un detector de silicio, interactúan con los átomos dentro del material. Estas interacciones pueden dar lugar a la ionización, la creación de pares electrón-hueco o resultar en el desplazamiento de átomos de silicio de sus posiciones originales en la red cristalina. Estos desplazamientos pueden generar defectos estructurales en el cristal, como vacantes (sitios vacíos donde los átomos deberían estar) o intersticiales (zonas donde los átomos se han desplazado y quedan en posiciones no habituales). Estos defectos introducen un nivel de energía de defectos en la banda prohibida y pueden actuar como sitios de captura locales para portadores de carga.

La presencia de estos defectos inducen varios efectos [6] en el material semiconductor utilizado como detector de partículas. Por ejemplo, los defectos inducidos por radiación pueden dificultar la migración de los portadores de carga, esto a su vez resulta en una disminución en la eficiencia efectiva de recolección de carga del detector, puesto que las cargas que quedan atrapadas en sitios defectuosos pueden no contribuir a la señal o pueden tomar más tiempo en hacerlo.

Otro efecto importante en presencia de defectos es el aumento de la corriente de fuga. Los niveles de defectos que se encuentran cerca del centro de la banda prohibida actúan como centros que pueden facilitar la creación térmica de pares

electrón-hueco, los cuales contribuyen a la corriente de fuga.

Un tercer efecto es la reducción de la ganancia, este efecto es causado por un mecanismo denominado "initial acceptor removal mechanism" [6], que gradualmente desactivan los aceptores que forman la capa de ganancia (en nuestro caso el boro), reduciendo de esta forma la concentración de aceptores, que da lugar a la disminución de la intensidad del campo eléctrico y consecuentemente la ganancia. Para abordar este problema, varios estudios han demostrado que la inclusión de carbono en la capa de multiplicación del sensor puede mitigar los efectos de eliminación de los aceptores debido a la radiación [15]. Esta estrategia se basa en el hecho de que los átomos de carbono, cuando se incorporan al material semiconductor, pueden interactuar con los defectos generados por la radiación, en lugar de permitir que estos defectos interactúen con los átomos de boro y causen su desactivación.

3

Metodología

3.1 Muestras de LGAD

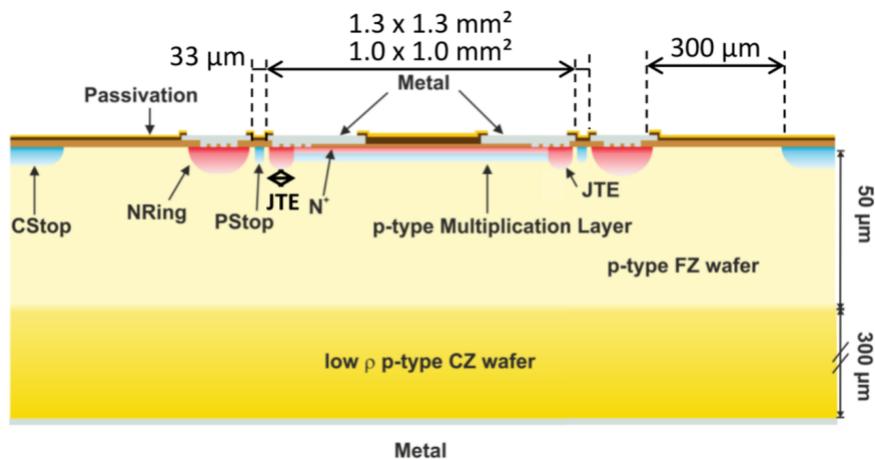


Figura 3.1: Esquema de las LGAD utilizadas, mostrando los componentes principales. Los espesores no están escalados.

Los sensores LGADs utilizados en esta práctica son fabricados en obleas de silicio, que se han pasado por un proceso de dopado y deposición de varios materiales para construir los propios LGADs. Estos sensores tienen un área total de $A = 2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$, y una región activa (la zona específica donde ocurren las interacciones con las partículas incidentes) de $A_{act} = 1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$, el espesor de los sensores tiene un valor alrededor de $350 \mu\text{m}$ y la capa de multiplicación de estos sensores está dopada con una concentración de $N \approx 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ de boro. Los sensores utilizados provienen de diversas obleas en las que se han introducido diferentes concentraciones de carbono para aumentar su resistencia a la radiación. Estos sensores se clasifican según el encabezamiento indicado en la tabla 3.1.

Oblea (Wafer)	W1	W2	W3	W4	W5	W6
concentración de carbono	0	10^{14}cm^{-3}	$2 \cdot 10^{14}\text{cm}^{-3}$	$3 \cdot 10^{14}\text{cm}^{-3}$	$6 \cdot 10^{14}\text{cm}^{-3}$	$9 \cdot 10^{14}\text{cm}^{-3}$

Tabla 3.1: Concentración de carbono correspondiente a cada encabezamiento (cada oblea)

El objetivo de esta práctica consiste en llevar a cabo una caracterización eléctrica de los sensores LGADs con diferentes concentraciones de carbono. Esta caracterización proporciona información sobre las propiedades y el comportamiento eléctrico de estos dispositivos, y permite determinar los puntos de trabajo de estos sensores. Es decir, permite encontrar las condiciones operativas específicas en las que estos sensores funcionan de manera óptima. Estos puntos de trabajo abarcan el rango de operación de voltaje, corriente y otros parámetros que determinan el comportamiento eléctrico y funcional del sensor.



Figura 3.2: La imagen de un sensor LGAD. Mostrando los puntos donde se contactan con las sondas a la hora de realizar las medidas.

3.2 Curvas C-V

Uno de los métodos comunes utilizados en esta caracterización es la construcción de curvas C-V (Capacitancia-Voltaje). Estas curvas nos permiten visualizar cómo cambia la capacitancia del dispositivo en función del voltaje aplicado bajo la polarización inversa.

Al realizar la caracterización mediante curvas C-V, se pueden extraer varios parámetros importantes, uno de ellos es el voltaje necesario para vaciar completamente el sensor. Como se indica en el apartado (1.4.2), al incrementar el voltaje aplicado, se llega a un punto donde la capacitancia se estabiliza, permaneciendo constante. El voltaje crítico correspondiente a este punto nos indica el voltaje

que se debe aplicar para que el sensor trabaje en el estado de vaciado total (fully depletion mode).

Otra información que proporcionan las curvas C-V es el perfil de dopado de la región activa del sensor. A partir de las medidas de C-V es posible determinar la concentración de boro (átomos aceptores) presentes en la región bulk y la capa de multiplicación. Aplicando la ecuación (2.4), y considerando que en la situación práctica la concentración de átomos donadores es mucho mayor que la de átomos aceptores ($N_d \gg N_a$), se puede deducir la siguiente ecuación[9]:

$$N_a = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 d(1/C^2)/dV} \quad (3.1)$$

Montaje experimental para las curvas C-V

Para llevar a cabo la caracterización, se utiliza un dispositivo denominado probe station, ubicado en la sala blanca de IFCA. Este dispositivo permite realizar pruebas eléctricas y caracterización de dispositivos electrónicos. Su función principal es establecer conexiones eléctricas temporales con los puntos de prueba en un sensor para medir sus propiedades eléctricas.

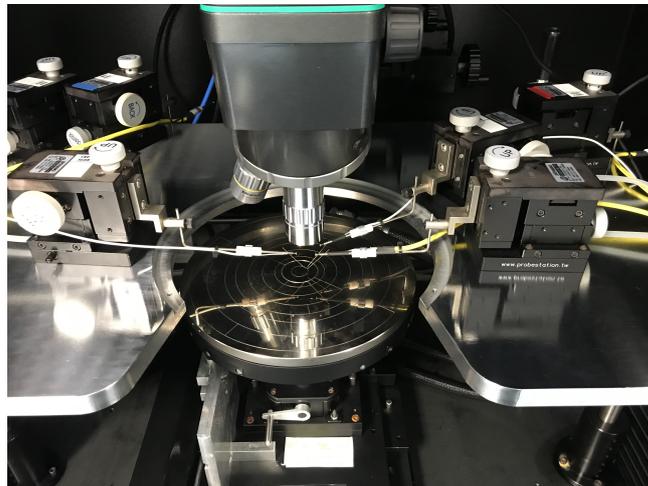


Figura 3.3: Imagen del probe station.

Este dispositivo está equipado con un microscopio que facilita el contacto con las sondas y una plataforma de trabajo, que es una superficie sobre la cual se coloca el sensor que se va a probar. En el centro de la plataforma se encuentra un pequeño orificio que es capaz de sujetar el sensor mediante succión, asegurando así su posición fija durante la medida. La plataforma es ajustable en términos de altura, ángulo y posición para garantizar un contacto óptimo con las sondas, estas últimas son unas pequeñas agujas o puntas metálicas que se utilizan para hacer contacto eléctrico con los puntos de prueba en el sensor. Estas sondas están unidas a unos aparatos de posicionamiento, los cuales permiten mover con precisión las sondas y ajustar su posición. Las sondas están conectadas a una fuente de alimentación KEITHLEY 2401 (un sourcemeter) y un dispositivo de medida LCR QUADTECK 1920, este último dispone de un circuito RC interno y tiene la capacidad de medir diversos parámetros, incluyendo la capacitancia y

la resistencia, al emitir una señal alterna de determinada frecuencia. El esquema del montaje experimental para las medidas C-V se muestra en la siguiente figura:

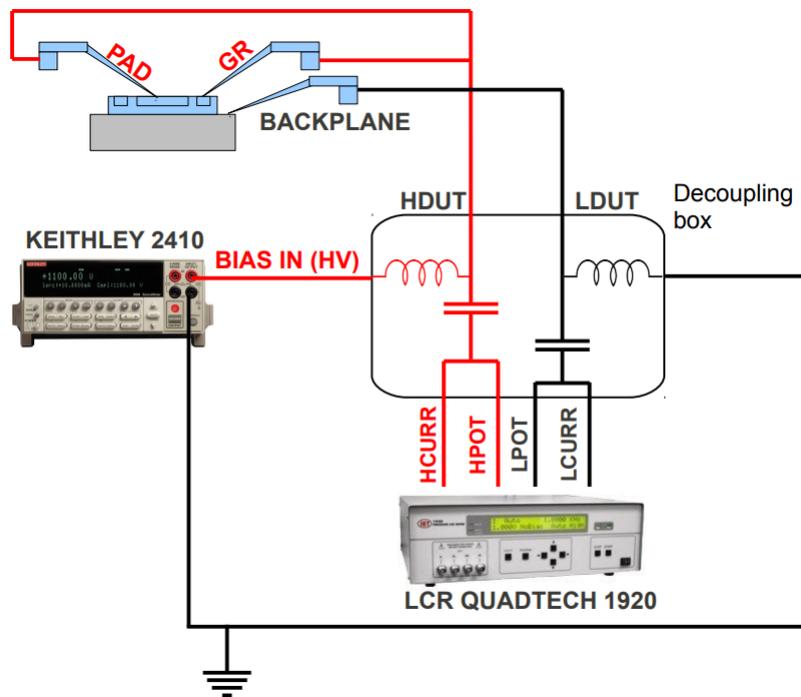


Figura 3.4: Esquema del montaje experimental para las mediciones de curva C-V.

En el diagrama, los componentes coloreados en azul representan las sondas y el detector. Para realizar las mediciones, se conecta una sonda al anillo de guarda y otra al PAD. Estas sondas se enlazan al dispositivo de medición LCR, y se alimentan mediante la fuente de alimentación KEITHLEY. Durante la medición, se ajusta un voltaje positivo en estas dos sondas. La parte posterior del sensor, conocida como "backplane", está en contacto con la plataforma, que también se conecta al dispositivo LCR y a la fuente de energía mediante una sonda, pero en este caso, se conecta a tierra para asegurar una referencia eléctrica adecuada. Los cables de conexión atraviesan una caja de desacoplamiento, la cual contiene un circuito compuesto por una serie de condensadores e inductores que cumplen la función de filtrar las frecuencias no deseadas y reducir el ruido eléctrico.

3.3 Curvas I-V

Otra caracterización que se realizará es la caracterización I-V (corriente-voltaje). Las curvas I-V muestran la variación de la corriente de fuga que circula por el sensor en función del voltaje aplicado durante la polarización inversa. Estas curvas I-V pueden indicar el voltaje de ruptura del sensor, como mencionamos anteriormente, cuando el voltaje aplicado supera este valor, se desencadena un fenómeno de avalancha de carga, que en situaciones extremas puede incluso dañar el sensor de forma irreversible. Por esta razón, es importante determinar estos valores antes de aplicar los sensores en experimentos de CMS.

Montaje experimental para las curvas I-V

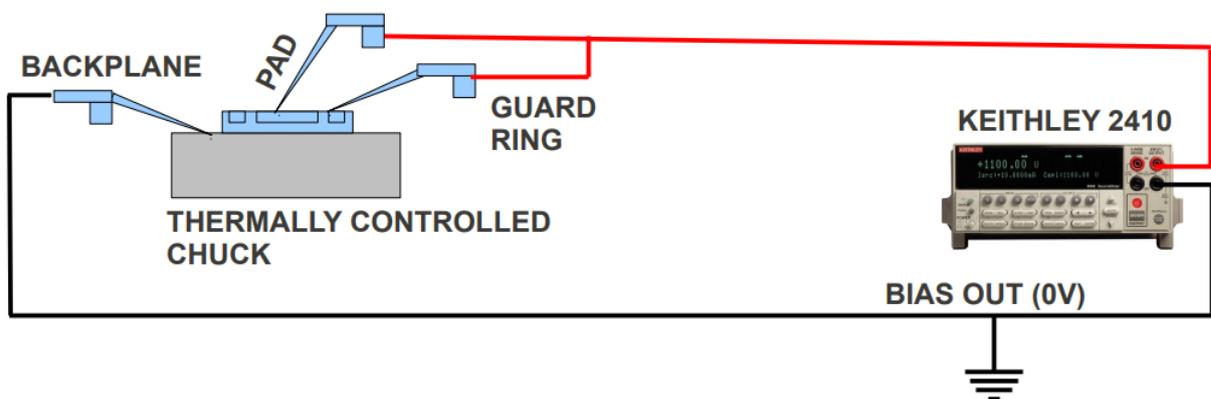


Figura 3.5: Esquema del montaje experimental para las mediciones de curva I-V.

De manera similar a las mediciones C-V, se conectan una sonda al anillo de guarda y otra al PAD, ambas sondas se ajustan a un voltaje positivo mediante la fuente de alimentación KEITHLEY. La tercera sonda se conecta al backplane y se enlaza a tierra. El dispositivo KEITHLEY, al ser un sourcemeter, puede medir la corriente al mismo tiempo que funciona como una fuente de voltaje, por lo que no es necesario utilizar un medidor LCR para las mediciones I-V. Como mencionado en el apartado (2.2.3), la corriente de fuga depende fuertemente de la temperatura, la cual incrementa a medida que se aumenta la temperatura, para solucionarlo, las medidas I-V se realizan a una temperatura de $T = -25^{\circ}\text{C}$ con la ayuda de un dispositivo enfriador. En el probe station también se dispone de un tubo de ventilación que desempeña la función de prevenir la formación de condensación de aire en la superficie del sensor por la baja temperatura.

3.4 Caracterización de los sensores irradiados

En la práctica, también tenemos a nuestra disposición sensores que han sido sometidos a radiación ionizante en un proyecto en Jožef Stefan Institute (JSI), en Ljubljana. Estos sensores han sido expuestos a diferentes niveles de radiación ($\phi = 4 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$, $\phi = 8 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$, $\phi = 15 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$ y $\phi = 25 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$). El propósito es evaluar cómo la radiación afecta a estos sensores, puesto que, como se indicó anteriormente, la radiación puede causar cambios en sus propiedades eléctricas.

Para llevar a cabo esta evaluación, se realiza la caracterización C-V para estos sensores irradiados (la caracterización I-V ya fue completada en el Instituto de Microelectrónica de Barcelona (CNM)), y se comparan las curvas C-V resultantes con las curvas de los sensores no irradiados.

4

Resultados

En este apartado, se expondrán los resultados obtenidos del análisis de los datos adquiridos durante la práctica. Se presentarán las gráficas correspondientes a las mediciones de C-V e I-V, y se discutirá sobre los parámetros extraídos de estas representaciones gráficas. Además, se llevará a cabo un análisis del perfil de dopado en algunos de los sensores, con el objetivo de visualizar cómo varía la concentración de átomos de boro en función de la profundidad. Por último, se realizará un estudio sobre el impacto de la radiación en los sensores, comparando las curvas C-V de los sensores sometidos a irradiación con aquellas de los sensores no irradiados.

4.1 Curvas I-V

En la Figura 4.1 se muestra las curvas I-V obtenidas para los sensores no irradiados

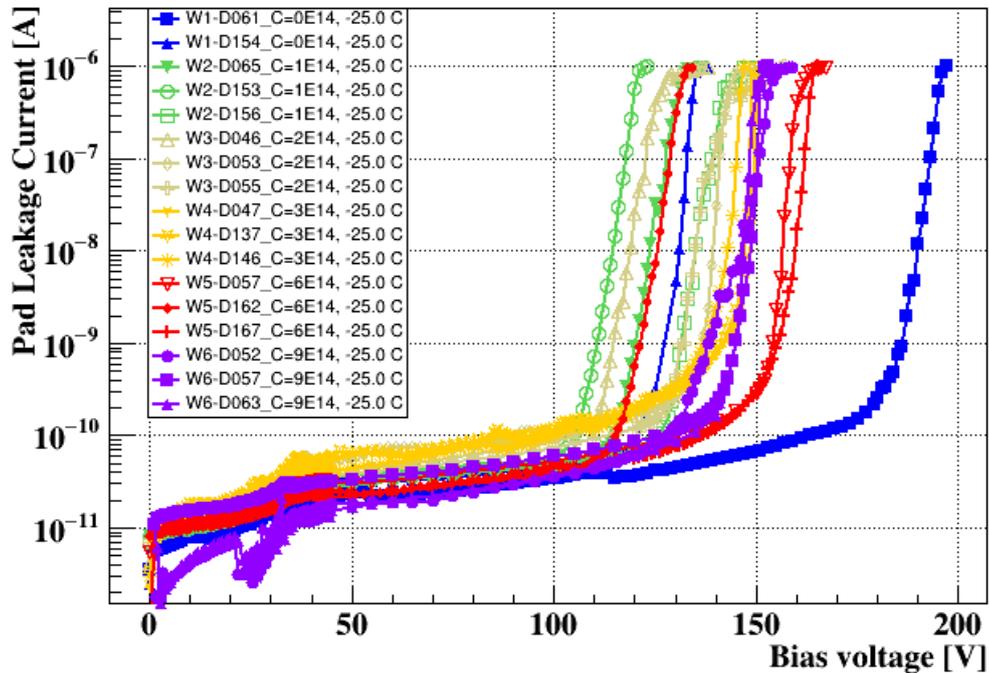


Figura 4.1: Medidas IV sobre sensores LGADs, clasificados en función de la concentración de carbono.

En la gráfica, se puede observar que la corriente aumenta suavemente hasta llegar a un punto donde experimenta un aumento abrupto. La tensión en este punto corresponde a la tensión de ruptura. Cuando la tensión aplicada es mayor que este valor, los portadores de carga en el semiconductor adquieren suficiente energía cinética para iniciar el proceso de avalancha, por lo que esta tensión es la tensión máxima que el dispositivo puede soportar para no conducir corriente significativa. Y se observa, que esta tensión queda afectada por la concentración de carbono (se explicará más adelante).

4.2 Curvas C-V

Las siguientes figuras muestran las curvas C-V obtenidas para los sensores no irradiados:

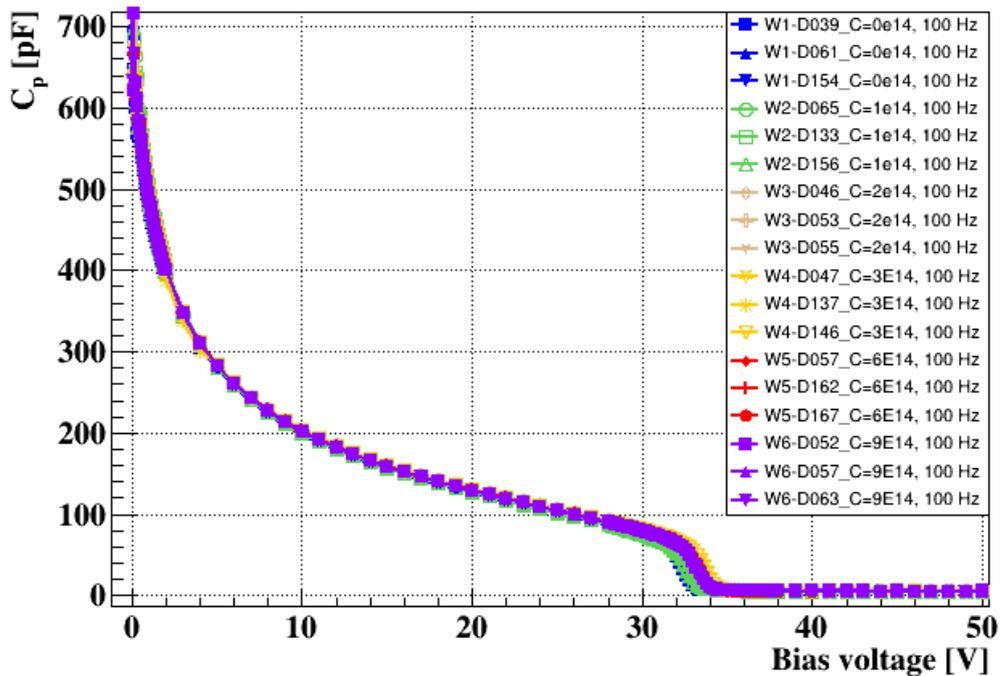


Figura 4.2: Medidas CV sobre sensores LGADs, clasificados en función de la concentración de carbono.

La Figura 4.2 muestra la dependencia de la capacitancia del sensor en función del voltaje aplicado a sus electrodos. Se observa que a medida que el voltaje aplicado aumenta, la capacitancia disminuye. Esta disminución se debe a que las cargas libres en el semiconductor son desplazadas hacia las regiones cercanas de los electrodos, lo que incrementa el espacio vacío de cargas en el sensor. De acuerdo con la ecuación (2.5), cuando se aumenta el tamaño del espacio vacío de carga, la capacitancia tiende a disminuir. Como se indicó anteriormente, la disminución de la capacitancia no es ilimitada debido a que la anchura de este espacio se encuentra limitada por el tamaño físico del sensor utilizado. Una vez que se ha vaciado completamente el sensor, la capacitancia alcanza su valor mínimo y permanece constante.

En la Figura 4.2, se destaca la presencia de una región en la que la capacitancia disminuye suavemente (desde $V = 0V$ hasta aproximadamente $V \approx 32V$). Esta región específica refleja el proceso de vaciado de cargas en la capa de multiplicación. Esta capa en particular posee una mayor concentración de átomos aceptores, lo que resulta en una mayor densidad de cargas eléctricas libres en comparación con otras regiones del semiconductor. En consecuencia, se requiere un mayor voltaje para vaciar completamente esta capa. Se puede identificar que el voltaje necesario para vaciar completamente la capa de multiplicación (conocido como voltaje de gain layer, V_{gl}) se sitúa alrededor de $V \approx 32V$.

Una vez que se ha vaciado completamente la capa de multiplicación, comienza el proceso de vaciado de cargas en la región de bulk, que abarca desde aproximadamente $V \approx 32\text{V}$ hasta alrededor de $V \approx 34\text{V}$. Esta región se caracteriza por tener una densidad de átomos de boro relativamente baja, por lo que se requiere una tensión relativamente menor para vaciar completamente la zona.

La representación gráfica de la capacitancia final de estos sensores se presenta en la Figura 4.3.

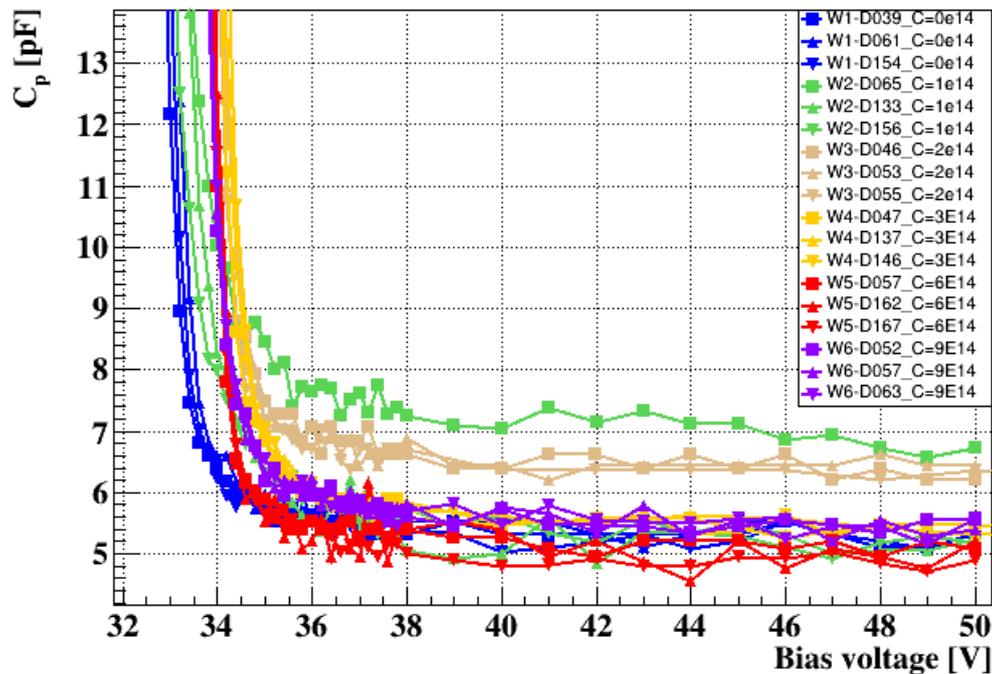


Figura 4.3: Ampliación de la Figura 4.2, mostrando la capacitancia final de los sensores LGADs.

En la figura presentada, se observa que para voltajes mayores que $V \approx 36\text{V}$, los sensores se encuentran cerca del estado de vaciado total, que es el estado de sensor que queremos conseguir cuando se son aplicados en los experimentos. También se observa que la capacitancia final se ve afectada por el nivel de dopado de carbono. Esto se debe a que estos sensores fueron fabricados en diferentes obleas. Durante el proceso de fabricación, cuando se implantan los dopantes o los átomos de carbono a través de la difusión, resulta relativamente complicado garantizar que todas las obleas tengan la misma concentración de boro y carbono (Durante el proceso de fabricación se permite un margen aceptable para la variación de la concentración de dopantes). Esta variación afecta el comportamiento eléctrico de los sensores. Por esta razón, se observa que la capacitancia final de los sensores tiende a agruparse según la oblea a la que pertenecían.

4.3 Perfil de dopado

Tal como se explicó en el apartado (3.2), es posible obtener el perfil de dopado a partir de las mediciones de capacitancia. Para ello, se calcula primero la concentración de átomos aceptores aplicando la ecuación (3.1). Por otro lado, para determinar la profundidad x_p , se utiliza la ecuación (2.5) (considerando $W \approx x_p$).

Representando la concentración N_a en función de la profundidad, se ha obtenido la siguiente gráfica:

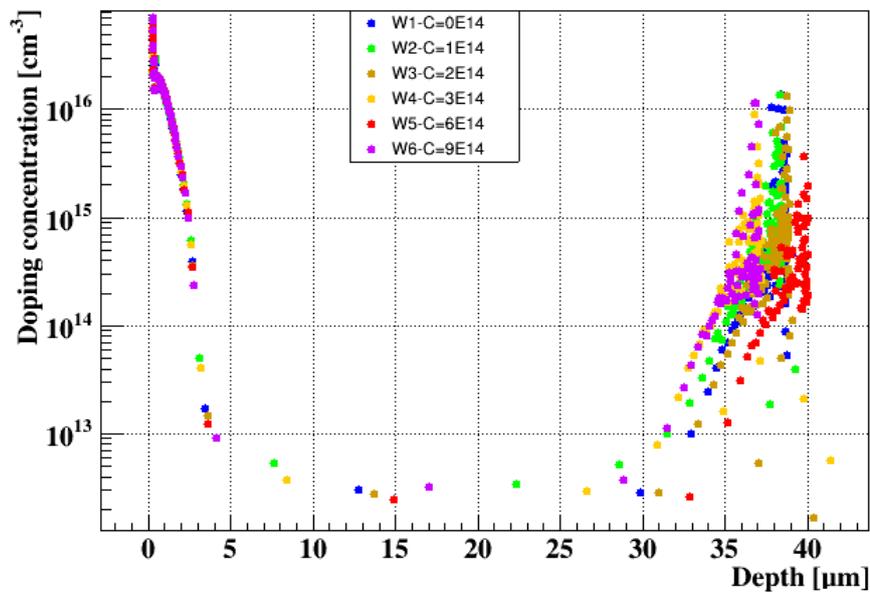


Figura 4.4: Perfil de dopado para 6 sensores de diferentes obleas.

La gráfica revela una elevada concentración de dopantes en el intervalo comprendido entre $x = 0$ y aproximadamente $x \approx 5 \mu\text{m}$. Este intervalo corresponde a la capa de multiplicación, que se caracteriza por tener una mayor concentración de átomos de boro para llevar a cabo el proceso de multiplicación por avalancha. En el intervalo comprendido entre $x \approx 5 \mu\text{m}$ y $x \approx 30 \mu\text{m}$, se encuentra la región de bulk, caracterizada por una menor concentración de boro. Más allá de $x \approx 30 \mu\text{m}$, se encuentra la región correspondiente al sustrato p^+ .

4.4 Curvas C-V (sensores irradiados)

En este apartado, los sensores LGADs que se han estudiado fueron expuestos a radiación en un proyecto del JSI y posteriormente devueltos al IFCA para su caracterización. La irradiación tiene como consecuencia la generación de defectos en la estructura cristalina del sensor. Estos defectos pueden afectar las propiedades eléctricas y de detección del dispositivo. Por lo tanto, uno de los objetivos de la práctica es analizar el cambio en las curvas C-V debido a la presencia de estos defectos.

4.4.1 fluencia $\phi = 4 \times 10^{14} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$

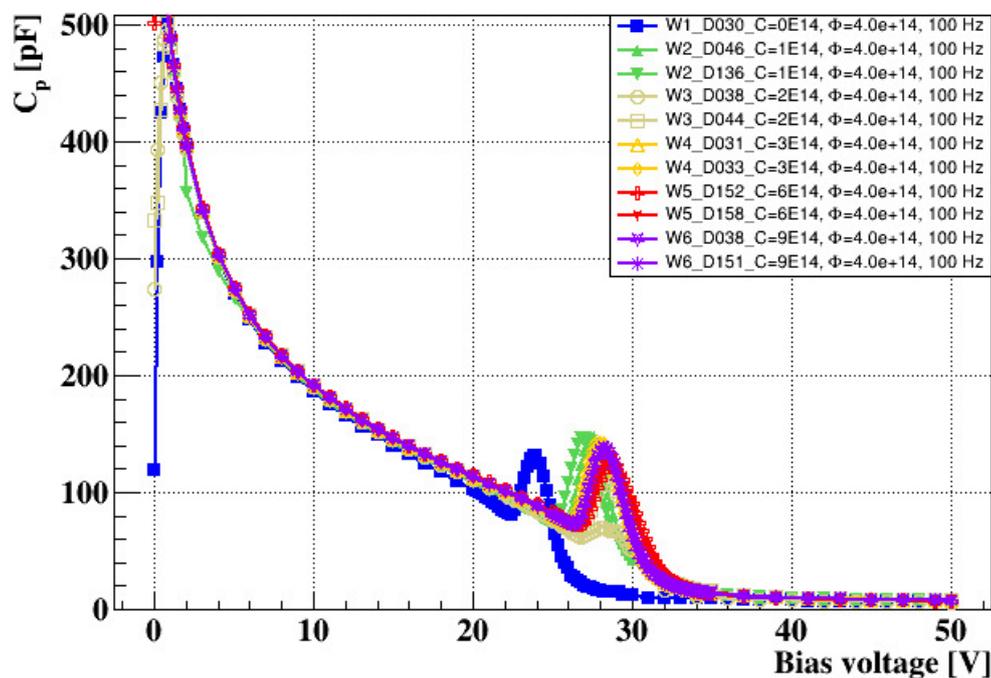


Figura 4.5: Medidas C-V sobre sensores LGADs irradiados con una fluencia $\phi = 4 \times 10^{14} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$. La frecuencia aplicada es $f = 100 \text{ Hz}$.

En la figura se presentan las mediciones realizadas en sensores irradiados con una fluencia de $\phi = 4 \times 10^{14} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$. Al comparar estos resultados con las mediciones C-V realizadas en sensores no irradiados (Figura 4.2), se observa una diferencia significativa. Esta diferencia se manifiesta en la disminución de la capacitancia y la formación de un pico en la región alrededor de un voltaje cercano a $V \approx 28 \text{ V}$.

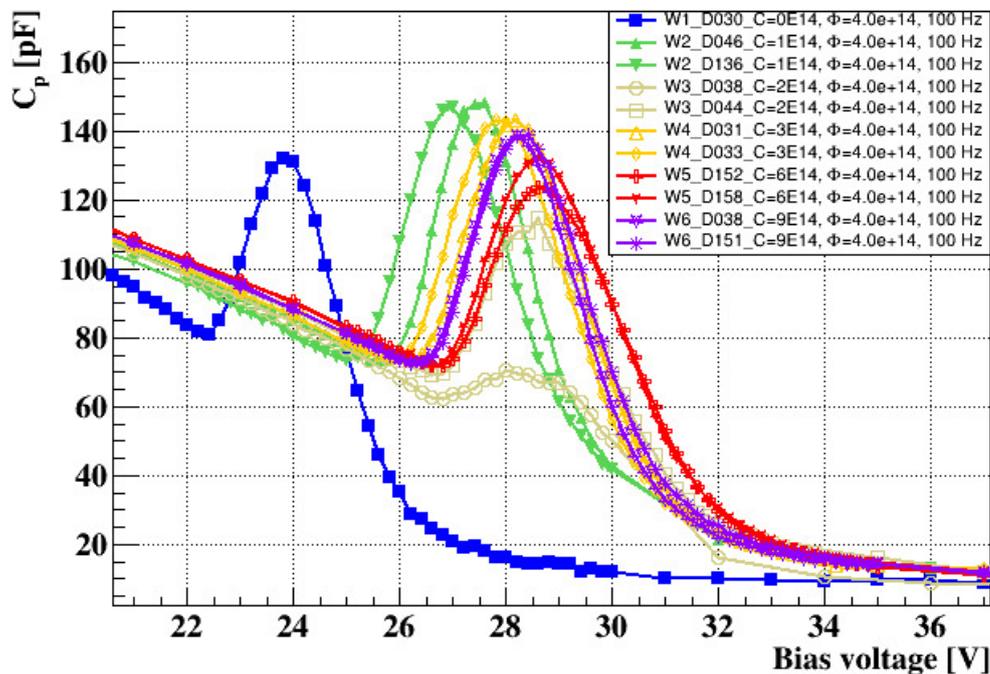


Figura 4.6: Medidas C-V sobre sensores LGADs irradiados con una fluencia $\phi = 4 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$, mostrando los picos de interés. La frecuencia aplicada es $f = 100\text{Hz}$.

La presencia del pico ha generado un considerable interés, especialmente porque en la caracterización eléctrica de los sensores irradiados llevado a cabo en el CNM, dicho pico no fue detectado. Una distinción fundamental entre ambos experimentos reside en las frecuencias de medición empleadas: en CNM se realizaron medidas a una frecuencia de $f = 10\text{ kHz}$, mientras que en IFCA las medidas se efectuaron con LCR a una frecuencia de medición de $f = 100\text{ Hz}$.

Las causas subyacentes de la aparición del pico aún se encuentran en fase de estudio. Sin embargo, las diferencias observadas en las frecuencias han llevado a considerar que este pico podría tener una relación con el fenómeno de resonancia. Es decir, existe la posibilidad de que los defectos presentes estén induciendo algún tipo de resonancia en el sensor. De manera que, en situaciones de frecuencias elevadas, el pico no se hace aparente, mientras que a una frecuencia específica de $f = 100\text{ Hz}$, la señal de entrada coincide con la frecuencia natural de vibración inherente al sistema, lo que da lugar al fenómeno de resonancia. Además, este pico se encuentra alrededor del cambio de la pendiente en la curva, lo que nos indica que está relacionado con la capa de multiplicación.

La Figura 4.6 también muestra que a medida que la concentración de carbono en el sensor disminuye, el voltaje necesario para vaciar el sensor también disminuye. Dado que este voltaje está relacionado con la concentración de dopantes en la capa de multiplicación (menor sea la concentración de dopantes, menor será el voltaje necesario para vaciar el sensor), se puede concluir que la adición de carbono otorga al sensor cierta capacidad de resistencia frente a la radiación. En

otras palabras, a medida que la concentración de carbono incrementa, se reduce la cantidad de átomos de boro que se desactivan por la irradiación.

4.4.2 fluencia $\phi = 25 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$

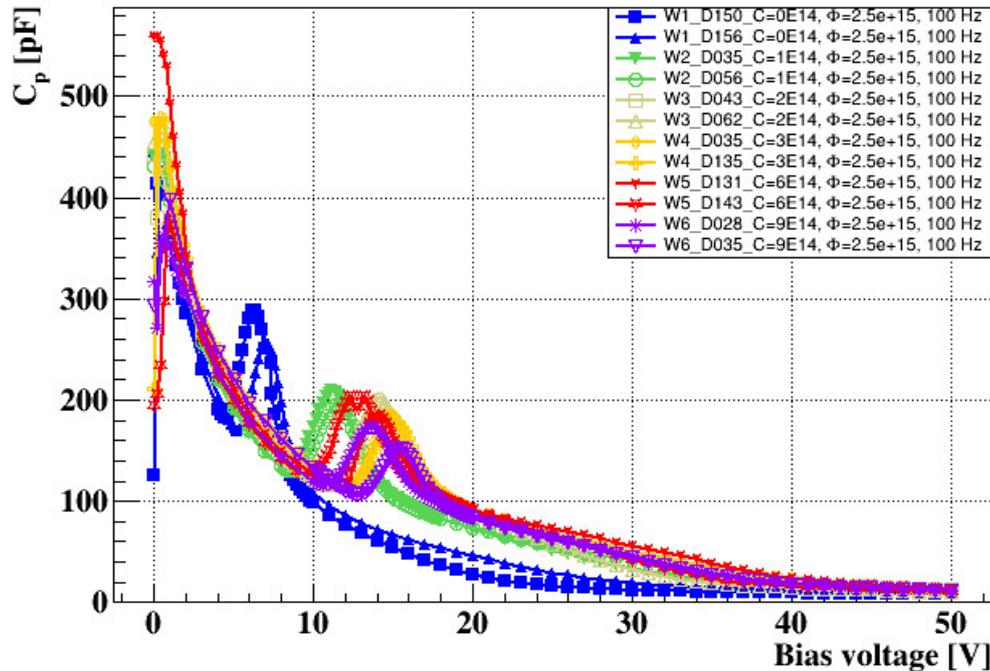


Figura 4.7: Medidas CV sobre sensores LGADs irradiados con una fluencia $\phi = 25 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$. La frecuencia aplicada es $f = 100\text{Hz}$.

La Figura 4.7 presenta los resultados de las mediciones realizadas en sensores que han sido expuestos a una fluencia más alta: $\phi = 25 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$. En este caso, la cantidad de radiación recibida es significativamente mayor en comparación con el caso anterior. Comparandola con la Figura 4.5, se puede observar que las curvas muestran un fenómeno en el cual parecen "desplazarse" hacia la izquierda. Esto se debe a que cuando la radiación recibida es más intensa, se incrementa la cantidad de defectos producidos, estos defectos interactúan con los átomos de boro y causan su desactivación. Y debido a que la concentración de boro activo disminuye, se necesita menor voltaje para vaciar el sensor. La presencia de los defectos también provoca un aumento de la corriente de fuga y una modificación del espacio vacío de cargas, esta última resulta en la reducción de la intensidad del campo eléctrico interno y, como resultado, en la disminución de la ganancia del sensor.

4.4.3 fluencias $\phi = 8 \times 10^{14} \text{n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ y $\phi = 15 \times 10^{14} \text{n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$

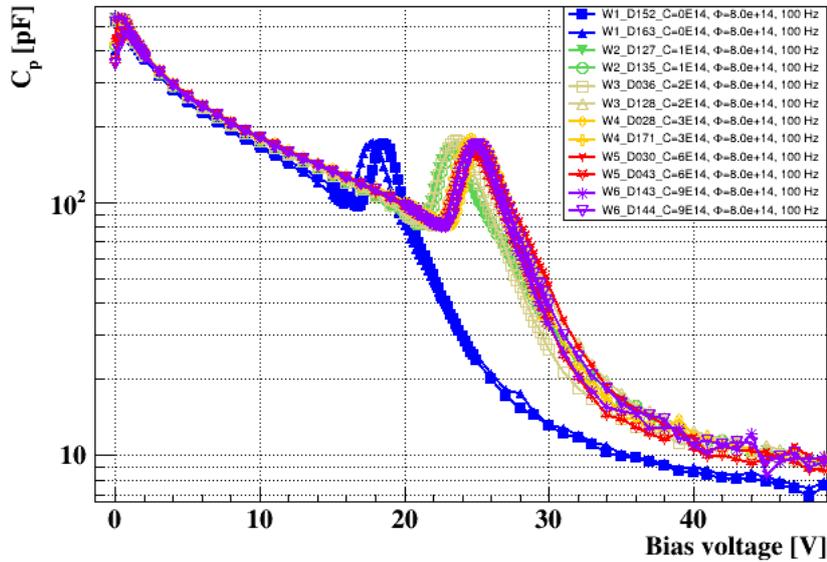


Figura 4.8: Medidas CV sobre sensores LGADs irradiados con una fluencia $\phi = 8 \times 10^{14} \text{n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ en escala logarítmica. La frecuencia aplicada es $f = 100 \text{Hz}$.

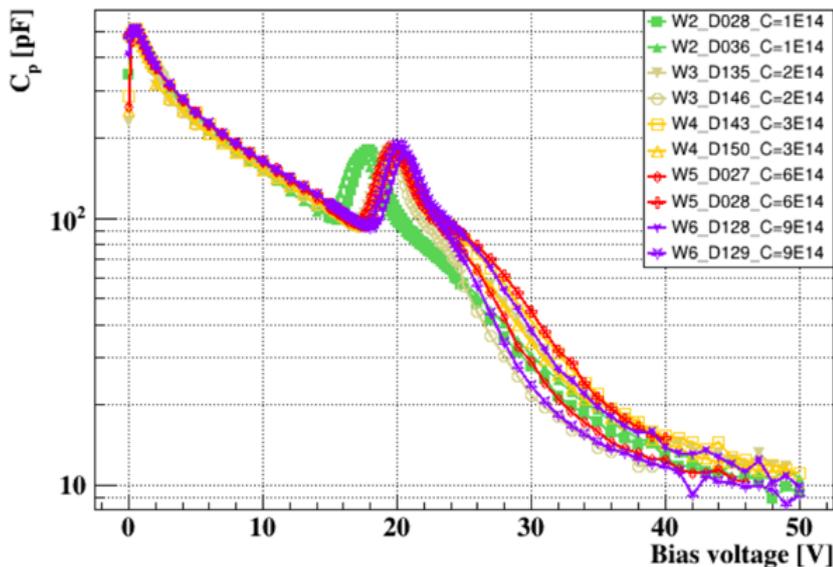


Figura 4.9: Medidas CV sobre sensores LGADs irradiados con una fluencia $\phi = 15 \times 10^{14} \text{n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ en escala logarítmica. La frecuencia aplicada es $f = 100 \text{Hz}$.

Las figuras 4.8 y 4.9 presentan los resultados de las mediciones realizadas en sensores que han sido expuestos a las fluencias $\phi = 8 \times 10^{14} \text{n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ y $\phi = 15 \times 10^{14} \text{n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ respectivamente. La gráfica correspondiente a la fluencia $\phi = 15 \times 10^{14} \text{n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ reviste un interés significativo, puesto que esta fluencia es la que normalmente enfrentan nuestros sensores en el experimento de CMS. Al comparar esta gráfica con la de sensores no irradiados (Figura 4.2), se observa que en el caso no irradiado el voltaje de gain layer tiene un valor entorno a $V_{gl} \approx 32 \text{V}$, mientras en el caso irradiado, este voltaje se reduce a $V_{gl} \approx 20 \text{V}$. Eso es la consecuencia de la reducción de la cantidad de boro activo en la capa de

multiplicación, y tiene como resultado la disminución de la ganancia del sensor. Dado que en CMS estos sensores estarán mucho tiempo en funcionamiento, van a experimentar este cambio en su funcionamiento, y para solucionar este problema, se recurre a incrementar el voltaje aplicado para compensar la pérdida de la eficiencia de recolección de cargas y disminuir la temperatura para reducir la corriente de fuga.

4.5 Trampas de carga debido a radiación

Un fenómeno interesante observado en la práctica es el desplazamiento de la curva C-V para el mismo sensor. Cuando se realiza una segunda medida (una segunda polarización) de C-V inmediatamente después de la primera, se ha observado que la segunda curva se desplaza apreciablemente hacia derecha.

El desplazamiento posiblemente se debe a la presencia de los defectos causados por la radiación, cuando las cargas eléctricas se encuentran cerca de los niveles de energía de estos defectos, quedan atrapadas temporalmente, modificando de esta forma el espacio de carga. Por lo tanto, en la primera polarización quizás no se ha llegado a vaciar completamente el sensor, quedan cargas atrapadas por los defectos, y finalmente se liberan en polarizaciones posteriores. Para verificar la hipótesis anterior, se llevó a cabo una tercera polarización. Si la hipótesis fuese correcta, la curva correspondiente a esta tercera polarización no debería diferir de la segunda curva. El resultado de esta comparación se presenta en la Figura 4.10. Y se ha observado que efectivamente, no hay mucha diferencia entre las

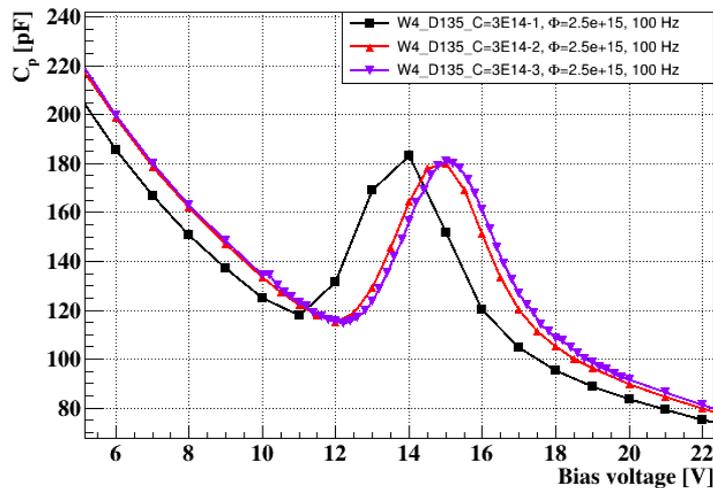


Figura 4.10: Medidas CV sobre sensores LGADs irradiados con una fluencia $\phi = 25 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$. La frecuencia aplicada es $f = 100Hz$. En este caso se ha repetido 3 veces la medida, los puntos negros corresponden a la primera polarización, y los puntos rojos y violetas corresponden a la segunda y tercera polarización respectivamente.

medidas de la segunda y la tercera polarización.

5

Conclusiones

La caracterización eléctrica de los LGADs ha proporcionado informaciones acerca su comportamiento eléctrico en diversas condiciones. A lo largo de este estudio, se ha llevado a cabo un análisis de las relaciones C-V e I-V del sensor, obteniendo las gráficas correspondientes, a partir de las cuales se han visualizado los parámetros importantes del sensor, como el voltaje de gain layer, la capacitancia final y el voltaje de ruptura.

Durante el trabajo, se ha realizado un estudio sobre el efecto de la irradiación sobre los sensores LGADs, los resultados obtenidos muestran una relación directa entre los niveles de radiación y la respuesta eléctrica de los LGADs. Con un aumento en la radiación recibida, se observa una mayor desactivación de átomos de boro, lo que conduce a una reducción en el voltaje de gain layer. También se ha observado que la radiación genera defectos en la estructura de los sensores, que a su vez provocan la aparición de un pico de defecto en las curvas C-V del sensor. Aunque el origen exacto de este pico aún está siendo investigado, pero se sospecha que este pico está relacionado con el fenómeno de resonancia inducido por los defectos.

Y por último, se ha observado que la adición de carbono en la capa de multiplicación de LGAD reduce de manera significativa el fenómeno de desactivación de boro, puesto que los átomos de carbono tienen la capacidad de interactuar con los defectos generados por la radiación, impidiendo que estos defectos afecten a los átomos de boro y causen su desactivación.

Bibliografía

- [1] “Mtd-aurelijus.” https://indico.cern.ch/event/749281/contributions/3099854/attachments/1715187/2767163/MTD_Aurelijus.pdf.
- [2] “Lhc.” <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>.
- [3] D. Del Re, “Precision timing with the cms mtd barrel timing layer for hl-lhc,”
- [4] R. S. Romaniuk, “A new boson with a mass of 125 gev observed with the cms experiment at the large hadron collider,”
- [5] “High-luminosity lhc.” <https://home.cern/science/accelerators/high-luminosity-lhc>.
- [6] J. V. J. Bendavid, A. Bornheim, “A mip timing detector for the cms phase-2 upgrade technical design report cms collaboration,”
- [7] W. R. Leo, “Techniques for nuclear and particle physics experiment, 1994,”
- [8] D. A. Neamen, “Semiconductor physics and devices, 2012,”
- [9] M. B. M. Ferrero, R. Arcidiacono, “Radiation resistant lgad design,”
- [10] “Cms.” <https://home.cern/science/experiments/cms>.
- [11] “Band theory of solids.” <https://academiceasy.com/2017/05/band-theory-of-solids.html>.
- [12] “Low-gain avalanche detectors (lgad).” <https://rd50.web.cern.ch/doc/talks/2014-11-IEEE-2014-LGAD-poster-4%203-sm.pdf>.
- [13] Z. He, “Review of the shockley–ramo theorem and its application in semiconductor gamma-ray detectors,”
- [14] Marcos.Fernandez, “In-depth characterization of semiconductor particle detectors: silicon diodes and microstrips,”
- [15] X. J. Kewei Wu, “Design and testing of lgad sensor with shallow carbon implantation,”

- [16] J. C. Campbell, "Recent advances in telecommunications avalanche photodiodes,"
- [17] S. H. Moritz Wiehe, Marcos Fernández García, "Study of the radiation-induced damage mechanism in proton irradiated low gain avalanche detectors and its thermal annealing dependence,"

Índice de Figuras

1.1	Esquema del detector CMS, mostrando sus componentes principales. [4]	8
1.2	Esquema de un detector MTD, mostrando sus componentes principales como Barrel Timing Layer y Endcap Timing Layer. [6]	9
1.3	Disco de MTD, donde se encuentran los sensores LGADs [6].	10
2.1	Comparación de la conductividad de un material a partir de su estructura de bandas de energía [11].	12
2.2	Unión P-N, la región de color gris corresponde al espacio vacío de cargas, la línea negra vertical corresponde a la superficie de la unión, las cargas de color azul son cargas fijas (iones). El espacio vacío de cargas se extiende desde la superficie de la unión hasta una distancia x_p en la región p, y una distancia $-x_n$ en la región n [14].	14
2.3	Esquema de la unión pn, mostrando el espacio vacío de cargas en la configuración de polarización inversa, también muestra el proceso de la creación de pares cuando se incide una partícula externa sobre la unión [14].	15
2.4	Corriente que circula por un diodo semiconductor en función del voltaje aplicado [14].	17
2.5	Sección transversal de un sensor LGAD, mostrando sus componentes principales.	19
3.1	Esquema de las LGAD utilizadas, mostrando los componentes principales. Los espesores no están escalados.	22
3.2	La imagen de un sensor LGAD. Mostrando los puntos donde se contactan con las sondas a la hora de realizar las medidas.	23
3.3	Imagen del probe station.	24
3.4	Esquema del montaje experimental para las mediciones de curva C-V.	25
3.5	Esquema del montaje experimental para las mediciones de curva I-V.	26

4.1	Medidas IV sobre sensores LGADs, clasificados en función de la concentración de carbono.	29
4.2	Medidas CV sobre sensores LGADs, clasificados en función de la concentración de carbono.	30
4.3	Ampliación de la Figura 4.2, mostrando la capacitancia final de los sensores LGADs.	31
4.4	Perfil de dopado para 6 sensores de diferentes obleas.	32
4.5	Medidas C-V sobre sensores LGADs irradiados con una fluencia $\phi = 4 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$. La frecuencia aplicada es $f = 100Hz$	33
4.6	Medidas C-V sobre sensores LGADs irradiados con una fluencia $\phi = 4 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$, mostrando los picos de interés. La frecuencia aplicada es $f = 100Hz$	34
4.7	Medidas CV sobre sensores LGADs irradiados con una fluencia $\phi = 25 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$. La frecuencia aplicada es $f = 100Hz$	35
4.8	Medidas CV sobre sensores LGADs irradiados con una fluencia $\phi = 8 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$ en escala logarítmica. La frecuencia aplicada es $f = 100Hz$	36
4.9	Medidas CV sobre sensores LGADs irradiados con una fluencia $\phi = 15 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$ en escala logarítmica. La frecuencia aplicada es $f = 100Hz$	36
4.10	Medidas CV sobre sensores LGADs irradiados con una fluencia $\phi = 25 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$. La frecuencia aplicada es $f = 100Hz$. En este caso se ha repetido 3 veces la medida, los puntos negros corresponden a la primera polarización, y los puntos rojos y violetas corresponden a la segunda y tercera polarización respectivamente.	37



Índice de Tablas

3.1	Concentración de carbono correspondiente a cada encabezamiento (cada oblea)	23
-----	---	----