

Detector de Partículas Beta

Hernán Alejandro Silva
Facultad Regional Avellaneda
Universidad Tecnológica Nacional
Buenos Aires, Argentina
hernansilva2002@gmail.com

Elías Ramírez
Facultad Regional Avellaneda
Universidad Tecnológica Nacional
Buenos Aires, Argentina
ramirezeliass.marcos@gmail.com

Florencia Mincone
Facultad Regional Avellaneda
Universidad Tecnológica Nacional
Buenos Aires, Argentina
flormincone1@gmail.com

Nicolás Lahorca
Facultad Regional Avellaneda
Universidad Tecnológica Nacional
Buenos Aires, Argentina
nicolas.lahorca.k@gmail.com

Luciano Justiniano
Facultad Regional Avellaneda
Universidad Tecnológica Nacional
Buenos Aires, Argentina
luciano.nicolas.justiniano@gmail.com

Abstract—Constantemente los objetos que nos rodean emiten partículas que los sentidos humanos no son capaces de percibir. Estas partículas pueden ser perjudiciales para la salud y es necesario cuantificarlas y/o detectarlas para evitar o reducir la exposición a ellas. Para lograr ese objetivo, en este documento se presenta la realización de un dispositivo que cumpla la función de detectar un tipo de radiación, llamada radiación β . En particular, se hará hincapié en la radiación por emisión de electrones, a este tipo de radiación se la conoce como radiación β^- . Además, se propone el análisis de su principio de funcionamiento, los materiales necesarios para su construcción y sus limitaciones.

I. INTRODUCCIÓN

El presente documento sirve como informe sobre el proyecto de fin de año de la asignatura Física Electrónica. Dicho proyecto se trata de un detector y contador de partículas beta, cubriendo de esta forma el tema radiación de la asignatura. Para más información sobre el proyecto, se recomienda visitar el repositorio del mismo que se encuentra en [1].

II. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

A. ¿Que son las radiaciones β ?

Las radiaciones β son un tipo de radiación ionizante, la cual se caracteriza por emitirse durante el proceso de desintegración o decaimiento β . Dicho proceso puede producirse de dos diferentes formas.

- 1) *Emisión de electrones*: Un núcleo inestable de un átomo emite un electrón y un antineutrino, convirtiéndose de esta manera un neutrón en un protón como *Desintegración β^-* .
- 2) *Emisión de positrones*: El núcleo inestable emite un positrón, es decir, un electrón cargado positivamente, junto con un neutrino. De esta forma se logra transformar un protón en un neutrón. Este proceso recibe el nombre de *Desintegración β^+* .

Generalmente, las fuentes más comunes de radiación de partículas β son piedras con pequeñas cantidades de uranio, y diferentes fuentes de potasio, como el cloruro de potasio (KCl), el cual contiene baja cantidad del isótopo potasio 40 (K^{40}), capaz de emitir partículas β^- .

B. Formas de captar las partículas

El dispositivo electrónico más estudiado y utilizado para detectar la radiación de diferentes tipos de partículas es el diodo PIN o fotodiodo. Como muestra la Fig. 1, este es similar en cuanto a estructura a un diodo de juntura PN, la diferencia radica en que el PIN tiene una zona de material semiconductor intrínseco (zona I) entre la zona dopada positivamente (zona P) y la zona dopada negativamente (zona N).

Al ser un material semiconductor, la zona I contiene átomos de silicio que, al momento de ser impactados por una partícula irradiada debido a una fuente radioactiva, genera la rotura de los enlaces covalentes del átomo, produciendo un *par electrón-laguna*. La generación de este par tiene como consecuencia un pulso de corriente de decenas hasta cientos de microampere que atraviesan al diodo. Esta corriente puede ser medida. Cuando al diodo se lo polariza en forma inversa (cátodo con potencial más alto que el del ánodo), se generan dos regiones de vaciamiento: La primera se encuentra localizada entre la zona P y la zona I, y la otra entre dicha zona intrínseca y la zona N; en estas regiones, no se encuentran portadores libres, sino que existen iones fijos cargados positiva y negativamente. Estos iones fijos son los responsables que en dichas regiones se encuentre un campo eléctrico, el cual atrapa e impulsa a los portadores, aumentando la intensidad de corriente eléctrica a través del diodo.

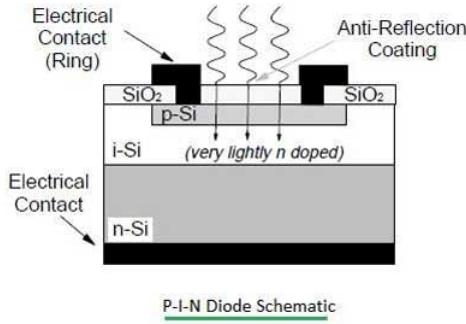


Fig. 1. Corte transversal de una estructura típica del diodo PIN

C. El fotodiodo como detector de partículas β

La zona intrínseca explicada anteriormente es conocida como *zona sensible*, porque es donde las partículas irradiadas impactan. Como se menciona en [2], las zonas sensibles de los fotodiodos son capaces de absorber algunos tipos de radiaciones ionizantes. La detección de las partículas que impactan está directamente relacionada con la profundidad de la zona sensible del diodo; esta zona (región de vaciamiento) aumenta de profundidad al elevar el voltaje de polarización inversa del dispositivo, dicha relación responde matemáticamente a

$$d(V) = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{C(V)} \quad (1)$$

donde:

- $d(V)$ es la profundidad de la zona sensible.
- ϵ_r es la permitividad relativa del material, en este caso el Si (silicio).
- ϵ_0 es la permitividad del vacío.
- A es el área física de la zona sensible del diodo.
- $C(V)$ es la capacitancia del diodo a un determinado nivel de voltaje de polarización inversa.

Este valor de profundidad permite conocer la energía cinética máxima que se puede detectar de una partícula. Como se mencionó anteriormente, los valores de interés corresponden a partículas β^- (electrones). Para establecer el valor de energía mencionado, es necesario conocer la magnitud del rango *CSDA* (*continuous slowing down approximation*). El rango CSDA es una aproximación muy cercana de la media de longitud de una trayectoria que recorre una partícula cargada a medida que se frena hasta alcanzar el reposo [3]. Para los electrones, los valores del CSDA están tabulados en [3].

Para obtener una medición fiable, es necesario que el rango CSDA sea menor o igual que la profundidad de la zona sensible del diodo; esto es

$$R_p \leq d(V) \quad (2)$$

donde R_p es el rango CSDA.

De esta forma, la energía de la partícula incidente es completamente disipada en el interior de la zona sensible.

III. CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS DEL DETECTOR

El dispositivo a realizar para detectar las partículas tiene como foco ser portable y producir una señal de detección a la salida con amplitud observable al medir con un osciloscopio digital. Con estos objetivos definidos, el dispositivo estará compuesto por dos etapas:

- Etapa de detección: La opción mas documentada para la detección de estas partículas es el diodo PIN BPW34, que es posible observar en la Fig. 2(a); si se logra aislarlo completamente de la luz incidente y de interferencias electromagnéticas, es capaz de detectar radiaciones ionizantes en su zona sensible.
- Etapa de amplificación: Es necesario tener un nivel de ruido muy reducido, ya que un nivel alto escondería los picos debido a los impactos de las partículas. El candidato ideal que satisface esos requerimientos es un amplificador operacional de alta impedancia de entrada, como lo es la serie OPAx134 del fabricante Texas Instruments. A su vez, esta etapa está compuesta por una etapa de transimpedancia (conversión de la corriente de los fotodiodos en tensión) y otra de amplificación diferencial.

Ambas etapas deben tener su especificación correspondiente.

A. Etapa de detección

Debido a que uno de los objetivos es que el dispositivo detector sea portable, la alimentación del circuito es de una batería de 9 V, con una tensión nominal de 9,9 V. Con este valor de alimentación, el circuito amplificador entrega aproximadamente 8 V de polarización inversa a los diodos. La Fig. 2(b) muestra que para un nivel de tensión de 8 V de V_R corresponde una capacitancia de aproximadamente 22 pF.

Reemplazando la capacitancia (para 8 V de V_R) en (1), se obtiene

$$d(V) = \frac{11,68 \times 8,85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1} \times 7.02 \text{ mm}^2}{22 \text{ pF}}$$

$$d(V) = 32,98 \text{ } \mu\text{m}$$

$$d(V) \approx 33 \text{ } \mu\text{m}$$

Esto nos indica que un electrón puede viajar como máximo 33 μm dentro de la zona sensible, de manera tal que se cumpla lo expresado con anterioridad en (2).

Debido a que la base de datos de [3] expresa los valores de rango CSDA en unidades de g/cm^2 , es necesario que el $d(V)$ calculado esté también en dicha unidad; para esto, calculamos

$$\sigma = \rho t$$

donde σ es la densidad superficial, ρ es la densidad del silicio y t es el espesor de la zona sensible ($d(V)$ calculado).

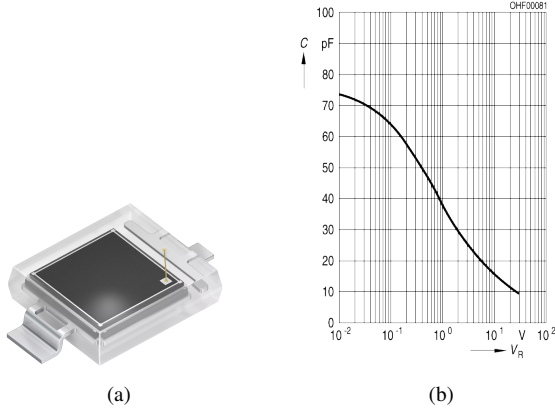


Fig. 2. Fotodiodo BPW34S de la marca Osram. (a) Imagen real del fotodiodo. (b) Curva característica C-V del BPW34S

Para 33 μm , esto es

$$\begin{aligned}\sigma &= \rho \cdot t \\ \sigma &= 2,32 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \times 0,0033 \text{ cm} \\ &= 7,6 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}\end{aligned}$$

En la base de datos de [3] es posible observar que para el Si, la energía cinética máxima del electrón para un rango de $7,6 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ es 60 KeV.

Con el fin de anular interferencias electromagnéticas externas y la luz del ambiente, el circuito se ubica dentro de un gabinete estanco de aluminio.

B. Etapa de amplificación

El amplificador operacional, cuyas descripciones se explicó anteriormente, consta de 2 etapas; ambas se pueden ver en la Fig. 3.

- Etapa de transimpedancia (primer etapa): Para transformar los picos de corriente en picos de voltaje es necesario utilizar un primer amplificador en configuración transimpedancia; su característica fundamental es que la corriente generada en los diodos (decenas de microampere) atraviesa una resistencia de realimentación de valor grande, generando, por ley de Ohm, una caída de tensión en ella. A la salida del primer amplificador tendremos

$$V_{out1} = V_{ref1} - I_D R_{fb}$$

donde $V_{ref1} = V \cdot R1/(R1 + R2)$ es la tensión de referencia del primer amplificador; su valor tiene que ser 8 V y se logra a partir del divisor de voltaje entre las resistencias R1 y R2 de la Fig. 3. I_D es la corriente de los diodos y R_{fb} es la resistencia de realimentación (*feedback*), equivalente a R3 en la Fig. 3

- Etapa de amplificación (segunda etapa): V_{out1} es de valor de tensión muy débil, por ello es necesario amplificar la salida de la primera etapa. Esto es posible mediante un segundo amplificador que toma como entrada V_{out1} .

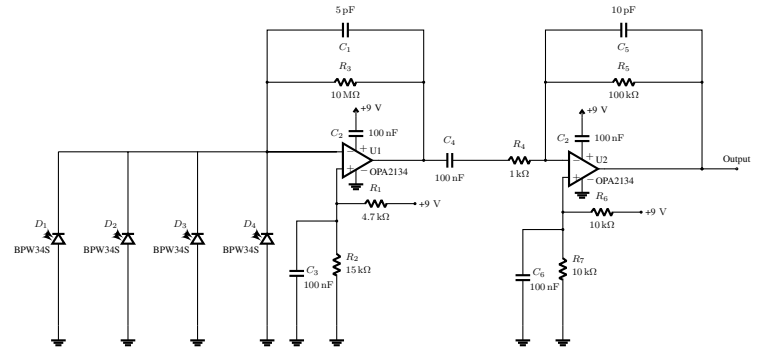


Fig. 3. Circuito completo

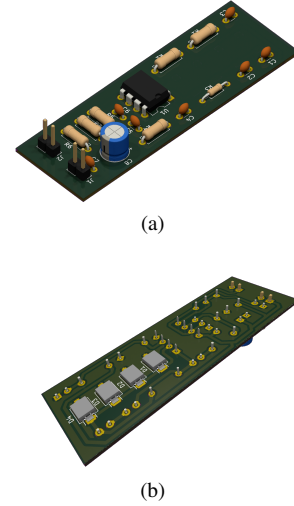


Fig. 4. Modelado 3D del PCB. (a) Parte frontal, (b) parte posterior

Al utilizar 2 amplificadores operacionales (uno por etapa), es necesario adoptar el amplificador OPA2134 de la línea OPAx134 previamente mencionada.

IV. LIMITACIONES DEL DISEÑO

Las limitaciones o posibles mejoras del diseño actual son las siguientes

- Niveles de energía cinética detectables: Como se ha expresado anteriormente, el nivel máximo de energía medible es 60 KeV, lo cual es un valor relativamente bajo para partículas β^- ; partículas con más energía no serán medidas correctamente. Esto es debido principalmente al área efectiva de detección (área física de la zona sensible de los diodos) y al valor de capacitancia del diodo para V_R dado. Una mejora viable para este problema es el aumento del voltaje de alimentación, de manera tal que aumente V_R .
- Nivel de ruido: el capacitor C4 que se puede observar en la Fig. 3 tiene un papel fundamental en los niveles de ruido de la salida del circuito. Empíricamente se pudo advertir que utilizando un valor de 22 pF en lugar de 5 pF, las mediciones de los picos fueron más limpias.

V. CONCLUSIONES

Aunque el diseño de detectores de partículas con fotodiodos requiere de un nivel de precisión muy grande para evitar capacitancias parásitas y obtener el menor nivel de ruido posible montado en la señal de salida, es posible realizar mediciones de radiación β — utilizando un amplificador operacional basado en JFET en configuración transimpedancia.

REFERENCES

- [1] “Detector de partículas beta.” [Online]. Available: <https://github.com/hernansilva02/fotodiodo-project.git>
- [2] O. Keller, M. Benoit, A. Müller, and S. Schmeling, “Smartphone and tablet-based sensing of environmental radioactivity: Mobile low-cost measurements for monitoring, citizen science, and educational purposes,” *Sensors*, vol. 19, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/19/4264>
- [3] M. Berger, J. Coursey, M. Zucker, and J. Chang, “Stopping-power & range tables for electrons, protons, and helium ions,” National Institute of Standards and Technology, Tech. Rep., October 2009. [Online]. Available: <https://www.nist.gov/pml/stopping-power-range-tables-electrons-protons-and-helium-ions>
- [4] U.S Department of Energy. Doe explains...beta decay. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/science/doe-explainsbeta-decay>
- [5] “Diy particle detector.” [Online]. Available: https://github.com/ozel/DIY_particle_detector.git