

Practica 1: Detectores de Fotones

Carlos Andres Pinzon Osorio¹

LA ConGA Physics - Universidad Antonio Nariño

Resumen Los detectores de fotones son elementos que generan una señal eléctrica a partir de la interacción con la luz o cualquier otro tipo de radiación. Son usados generalmente para la identificación de partículas producto de eventos generados en experimentos o también por causas naturales. En este documento se realizó la exposición de algunos elementos que tienen que ver la sensibilidad a la radiación tales como: Los tubos fotomultiplicadores, los detectores Cherenkov y los detectores de estado sólido o también llamados de semiconductor. Al mismo tiempo se realiza la simulación de un pulso generado por un fotón y la forma en la cual mediante la implementación de un circuito se amplifica, invierte y corrige la señal de salida.

Keywords: Tubo Fotomultiplicador · Detector Cherenkov · Semiconductor · Efecto Fotoeléctrico · Amplificador operacional

1. Tubos Fotomultiplicadores

Los fotomultiplicadores corresponden a unos dispositivos que permiten detectar luz con un alto grado de sensibilidad teniendo sus bases en el denominado efecto fotoeléctrico. Debido a este fenómeno se generan una serie de electrones que para este contexto se denominan fotoelectrones, aquellos fotoelectrones son acelerados hacia una serie de electrodos, donde este efecto de atracción se produce debido a un campo eléctrico creado a partir de una tensión que se suministra externamente.

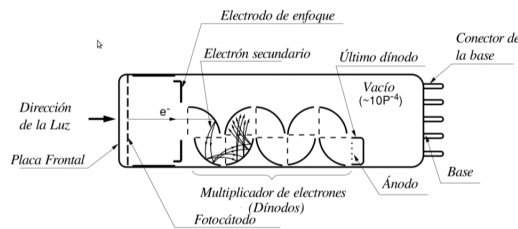


Figura 1: Tubo Fotomultiplicador[1]

Actualmente los fotomultiplicadores tienen diversas aplicaciones en diferentes campos del conocimiento como lo son la astronomía, medicina, biología entre otros.

Los fotomultiplicadores estan constituidos por cuatro elementos que cumplen con diferentes funciones con el fin de obtener una optima deteccion, aquellas piezas son el fotocatodo, el multiplicador de electrones y el anodo.

1.1. El Fotocatodo

El fotocatodo es un elemento con alta sensibilidad a la radiacion que esta constituido de una capa hecha con base a una sustancia metalica como el cesio, sodio o antimonio dispuestos sobre una base de cuarzo o vidrio, de tal manera que cuando se expone a determinado tipo de luminosidad descarga electrones.

La descarga de electrones de la capa metalica es producida porque estas absorben la energia de los fotones. seguidamente los electrones son dirigidos a un anodo en lo que se llama fotoemision.

La fotoemision de electrones depende de la cantidad de radiacion incidente y del material del cual este hecha la superficie de tal manera que teniendo esos dos aspectos en cuenta se crea una relacion de proporcionalidad directa con la cantidad de electrones emitidos.

1.2. Multiplicador de Electrones

Es un dispositivo que tiene como principal aplicacion aumentar la tasa de emision de electrones de una corriente de electrones. En escencia funciona de forma similar al fotodiodo , con la unica diferencia de que en este caso el material es expuesto a una corriente de electrones generando que ese material emita muchos mas electrones de los que habian inicialmente.

Los materiales usados tambien son generalmente placas metalicas, en este caso son varias placas ubicadas de manera consecutiva sometidas igualmente a diferentes diferencias de potencial de tal manera que se produzca una sucesion de saltos de electrones de una capa a otra que continuan a traves del dispositivo donde finalmente se obtiene una corriente mayor a la inicial.

Las placas que constituyen el multiplicador se denominan dinodos y estan dispuestos tal como se muestra en la Figura 2.

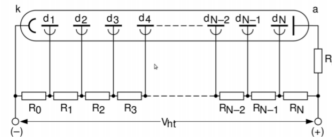


Figura 2: Multiplicador[1]

Al final del multiplicador se encuentra el anodo, que es un elemento que se encarga de recolectar el flujo de electrones producido y transformarlo en una señal eléctrica de salida.

1.3. Efecto Fotoelectrico

El principio de funcionamiento del tubo fotomultiplicador es el efecto fotoelectrico (EF), que consiste en la emisión de electrones cuando sobre un material con características especiales se hace incidir algún tipo de radiación.

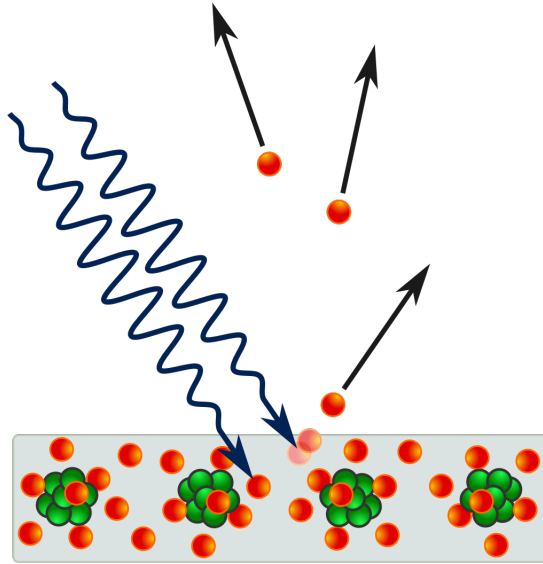


Figura 3: Emisión en el Efecto Fotoelectrico

El EF puede ser descrito de forma cuantitativa mediante la expresión (1).

$$hf = hf_o + \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

En donde se puede leer que la energía de un electrón emitido es igual a la denominada función trabajo que corresponde a la energía mínima necesaria para liberar un electrón adicional a la energía cinética del electrón emitido.

Ahora para poder determinar la cantidad de electrones recolectados en el anodo se hace uso de la expresion (2).

$$\eta_a = n_k \prod_{i=1}^N g_i \quad (2)$$

donde n_k corresponde al numero de fotones incidentes en el primer dinod, g_i representa la ganancia electronica de tal manera forma que el producto entre n_k y g_i indican el numero de electrones secundarios obtenidos en los dinodos de forma consecutiva hasta llegar al anodo.

2. Detectores Cherenkov

El detector Cherenkov es un dispositivo que hace uso de la radiacion Cherenkov para detectar la traza de un tipo especial de particulas. El principio tecnico consiste en que un conjunto de particulas atraviesan un tanque con agua purificada en el cual hay dispuestos unos fotomultiplicadores que se encargan de amplificar la señal producida por la radiacion al mismo tiempo que adquiere y digitaliza esas señales.

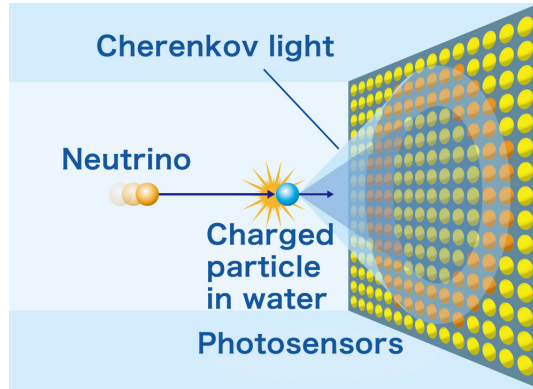


Figura 4: Detector Cherenkov [4]

Otra función que posee el detector es la capacidad de identificar y discriminar diferentes tipos de partículas. El agua utilizada requiere que tenga un alto índice de refracción con el fin de garantizar que la mayor cantidad de partículas que incidan emitan radiación y además de que no se pierdan antes de llegar a los tubos fotomultiplicadores.

Este tipo de detector necesita distinguir la radiación gamma de los rayos cósmicos que son los responsables del ruido de fondo. Para esto se debe realizar la discriminación de dos tipos de cascadas, por un lado esta la electromagnética y por otro lado esta la hadrónica, los muones presentes mas que todo en esta

ultima son el factor determinante para diferenciar ambos eventos.

La manera técnica en la cual los muones ayudan a diferenciar radica en la forma en la cual activan los fotomultiplicadores, esto debido a que un electrón solo tiene la capacidad para irradiar un solo fotomultiplicador y los muones al ser mucho mas energéticos tienen la capacidad de irradiar muchos mas fotomultiplicadores en un mismo instante.

Los componentes principales del detector Cherenkov se basan en un tanque y en electrónica compuesta de fotomultiplicadores.

2.1. El tanque

Es el recipiente encargado de contener el agua y a que a su vez esta constituido por otras partes. Una de ellas es el difusor interno que es un material sintético hecho e fibras de polietileno de alta densidad que ayuda y garantiza un alto porcentaje de difusión y reflectividad. EL aislamiento fotónico que esta constituido por un material hecho de polietileno de alta densidad que se ubica en la superficie tanto exterior como interior del tanque el cual tiene como tarea evitar el ingreso de radiación de baja energía principalmente de origen solar.



Figura 5: Interior del tanque[2]

2.2. Estación Local y Tubos Fotomultiplicadores

Los tubos fotomultiplicadores están ubicados en el fondo del tanque que a su vez es controlado por una estación alimentada por una fuente de voltaje externa de 12 voltios, esta estación adquiere, digitaliza y envía los datos obtenidos al interior del tanque.

La estación local de forma predeterminada y con el fin de realizar un control de lo que esta sucediendo al interior del tanque genera dos tipos de histogramas, uno es de carga y el otro de voltaje . El de carga muestra el numero de partículas que han depositado determinada cantidad de carga dentro del tanque y el otro indica el numero de partículas en función del pico máximo de la señal.

2.3. Radiación Cherenkov

La radiación Cherenkov se genera debido al paso de partículas cargadas eléctricamente a través de un medio dieléctrico, es decir ese medio debe estar formado por moléculas que sean reactivas a los campos eléctricos. Este tipo de radiación produce un color característico azul que es producto de frentes de onda esféricos que se superponen y forma un único cono, tal como se muestra en la Figura 6.

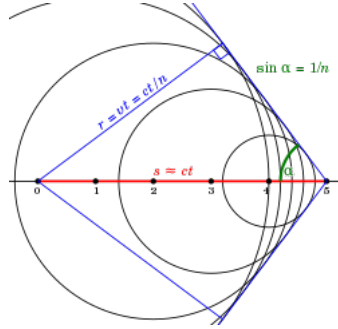


Figura 6: Frente de onda generado por la radiación Cherenkov

La condición para que este frente de fotones sea observable es que debe estar en fase con los fotones emitidos por el paso de la partícula. La condición se expresa en función del ángulo de emisión alfa, como se observa en la expresión (3).

$$\cos \alpha_c = \frac{1}{\beta \sqrt{\epsilon \omega}} \quad (3)$$

donde ϵ es la constante dieléctrica del medio, ω es la frecuencia de oscilación de las moléculas del medio y β la velocidad de la partícula.

3. Detector de Estado Solido

Son dispositivos que se encargan de la detección de radiación ionizante que utilizan algún tipo de material semiconductor, bien sea silicio o germanio para medir las propiedades de las partículas incidentes. Generalmente esta clase de instrumentos son usados en el campo de la física médica, la espectrometría de rayos gamma y x entre otros.

Cuando se habla de semiconductores es preciso indicar que la variable que se debe controlar se refiere al número de portadores de carga liberados en el material del detector es proporcional a la energía de la radiación. La forma en la cual se parte para el análisis de aquella energía es producto de la creación de huecos y electrones libres, que da como resultado la transferencia de electrones desde la banda de valencia a la banda de conducción creando un número equivalente de huecos en la banda de valencia, como se observa en la Figura 7. El pulso eléctrico

que se mide desde el sistema de adquisición de datos proviene precisamente de la diferencia de potencial en los electrodos entre los cuales se están desplazando los huecos y cargas.

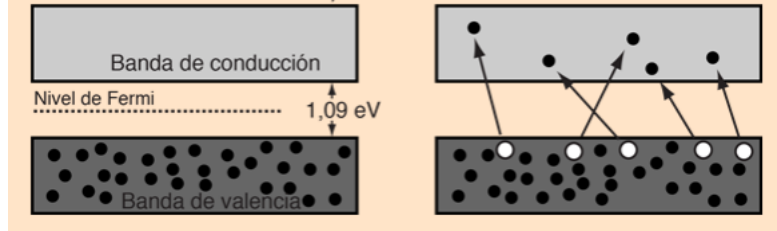


Figura 7: Creación de huecos en la banda de valencia debido a la transferencia de carga [5]

3.1. Teorema de Shockley-Ramo

es un método para calcular la corriente eléctrica inducida por una carga que se mueve cerca de un electrodo. Se basa en el concepto de que la corriente inducida en el electrodo se debe al cambio instantáneo de las líneas de flujo electrostático que terminan en el electrodo, no a la cantidad de carga recibida por el electrodo por segundo.

El teorema de Shockley-Ramo establece que la corriente instantánea i inducida en un electrodo dado debido al movimiento de una carga viene dada por:

$$i = E_v q v \quad (4)$$

donde E_v corresponde a la componente campo eléctrico en la dirección de la velocidad, q es la carga de la partícula y v la velocidad instantánea.

4. Metodología

4.1. Creación del Pulso

Para la creación de un pulso que simulara la interacción de un fotón con un fotomultiplicador (PMT) se generó una fuente de voltaje en la cual se almacenaron una serie de datos introducidos de manera manual entre los 30 mV y 200 mV mediante la configuración PWL de LTSpice de tal manera que tome un rango de tiempo que va entre los 0 mS y 16mS tiempo en el cual después continuara en -30mV. ver tabla de la Figura[8].

Obteniendo finalmente una representación gráfica de lo que podría llegar a ser la señal proveniente de una partícula cuando atravesase un fotomultiplicador. Figura[9]

Time[s]	Value[V]
0m	-30m
1m	-30m
2m	-30m
3m	-200m
4m	-190m
5m	-170m
6m	-160m
7m	-150m
8m	-125m
9m	-90m
10m	-48m
11m	-45m
12m	-40m
13m	-30m
14m	-30m
15m	-30m
16m	-30m

Figura 8: Tabla de tensiones y tiempos del pulso PMT

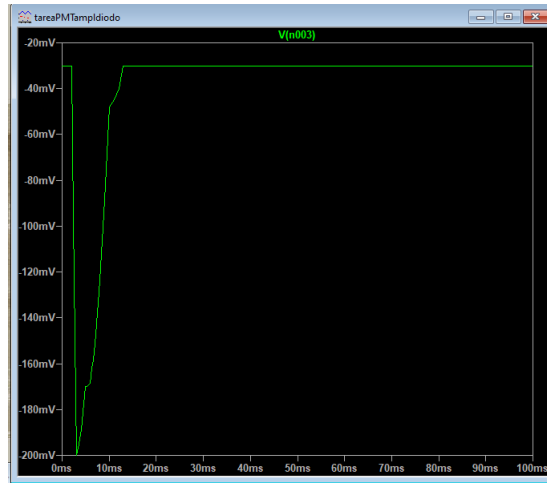


Figura 9: Pulso simulado en LTspice

4.2. Amplificador y detector de picos

El amplificador operacional que use es el OP37 debido a que ofrece una muy buena velocidad de procesamiento de voltaje y bajo ruido. Junto con cuatro resistencias de baja denominación con el fin de mantener una señal parecida a la original, de tal manera que al momento de amplificar, esta amplificación corresponda al aumento en unos cientos de milivoltios.

Los valores de la resistencia corresponden a: $R_1=100$ ohmios, $R_2=140$ ohmios, $R_3=100$ ohmios y $R_4=100$ ohmios. El diodo que use es un zener BZX84C6V2L que es muy usado y de mayor fiabilidad de rendimiento.

El circuito que implemente corresponde a un amplificador operacional invertiente que genera un voltaje de salida mediante la expresión [5]

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} V_{in} \quad (5)$$

Que para este caso corresponde a

$$V_{out} = 1,5V_{in} \quad (6)$$

Finalmente el diagrama del circuito queda como el observado en la Figura[10]

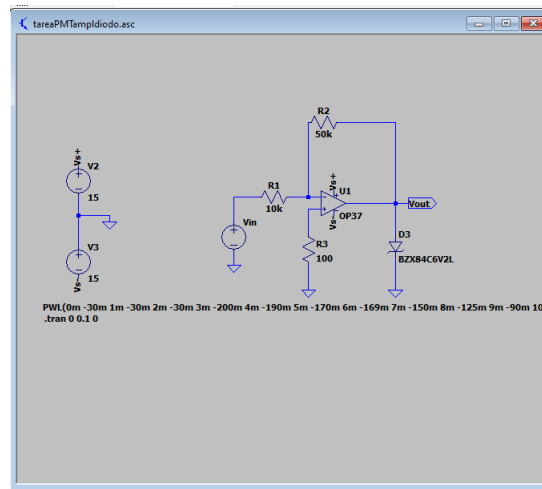


Figura 10: Circuito amplificador con diodos

Cuando el pulso pasa por el amplificador de la Figura[10] se obtiene una señal como la observada en la Figura [11]. Se puede observar que la señal pasa de tener 200 mV en el pico a 420 mV a 490 mV teniendo un aumento de 200 a 290 mV con respecto a la original. Figura[11]

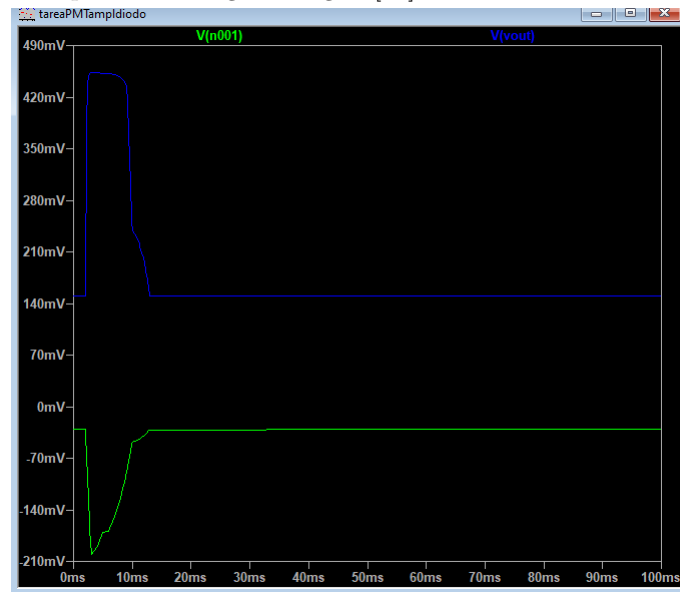


Figura 11: Pulso ampliado e invertido con el OP AM

5. Referencias

- 1 Bonilla. Mauro J.
Sistema de Adquisicion de Datos para la Caracterizacion de Fotomultiplica-

- dores para Experimentos de Altas Energias
13 de enero 2013
- 2 Suarez. Mauricio.
Instalacion de un Detector Cherenkov de Agua para la Deteccion de Trazas
de Rayos Cosmicos a 956 Metros Sobre el Nivel del Mar
16 de noviembre 2011
- 3 Radiation Dosimetry.
<https://www.radiation-dosimetry.org/es/que-es-el-tubo-fotomultiplicador-pmt-definicion/>
20 de noviembre
- 4 Physics Open Lab.
<http://physicsopenlab.org/2016/04/24/diy-cherenkov-detector/>
20 de noviembre
- 5 Teoria de Bandas en Solidos.
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Solids/band.html>.
20 de noviembre
- 6 Detector de Semiconductor.
[https://es.qaz.wiki/wiki/Semiconductor_{detector}](https://es.qaz.wiki/wiki/Semiconductor_detector)
20 de noviembre