

Láminas disponibles en ([GitHub](#))

Tubos fotomultiplicadores (FM) y fotodiodos

Favio Vázquez*

Instituto de Ciencias Nucleares - UNAM

06 de octubre de 2015



- 1 Introducción
- 2 Estructura simplificada de un Tubo FM
- 3 El fotocátodo
 - El proceso de fotoemisión
 - Emisión espontánea de electrones
 - Fabricación de fotocátodos
 - Eficiencia cuántica y respuesta espectral
- 4 Multiplicación de Electrones
 - Emisión secundaria de electrones
 - Materiales de afinidad electrónica negativa
 - Múltiples etapas de multiplicación
 - Estadística de la multiplicación de electrones
- 5 Características de los tubos FM
 - Diferencias estructurales
 - Propiedades de temporización de pulsos
 - Índices máximos
 - Especificaciones para tubos FM
 - Linealidad
 - Ruido y pulsos falsos



- Faltas de uniformidad el fotocátodo
- Variaciones de la ganancia con la tasa de conteo

6 Equipo auxiliar requerido para los tubos FM

- Alimentación de alto voltaje y divisor de voltaje
- Recubrimiento magnético

7 Fotodiodos como sustitutos a los tubos FM

- Potenciales ventajas
- Fotodiodos convencionales
- Fotodiodos de avalancha
- Fotomultiplicadores de silicio

8 Análisis de la forma de los pulsos de centelladores

- Caso 1. Constante de tiempo grande
- Caso 2. Constante de tiempo pequeña

9 Algunas cosas de las que no hablaré pero que valen la pena leer



Introducción I

Las láminas de la presentación están disponibles en GitHub junto con el código en \LaTeX en el siguiente [link](#). También están todas las imágenes y contenido de la misma.

En la presentación, las notas relevantes se encontrarán adentro de cajas azules como esta:

Nota relevante

Nota súper importante que te cambiará la vida de aspecto teórico o sólo un punto a resaltar.

Y las notas experimentales, se encontrarán adentro de cajas verdes como esta:

Nota experimental

Nota súper interesante e importante de corte experimental que te hará el mejor físico experimental de la vida. Acá también se encontrarán cosas relacionadas a seguridad y buen manejo de equipos así que presta atención.



Introducción II

El uso masivo de la cuenta de centelladores en la detección y espectroscopia sería imposible sin la disponibilidad de dispositivos que nos permitiera convertir la salida de luz débil de un pulso de centellador, en una señal eléctrica medible.

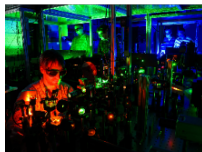
Los tubos fotomultiplicadores (FM) cumplen con esta tarea muy bien, convirtiendo señales de luz que constan típicamente de no más que unos cientos de fotones, en un pulso de corriente utilizable sin añadir una gran cantidad de ruido aleatorio a la señal.



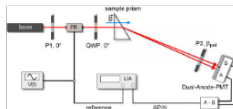
Introducción III

Existe una gran variedad comercial de estos tubos sensibles a diversas longitudes de onda, ultravioleta, luz visible, cercana a la infrarroja y otras del espectro electromagnético.

Usos:



Espectroscopia
Óptica



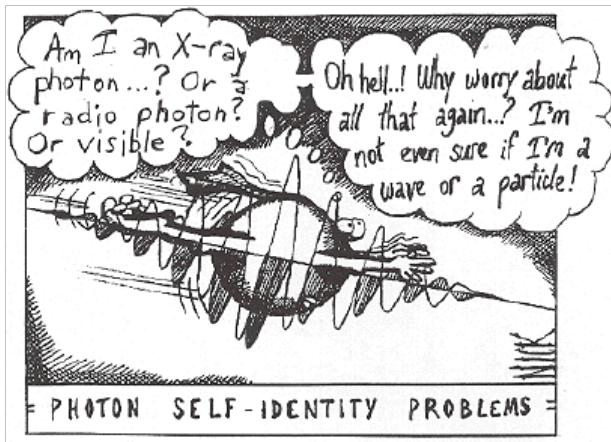
Mediciones con
láser



Astronomía



El fotocátodo



El proceso de fotoemisión

El primer paso realizado por el tubo FM es la conversión de fotones de luz incidente en electrones. Este proceso de fotoemisión puede pensarse que ocurre en tres etapas secuenciales:

- 1 La absorción de un fotón incidente y transferencia de energía a un electrón dentro del material fotoemisor,



El proceso de fotoemisión

El primer paso realizado por el tubo FM es la conversión de fotones de luz incidente en electrones. Este proceso de fotoemisión puede pensarse que ocurre en tres etapas secuenciales:

- 1 La absorción de un fotón incidente y transferencia de energía a un electrón dentro del material fotoemisor,
- 2 la migración de ese electrón a la superficie y,



El proceso de fotoemisión

El primer paso realizado por el tubo FM es la conversión de fotones de luz incidente en electrones. Este proceso de fotoemisión puede pensarse que ocurre en tres etapas secuenciales:

- 1 La absorción de un fotón incidente y transferencia de energía a un electrón dentro del material fotoemisor,
- 2 la migración de ese electrón a la superficie y,
- 3 el escape del electrón de la superficie del fotocátodo.



El proceso de fotoemisión

El primer paso realizado por el tubo FM es la conversión de fotones de luz incidente en electrones. Este proceso de fotoemisión puede pensarse que ocurre en tres etapas secuenciales:

- 1 La absorción de un fotón incidente y transferencia de energía a un electrón dentro del material fotoemisor,
- 2 la migración de ese electrón a la superficie y,
- 3 el escape del electrón de la superficie del fotocátodo.

Nota relevante

La energía que puede transferirse del fotón al electrón en el primer paso está dada por la energía cuántica del fotón $h\nu$ (típicamente ~ 3 eV). En el paso 2, alguna de esa energía se perderá por las colisiones de electrón-electrón. En el paso 3, debe haber la suficiente energía restante para que el electrón pase el potencial barrera inherente (*función de trabajo*). (comúnmente > 3 o 4 eV, pero para metales $\sim 1.5 - 2$ eV)



Emisión espontánea de electrones

La barrera de potencial superficial influencia una propiedad importante de los fotocátodos: *el ruido termiónico*. La conducción normal de electrones adentro del material del fotocátodo siempre tendrá algo de energía cinética térmica que, a temperatura ambiente, se aproximará a los 0.025 eV.

Si ese electrón está cerca de la superficie, puede escapar y dar lugar a una señal inducida térmica espontánea.

Nota relevante

En los metales, la tasa de emisión térmica es baja ($\sim 100\text{m}^2 \cdot \text{s}$) debido a su potencial de barrera relativamente alto. En los semiconductores, el bajo potencial de barrera lleva a tasas de emisión térmicas tan altas como $10^6 - 10^8\text{m}^2 \cdot \text{s}$



Fabricación de fotocátodos

Los fotocátodos pueden ser contruidos tanto por capas opacas o semitransparentes. Un fotocátodo opaco es fabricado normalmente con un grosor un poco más grande que la profundidad de escape máxima[†] y es soportado por un material de respaldo grueso. Los fotocátodos semitransparentes generalmente no son más gruesos que la profundidad de escape, son depositados en un respaldo transparente (usualmente el final del vidrio del tubo FM).

Nota relevante

Debido a que son más fácilmente adaptables a diseños de tubo que usan una ventana final plana, los fotocátodos semitransparentes son más comunes en los tubos FM diseñados para conteo de centelladores.

Nota experimental

Las variaciones en el espesor darán lugar a cambios correspondientes en la sensibilidad del fotocátodo y pueden ser una fuente de pérdida de resolución en los conteos de centelladores (el problema es \propto al diámetro del tubo).

[†]Profundidad máxima del material, en la que los electrones puedan alcanzar la superficie y superar el potencial de barrera.



Eficiencia cuántica y respuesta espectral I

La sensibilidad de los fotocatodos se mide comúnmente en el ámbito de la física, y con gran significación para el conteo de centelladores en términos de la *eficiencia cuántica (EC)* del fotocatodo. La eficiencia cuántica se define simplemente como

$$EQ = \frac{\text{número de fotoelectrones emitidos}}{\text{número de fotones incidentes}} \quad (1)$$

La eficiencia cuántica sería de 100% para un fotocatodo ideal. Pero debido a las limitaciones que les he mencionado, los fotocatodos comunes tienen una eficiencia cuántica máxima de 20 – 30%.

Nota relevante

La eficiencia cuántica de cualquier fotocatodo será fuertemente una función de la longitud de onda o la energía cuántica de la luz incidente.

Nota experimental

Una consideración para seleccionar un fotocatodo es buscar una alta eficiencia cuántica sobre el rango de longitudes de onda en el cual el espectro de emisión del centellador es concentrado.



Eficiencia cuántica y respuesta espectral II

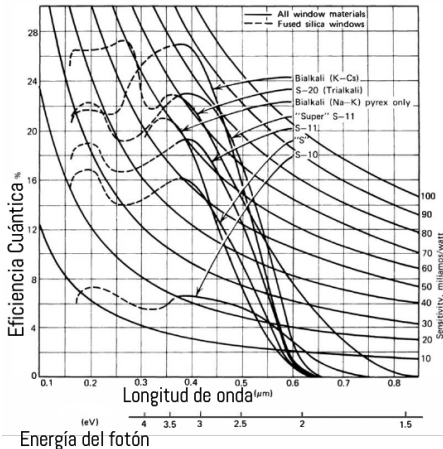


Figura 3 : La eficiencia cuántica es función de la longitud de onda o de la energía cuántica de la luz incidente

A una λ lo suficientemente alta el electrón no tiene la suficiente energía para escapar la superficie del fotocátodo y la respuesta se hace cero. Para vidrio normal, el límite será a $\lambda \sim 350$ nm, que es usualmente adecuado para la mayoría de los materiales de centelladores.

Nota experimental

Una medida alternativa para la EQ es usada en el conteo de centelladores. Debido al uso extendido de yoduro de sodio activado con talio como cristal de centelleo, se habla de EQ en términos de el número de fotoelectrones producidos por un fotocátodo dado por keV de pérdida de energía en un cristal de NaI(Tl) para el cual casi toda la luz es colectada.

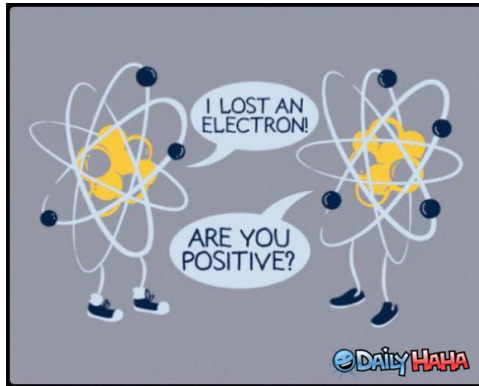


Materiales actuales para la construcción de fotocátodos:

- Materiales multialcalinos basados en el compuesto Na_2KSb , preparados por activación con una pequeña cantidad de cesio $\Rightarrow \text{EQ} \sim 30\%$.
- Materiales bialcalinos basados en K_2CsSb activados con oxígeno y cesio $\Rightarrow 45\%$ a los 350 nm de máxima respuesta.
- Materiales ultrapuros que reducen las trampas de electrones, reduciendo reflexiones desde el fotocátodo mediante una introducción de una capa anti-reflejante entre él y la envoltura de vidrio.
- Estructuras prismáticas con un alto ratio de superficie a volumen para aumentar la probabilidad de escape de fotoelectrones.



Multiplicación de Electrones



Emisión secundaria de electrones-I



Figura 4 : Dos filas de dínodos dentro de un tubo FM.

Los electrones desde el fotocátodo son acelerados y llevados a chocar la superficie de un electrodo, llamado el *dínodo*. Si el material del dínodo se escoge bien, la energía depositada por el electrón incidente puede resultar en la re-emisión de más de un electrón desde la superficie.



Emisión secundaria de electrones-I



Figura 4 : Dos filas de dínodos dentro de un tubo FM.

Los electrones desde el fotocátodo son acelerados y llevados a chocar la superficie de un electrodo, llamado el *dínodo*. Si el material del dínodo se escoge bien, la energía depositada por el electrón incidente puede resultar en la re-emisión de más de un electrón desde la superficie.

Nota relevante

El proceso de emisión secundaria de electrones es similar al proceso que acabamos de ver, pero en este caso los electrones dentro del material del dínodo son exitados por el paso de un electrón energético en vez de un fotón óptico.



Emisión secundaria de electrones-II

Los electrones que dejan el fotocátodo tienen una energía ~ 1 eV, o menos. Por lo tanto, si el primer dínodo tiene unos cuantos cientos de voltios positivos, la energía cinética de los electrones al llegar al dínodo está determinada por el voltaje de aceleración.

Nota experimental

- La creación de un electrón excitado en el material del dínodo requiere una energía al menos igual a la del bandgap $\sim 2 - 3$ eV.



Emisión secundaria de electrones-II

Los electrones que dejan el fotocátodo tienen una energía ~ 1 eV, o menos. Por lo tanto, si el primer dínodo tiene unos cuantos cientos de voltios positivos, la energía cinética de los electrones al llegar al dínodo está determinada por el voltaje de aceleración.

Nota experimental

- La creación de un electrón excitado en el material del dínodo requiere una energía al menos igual a la del bandgap $\sim 2 - 3$ eV.
- Es teóricamente posible que para un electrón incidente, se creen un aproximado de 30 electrones excitados por cada 100 V de voltaje acelerador.



Emisión secundaria de electrones-II

Los electrones que dejan el fotocátodo tienen una energía ~ 1 eV, o menos. Por lo tanto, si el primer dínodo tiene unos cuantos cientos de voltios positivos, la energía cinética de los electrones al llegar al dínodo está determinada por el voltaje de aceleración.

Nota experimental

- La creación de un electrón excitado en el material del dínodo requiere una energía al menos igual a la del bandgap $\sim 2 - 3$ eV.
- Es teóricamente posible que para un electrón incidente, se creen un aproximado de 30 electrones excitados por cada 100 V de voltaje acelerador.
- Debido a que la dirección de estos electrones es aleatoria, (1) algunos no llegarán a la superficie antes de des-excitarse, (2) otros llegan pero han perdido tanta energía que no pueden superar el potencial de barrera y no pueden escapar. Por lo que solo una pequeña fracción de electrones excitados contribuirá últimamente a la emisión secundaria dada en la superficie del dínodo.



Emisión secundaria de electrones-II

Los electrones que dejan el fotocátodo tienen una energía ~ 1 eV, o menos. Por lo tanto, si el primer dínodo tiene unos cuantos cientos de voltios positivos, la energía cinética de los electrones al llegar al dínodo está determinada por el voltaje de aceleración.

Nota experimental

- La creación de un electrón excitado en el material del dínodo requiere una energía al menos igual a la del bandgap $\sim 2 - 3$ eV.
- Es teóricamente posible que para un electrón incidente, se creen un aproximado de 30 electrones excitados por cada 100 V de voltaje acelerador.
- Debido a que la dirección de estos electrones es aleatoria, (1) algunos no llegarán a la superficie antes de des-excitarse, (2) otros llegan pero han perdido tanta energía que no pueden superar el potencial de barrera y no pueden escapar. Por lo que solo una pequeña fracción de electrones excitados contribuirá últimamente a la emisión secundaria dada en la superficie del dínodo.
- La producción de electrones secundarios es una función sensible a la energía de los electrones incidentes.



Emisión secundaria de electrones-III

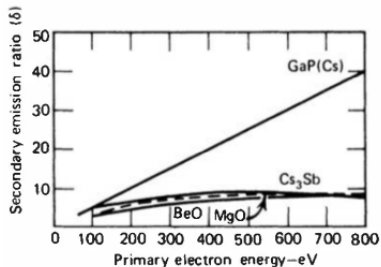


Figura 5 : Variación de la producción en la emisión secundaria con energía de electrón primaria para algunos materiales estándares de díodos (los tres de abajo) y un material NEA (negative-electron affinity) [GaP(CS)]

Factor de multiplicación

El factor de multiplicación para un dínodo está dado por:

$$\delta = \frac{\text{número de electrones secundarios emitidos}}{\text{electrones primarios incidentes}}$$

Este debe ser lo más grande posible para una máxima amplificación por etapa en el tubo FM.



Materiales de afinidad electrónica negativa - I

La producción de emisión secundaria de los díodos puede ser aumentada significativamente a través del uso de materiales de **afinidad electrónica negativa** (La afinidad electrónica es la variación de energía que se produce en la adición de un electrón al átomo en estado fundamental y en fase gaseosa para formar el anión correspondiente. La afinidad electrónica puede ser energía desprendida, en cuyo caso tiene valor negativo y se trata de átomos con tendencia a captar electrones - no metales.)



Nota relevante

El más exitoso de estos materiales ha sido el fosfuro de galio (GaP), altamente dopados, a una concentración de casi 10^{19} átomos/cm³ con zinc. Y una capa delgada de cesio.



Materiales de afinidad electrónica negativa - II

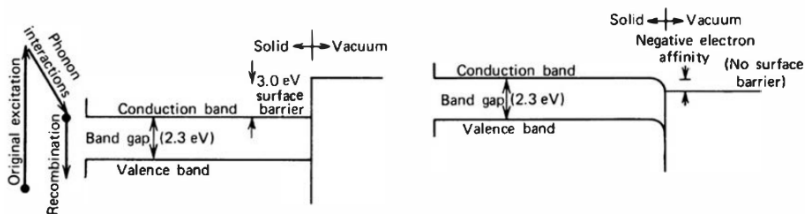


Figura 6 : Estructura de banda cerca de la superficie para semiconductores convencionales (izquierda) y materiales NEA (derecha).

Nota relevante

A la derecha se muestra la flexión de banda creada por el llenado de lugares aceptadores en la superficie por la capa delgada de Cs. El efecto de esto, es llevar el potencial de vacío más abajo que el del fondo de la banda de conducción en el interior del material.



Nota experimental

- El efecto neto es que los electrones que han llegado al fondo de la banda de conducción, aún son candidatos a escapar, y se quedan así por un tiempo 100 veces mayor que antes.
- Este aumento de tiempo en que los electrones pueden escapar, aumenta las probabilidades de escape para un electrón típico*.

*Ver figura 5. [◀ Ir](#)

Nota relevante

Otra ventaja de utilizar materiales NEA es en tubos FM usados para aplicaciones de medición temporal ultrarápida.



Múltiples etapas de multiplicación - I

Los electrones son guiados por otro campo eléctrico de dínodo en dínodo, en la cual se repite la etapa de multiplicación varias veces. Si se requieren N etapas en la sección multiplicadora, la ganancia total para el tubo FM está dada simplemente por

$$\text{Ganancia total} = \alpha \delta^N \quad (2)$$

donde α es la fracción de todos los fotoelectrones colectados por la estructura multiplicadora.

Nota experimental

- Los materiales de dínodo convencionales están caracterizados por valores típicos de $\delta = 5$ y $\alpha \sim 1$ para tubos bien diseñados. Entonces diez etapas resultarán en una ganancia total de 5^{10} o 10^7 . Si se utilizan materiales NEA entonces $\delta \sim 55$, y la misma ganancia se puede conseguir en 4 etapas.
- La ganancia total de un tubo FM es una función sensible del voltaje aplicado V .



Estadística de la multiplicación de electrones - I

La emisión de electrones secundarios es un proceso estadístico, y por lo tanto el valor específico de δ en un dínodo dado, fluctuará de evento en evento sobre su valor medio. En el modelo más simple, la producción de electrones secundarios en un dínodo, puede asumirse que sigue una distribución de Poisson sobre la producción media. Por lo tanto para un fotoelectrón incidente en el primer dínodo, el número de secundarios producidos tiene un valor medio de δ y una desviación estándar σ de $\sqrt{\delta}$.

Nota relevante

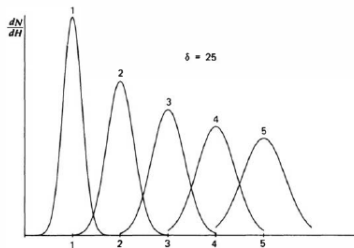
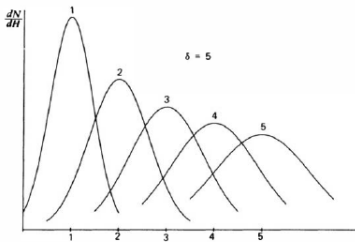
La varianza relativa definida por $(\sigma/\delta)^2$, es igual a $1/\delta$. Recordando la distribución de Poisson, entonces es fácil ver que cuando este proceso se repite sobre N etapas idénticas en el tubo FM, el número medio de electrones colectados en el ánodo será igual a δ^N .

Nota relevante

Si $\delta \gg 1$, entonces la varianza relativa o la expansión en la amplitud del pulso de salida es dominada por fluctuaciones en la producción desde el primer dínodo, donde el número absoluto de electrones es el más pequeño.



Estadística de la multiplicación de electrones - II

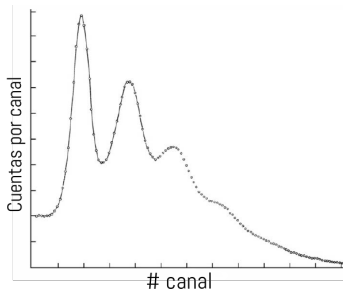


Nota experimental

Las figuras de arriba muestran la distribución esperada en el número de electrones secundarios producidos por el primer dínodo, cuando es golpeado por diferentes números de fotoelectrones. Si el valor de δ es pequeño es imposible separar limpiamente los eventos causados por un fotoelectrón de aquellos en los que más fotoelectrones están presentes.



Estadística de la multiplicación de electrones - III



Nota experimental

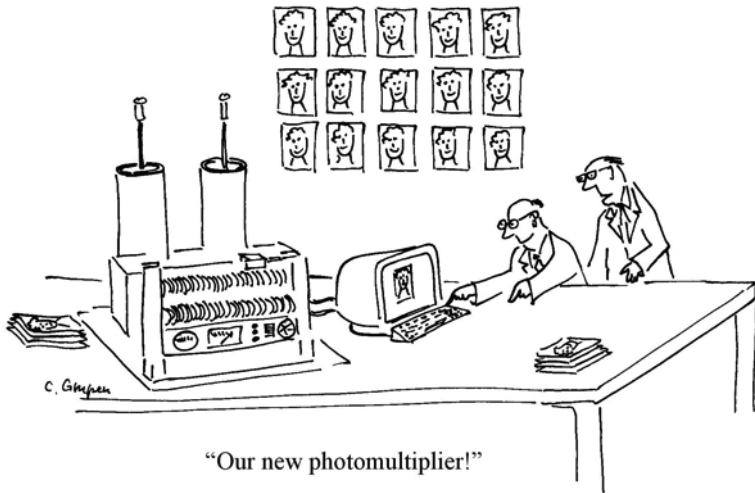
Si los díodos están caracterizados por valores grandes de δ , la separación es mucho más discernible y es posible distinguir picos en la distribución correspondiente a números discretos de fotoelectrones hasta 4 o 5.

Nota experimental

Algunas mediciones experimentales muestran una varianza relativa mayor que la predicha por el modelo de Poisson. De hecho, algunas observaciones no muestran picos, sino una distribución tipo exponencial. Esto ha llevado a utilizar modelos de distribución Polya, Poisson compuestos y algunos otros. **No existe aún una descripción universal que acomode todas las mediciones experimentales en este caso.**



Características de los tubos FM



Diferencias estructurales - I

Todos consisten de un fotocátodo semitransparente, una región de colección de fotoelectrones entre el fotocátodo y el primer dínodo, una sección de multiplicación de electrones multietapa, y un ánodo para la colección de la carga amplificada. Estas estructuras están encerradas en una envoltura de vidrio al vacío, por la cual cables eléctricos son conducidos en la base. (Les leeré un poquito sobre algunos tipos).

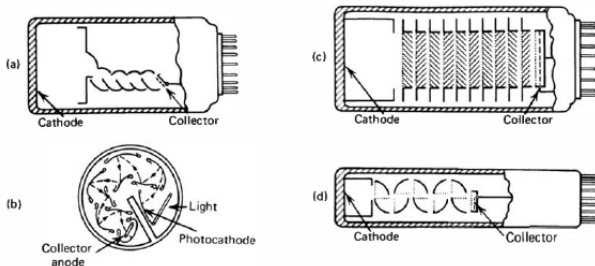


Figura 7 : Configuraciones para algunos tipos comunes de tubos FM. (a) Estructura lineal enfocada. (b) Red circular. (c) Persiana veneciana. (d) Caja y red.



Nota experimental

- Los tubos con un plato plano de vidrio al final son los únicos tipos usados para conteo de centelladores.



Nota experimental

- Los tubos con un plato plano de vidrio al final son los únicos tipos usados para conteo de centelladores.
- Un diámetro de 5 cm es una de las elecciones más comunes para aplicaciones de centelleo.



Nota experimental

- Los tubos con un plato plano de vidrio al final son los únicos tipos usados para conteo de centelladores.
- Un diámetro de 5 cm es una de las elecciones más comunes para aplicaciones de centelleo.
- Los tubos FM deben protegerse de vibraciones o choque mecánicos excesivos para evitar un daño físico a los componentes internos.



Algunos tubos FM reales



Persiana Veneciana



Caja y Red



Red circular

HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS



Estructura lineal enfocada



Propiedades de temporización de pulsos - I

Los tiempos característicos de un tubo FM están determinados exclusivamente por las trayectorias de electrones. El tiempo de tránsito de electrón de un tubo FM está definido por la diferencia de tiempo promedio entre la llegada de un fotón al fotocátodo y la colección de la subsecuente ráfaga de electrones en el ánodo.

Nota experimental

- Los rangos de tiempo para el transito de electrón está entre los 20 – 80 ns.



Propiedades de temporización de pulsos - I

Los tiempos característicos de un tubo FM están determinados exclusivamente por las trayectorias de electrones. El tiempo de tránsito de electrón de un tubo FM está definido por la diferencia de tiempo promedio entre la llegada de un fotón al fotocátodo y la colección de la subsecuente ráfaga de electrones en el ánodo.

Nota experimental

- Los rangos de tiempo para el tránsito de electrón está entre los 20 – 80 ns.
- Sin embargo el tránsito solo no es de primaria importancia. El esparcimiento del tiempo de tránsito es una cantidad más importante porque determina la anchura de tiempo del pulso de electrones que están llegando en el ánodo del tubo.



Propiedades de temporización de pulsos - II

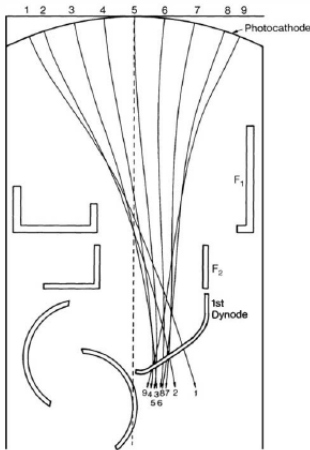


Figura 8 : Trayectorias generadas por computadora de los electrones acelerados desde el fotocátodo al primer dínodo en un tubo FM.

Nota experimental

- La región entre el fotocátodo y el primer dínodo es crítica en la determinación de las propiedades temporales. Para permitir una colección uniforme sobre fotocátodos grandes, la distancia entre ellos es considerablemente grande comparado con las distancias entre dínodos.



Propiedades de temporización de pulsos - II

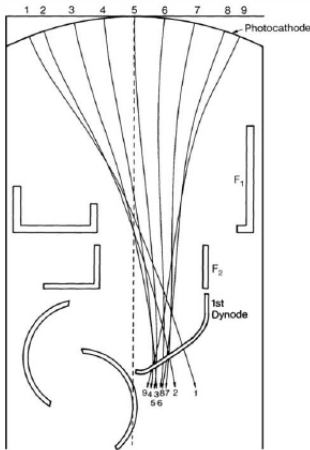


Figura 8 : Trayectorias generadas por computadora de los electrones acelerados desde el fotocátodo al primer dínodo en un tubo FM.

Nota experimental

- La región entre el fotocátodo y el primer dínodo es crítica en la determinación de las propiedades temporales. Para permitir una colección uniforme sobre fotocátodos grandes, la distancia entre ellos es considerablemente grande comparado con las distancias entre dínodos.
- La diferencia en los caminos entre un fotoelectrón que deja el fotocátodo en el centro, y uno que lo deja en un borde es un factor dominante en el esparsamiento observado en el tiempo de tránsito.



Propiedades de temporización de pulsos - III

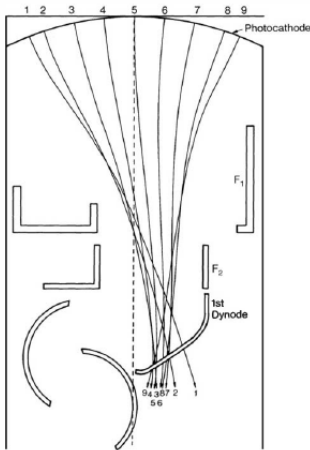


Figura 9 : Trayectorias generadas por computadora de los electrones acelerados desde el fotocátodo al primer dínodo en un tubo FM.

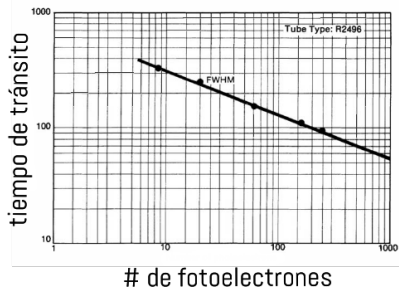
Nota experimental

- El fotocátodo usualmente es curvado para minimizar el esparcimiento del tiempo de tránsito a lo largo de su diámetro.
- Una segunda fuente de esparcimiento de tiempo de tránsito surge de la distribución inicial de velocidades de los fotoelectrones que dejan el fotocátodo. Este efecto se puede minimizar usando una diferencia de voltaje más grande entre el fotocátodo y el primer dínodo.



Propiedades de temporización de pulsos - IV

Para simplificar el análisis y comparación entre diferentes fotomultiplicadores, muchas de las mediciones reportadas en la literatura se concentran en el espaciamiento de tiempo de tránsito debido a un sólo fotoelectrón. Por otra parte, si la distribución en los varios posibles espaciamientos en el tiempo de tránsito se asumen gaussianos, la teoría estadística predice que el espaciamiento relativo en el tiempo de tránsito variará inversamente con la raíz cuadrada del número de fotoelectrones.



Nota relevante

En la figura de la izquierda se verifica este comportamiento. Una alta producción de luz de un centellador es importante en las aplicaciones de temporización, así como en las mediciones de amplitud de pulso.



Nota experimental

El esparcimiento temporal atribuible a la sección multiplicadora decrece con un mayor voltaje entre dínodos, y el mejor desempeño en temporización normalmente es obtenido operando el tubo al máximo voltaje permitido por los índices.

Cuando se usan con centelladores inorgánicos lentos, los tubos FM son lo suficientemente rápidos para que su contribución al tiempo total de respuesta usualmente no sea un factor importante. Sólo cuando se emplean centelladores con un tiempo de decaimiento más bajo para derivar en una señal temporizadora rápida, que los tubos FM se pueden convertir en un elemento significativo en la determinación de las propiedades de temporización resultantes.

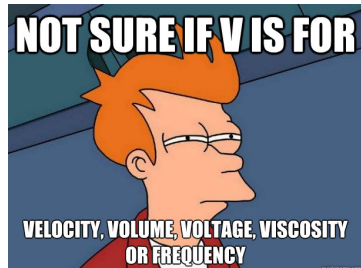
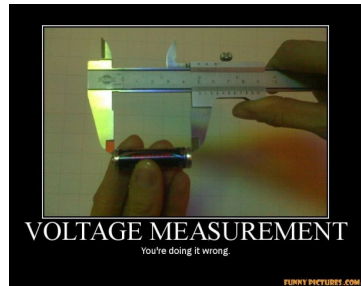


Índices máximos

Todos los tubos FM comerciales vienen con un conjunto de índices de voltajes máximos y corrientes máximas que no deben excederse durante el uso rutinario. Las especificaciones detalladas también darán valores individuales para los voltajes máximos entre el fotocátodo y el primer dínodo, dínodo a dínodo, del último dínodo al ánodo y del cátodo al ánodo.

Nota experimental

Debido a que virtualmente todos los tubos FM mostrarán un incremento en la ganancia cuando el voltaje se aumenta, el valor máximo de voltaje aplicado prácticamente determina la ganancia máxima que se puede obtener del tubo.



Especificaciones para tubos FM

- **Sensitividad luminosa total (A/lm):** Razón entre la corriente medida en el ánodo a un voltaje de operación y el flujo luminoso de una fuente de luz de tungsteno de temperatura especificada incidente en el fotocátodo.



Especificaciones para tubos FM

- **Sensitividad luminosa total (A/lm):** Razón entre la corriente medida en el ánodo a un voltaje de operación y el flujo luminoso de una fuente de luz de tungsteno de temperatura especificada incidente en el fotocátodo.
- **Sensitividad luminosa del cátodo (A/lm):** Definida como arriba, excepto que la corriente de fotoelectrones que dejan el fotocátodo es sustituida en el numerador por la corriente del ánodo.



Especificaciones para tubos FM

- **Sensitividad luminosa total (A/lm):** Razón entre la corriente medida en el ánodo a un voltaje de operación y el flujo luminoso de una fuente de luz de tungsteno de temperatura especificada incidente en el fotocátodo.
- **Sensitividad luminosa del cátodo (A/lm):** Definida como arriba, excepto que la corriente de fotoelectrones que dejan el fotocátodo es sustituida en el numerador por la corriente del ánodo.
- **Sensitividad radiante total (A/W):** Razón entre la corriente del ánodo y la potencia radiante a una longitud de onda incidente dada en el fotocátodo.



Especificaciones para tubos FM

- **Sensitividad luminosa total (A/lm):** Razón entre la corriente medida en el ánodo a un voltaje de operación y el flujo luminoso de una fuente de luz de tungsteno de temperatura especificada incidente en el fotocátodo.
- **Sensitividad luminosa del cátodo (A/lm):** Definida como arriba, excepto que la corriente de fotoelectrones que dejan el fotocátodo es sustituida en el numerador por la corriente del ánodo.
- **Sensitividad radiante total (A/W):** Razón entre la corriente del ánodo y la potencia radiante a una longitud de onda incidente dada en el fotocátodo.
- **Sensitividad radiante del cátodo (A/W):** Definida como arriba, excepto que la corriente del fotocátodo es sustituida por la corriente del ánodo.



Especificaciones para tubos FM

- **Sensitividad luminosa total (A/lm):** Razón entre la corriente medida en el ánodo a un voltaje de operación y el flujo luminoso de una fuente de luz de tungsteno de temperatura especificada incidente en el fotocátodo.
- **Sensitividad luminosa del cátodo (A/lm):** Definida como arriba, excepto que la corriente de fotoelectrones que dejan el fotocátodo es sustituida en el numerador por la corriente del ánodo.
- **Sensitividad radiante total (A/W):** Razón entre la corriente del ánodo y la potencia radiante a una longitud de onda incidente dada en el fotocátodo.
- **Sensitividad radiante del cátodo (A/W):** Definida como arriba, excepto que la corriente del fotocátodo es sustituida por la corriente del ánodo.
- **Corriente oscura:** Corriente en el ánodo medida sin la iluminación del fotocátodo.



Especificaciones para tubos FM

- **Sensitividad luminosa total (A/lm):** Razón entre la corriente medida en el ánodo a un voltaje de operación y el flujo luminoso de una fuente de luz de tungsteno de temperatura especificada incidente en el fotocátodo.
- **Sensitividad luminosa del cátodo (A/lm):** Definida como arriba, excepto que la corriente de fotoelectrones que dejan el fotocátodo es sustituida en el numerador por la corriente del ánodo.
- **Sensitividad radiante total (A/W):** Razón entre la corriente del ánodo y la potencia radiante a una longitud de onda incidente dada en el fotocátodo.
- **Sensitividad radiante del cátodo (A/W):** Definida como arriba, excepto que la corriente del fotocátodo es sustituida por la corriente del ánodo.
- **Corriente oscura:** Corriente en el ánodo medida sin la iluminación del fotocátodo.
- **Tiempo de subida del pulso del ánodo:** Tiempo que toma para que el pulso de salida suba de 10 a 90% para el pico cuando el fotocátodo es iluminado por un flash de luz de una muy poca duración.



Especificaciones para tubos FM

- **Sensitividad luminosa total (A/lm):** Razón entre la corriente medida en el ánodo a un voltaje de operación y el flujo luminoso de una fuente de luz de tungsteno de temperatura especificada incidente en el fotocátodo.
- **Sensitividad luminosa del cátodo (A/lm):** Definida como arriba, excepto que la corriente de fotoelectrones que dejan el fotocátodo es sustituida en el numerador por la corriente del ánodo.
- **Sensitividad radiante total (A/W):** Razón entre la corriente del ánodo y la potencia radiante a una longitud de onda incidente dada en el fotocátodo.
- **Sensitividad radiante del cátodo (A/W):** Definida como arriba, excepto que la corriente del fotocátodo es sustituida por la corriente del ánodo.
- **Corriente oscura:** Corriente en el ánodo medida sin la iluminación del fotocátodo.
- **Tiempo de subida del pulso del ánodo:** Tiempo que toma para que el pulso de salida suba de 10 a 90% para el pico cuando el fotocátodo es iluminado por un flash de luz de una muy poca duración.
- **Ancho del pulso del ánodo:** Ancho de tiempo del pulso de salida medido a la mitad de la amplitud máxima.



El factor de multiplicación de electrones en la mayoría de los tubos FM se mantiene constante para pulsos en el rango de un solo fotoelectrón a varios miles. Bajo estas condiciones la amplitud del pulso colectado en el ánodo está relacionado linealmente con el número de fotoelectrones, y por lo tanto con la intensidad de el haz de luz del centellador.

Nota relevante

Las no-linealidades pueden surgir para pulsos muy grandes, causadas por efectos de carga espacial entre el último dínodo y el ánodo, cuando el número de electrones es el mayor.

Nota experimental

El voltaje de operación tal vez deba reducirse para disminuir la ganancia y prevenir la distorsión de la linealidad del tubo FM, aún así la amplitud de pulso integrado haya incrementado solo por un factor de dos (2).



IMPORTANTE

Nota experimental

- Para algunos fotocátodos la tasa en la cual se emiten los electrones termiónicos puede ser reducida *drásticamente* enfriando el tubo. Reducciones por un factor de 100 pueden ser observadas con una reducción adecuada de la temperatura. Para esto se puede usar hielo seco, nitrógeno líquido o refrigeradores comerciales para este propósito.



IMPORTANTE

Nota experimental

- Para algunos fotocátodos la tasa en la cual se emiten los electrones termiónicos puede ser reducida *drásticamente* enfriando el tubo. Reducciones por un factor de 100 pueden ser observadas con una reducción adecuada de la temperatura. Para esto se puede usar hielo seco, nitrógeno líquido o refrigeradores comerciales para este propósito.
- Los tubos fotomultiplicadores deben guardarse en la oscuridad cuando no se están utilizando. La exposición a la luz de habitación, o la solar, es desastrosa cuando se está supliendo de voltaje al tubo porque altos niveles de iluminación llevan a corrientes del ánodo que exceden mucho los índices máximos y pueden dañar muy rápido las estructuras multiplicadoras.



IMPORTANTE

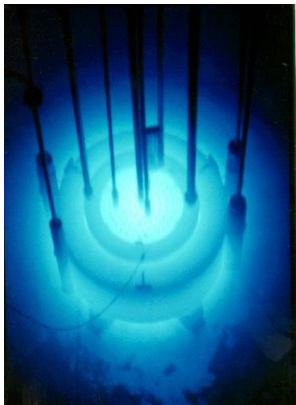
Nota experimental

- Para algunos fotocátodos la tasa en la cual se emiten los electrones termiónicos puede ser reducida *drásticamente* enfriando el tubo. Reducciones por un factor de 100 pueden ser observadas con una reducción adecuada de la temperatura. Para esto se puede usar hielo seco, nitrógeno líquido o refrigeradores comerciales para este propósito.
- Los tubos fotomultiplicadores deben guardarse en la oscuridad cuando no se están utilizando. La exposición a la luz de habitación, o la solar, es desastrosa cuando se está supliendo de voltaje al tubo porque altos niveles de iluminación llevan a corrientes del ánodo que exceden mucho los índices máximos y pueden dañar muy rápido las estructuras multiplicadoras.
- No es inusual observar un incremento de hasta 100 veces o más en la tasa de pulsos oscuros inmediatamente después de una exposición a luz ambiental intensa.



Ruido y pulsos falsos - III

Otra fuente de pulsos oscuros se origina de la radiactividad natural en la estructura del tubo. Los componentes más importantes son usualmente ^{40}K y torio contenidos en la envoltura de vidrio. Una partícula β producida en el decaimiento radiactivo dará lugar a un flash de radiación Cherenkov, que puede liberar fotoelectrones del fotocátodo de una manera muy parecida a los eventos de centelleo.



Nota relevante

La radiación de Cherenkov es una radiación de tipo electromagnético producida por el paso de partículas cargadas eléctricamente en un determinado medio a velocidades superiores a las de la luz en ese medio.

La radiación Cherenkov es un tipo de onda de choque que produce el brillo azulado característico de los reactores nucleares. Éste es un fenómeno similar al de la generación de una onda de choque cuando se supera la velocidad del sonido.

Radiación de Cherenkov y Rayos Cósmicos

El centelleo o luz de Cherenkov producida en el vidrio por radiación externa puede ser también una fuente significativa de pulsos oscuros. Una de esas fuentes es la **radiación cósmica**, que generalmente resulta en pulsos oscuros de pequeña amplitud de la luz de Cherenkov producida en la ventana fina del tubo.

Debido a la poca pérdida de energía específica de las radiaciones cósmicas secundarias y la poca producción de luz en el proceso de Cherenkov, los pulsos oscuros corresponden a unos pocos fotoelectrones y pueden ser descartados por discriminación de amplitud en aplicaciones de centelleo típicas. Sin embargo, si se deben registrar eventos de poco centelleo, estos pulsos pueden ser del mismo tamaño al de la señal.

Nota experimental

La tasa de radiación cósmica puede minimizarse operando el tubo con su eje mayor orientado horizontalmente, para que la ventana posterior presente la sección transversal mínima a los secundarios cósmicos que vienen dirigidos preferencialmente en una dirección vertical.



Faltas de uniformidad el fotocátodo

Mediciones directas han mostrado que la sensibilidad de los fotocátodos, especialmente los que tienen un diámetro grande, está lejos de ser uniforme a lo largo de toda el área del mismo. Este problema está compuesto también por las dificultades de conseguir una colección de fotoelectrones uniforme al primer dínodo desde el área del fotocátodo.

Nota experimental

- La combinación de estos dos efectos puede llevar a situaciones en que los pulsos del ánodo observados para un haz de luz dado, varíe tanto como un 30 – 40% mientras la posición de la iluminación se mueve a lo largo del área del fotocátodo.



Faltas de uniformidad el fotocátodo

Mediciones directas han mostrado que la sensibilidad de los fotocátodos, especialmente los que tienen un diámetro grande, está lejos de ser uniforme a lo largo de toda el área del mismo. Este problema está compuesto también por las dificultades de conseguir una colección de fotoelectrones uniforme al primer dínodo desde el área del fotocátodo.

Nota experimental

- La combinación de estos dos efectos puede llevar a situaciones en que los pulsos del ánodo observados para un haz de luz dado, varíe tanto como un 30 – 40% mientras la posición de la iluminación se mueve a lo largo del área del fotocátodo.
- Estas faltas de uniformidad son un serio problema en la cuenta de centelladores debido a que las variaciones en la respuesta tenderán a arruinar la resolución de energía del sistema.



Faltas de uniformidad el fotocátodo

Mediciones directas han mostrado que la sensibilidad de los fotocátodos, especialmente los que tienen un diámetro grande, está lejos de ser uniforme a lo largo de toda el área del mismo. Este problema está compuesto también por las dificultades de conseguir una colección de fotoelectrones uniforme al primer dínodo desde el área del fotocátodo.

Nota experimental

- La combinación de estos dos efectos puede llevar a situaciones en que los pulsos del ánodo observados para un haz de luz dado, varíe tanto como un 30 – 40% mientras la posición de la iluminación se mueve a lo largo del área del fotocátodo.
- Estas faltas de uniformidad son un serio problema en la cuenta de centelladores debido a que las variaciones en la respuesta tenderán a arruinar la resolución de energía del sistema.
- **Una manera de reducir este problema es colocar un tubo de luz entre el centellador y la ventana posterior del tubo FM**



Variaciones de la ganancia con la tasa de conteo

Otra no-idealidad de los tubos FM de la cual el usuario debe saber, es la posibilidad que la ganancia cambie durante el curso de una medición. La situación más común es aquella en la que la tasa de conteo cambia por un factor grande.

Nota experimental

- Las estructuras fotomultiplicadoras pueden diseñarse para minimizar estas variaciones, un buen tubo no cambiará su ganancia por más de 1% cuando la tasa de conteo cambia de 10^3 a 10^4 por segundo.



Variaciones de la ganancia con la tasa de conteo

Otra no-idealidad de los tubos FM de la cual el usuario debe saber, es la posibilidad que la ganancia cambie durante el curso de una medición. La situación más común es aquella en la que la tasa de conteo cambia por un factor grande.

Nota experimental

- Las estructuras fotomultiplicadoras pueden diseñarse para minimizar estas variaciones, un buen tubo no cambiará su ganancia por más de 1% cuando la tasa de conteo cambia de 10^3 a 10^4 por segundo.
- La variación gradual en la ganancia de un tubo que ocurre frecuentemente luego de un cambio grande en la corriente del tubo o la tasa de conteo se llama *fatiga*, y puede ser un problema serio si la corriente del tubo cambia por ordenes de magnitud durante una medición.



Equipo auxiliar requerido para los tubos FM



...Link de eBay...



Alimentación de alto voltaje y divisor de voltaje - I

Una fuente externa de voltaje debe estar conectada a los tubos FM de manera tal que el fotocátodo y cada etapa multiplicadora sucesiva esté correctamente parcializada con respecto a la otra.

Nota experimental

Debido a que los electrones deben ser atraídos, el primer dínodo debe estar a un voltaje positivo con respecto al fotocátodo, y cada dínodo siguiente debe estar a un voltaje positivo con respecto al anterior. Para una colección eficiente de fotoelectrones, el voltaje entre el fotocátodo y el primer dínodo usualmente es más grande que las diferencias de voltaje entre dínodos.

Nota experimental

Los requerimientos de voltaje entre etapas de un tubo FM pueden, en principio, ser suministrados por fuentes individuales de voltaje como baterías multi-celdas. Éstas son prácticas en algunas aplicaciones donde las tasas de cuentas son baja, pero no son muy atractivas debido a tasas de descarga muy rápidas por la demanda de corriente de etapas posteriores del tubo FM.



Alimentación de alto voltaje y divisor de voltaje - II

En la mayoría de los casos, las diferencias de voltaje son suministradas por divisores de voltaje y una simple fuente de alto voltaje.

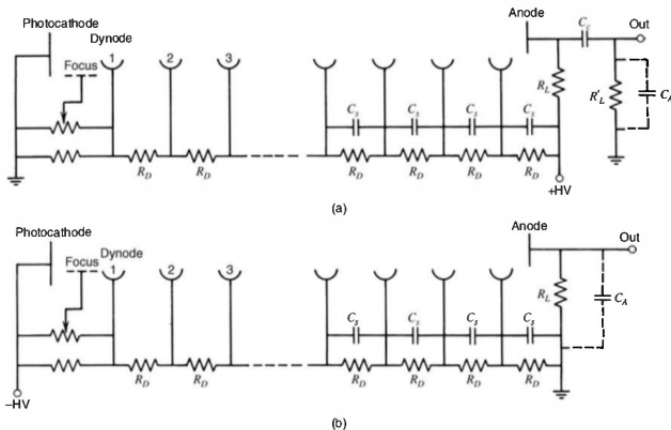


Figura 11 : Diagramas típicos de cableado para la base de un tubo FM. El esquema (a) utiliza alto voltaje positivo y un fotocátodo conectado a tierra. El esquema (b) utiliza alto voltaje negativo, y el fotocátodo debe estar aislado de la tierra. Capacitancia de ánodo C_A , Resistencia de carga R_L , Capacitores estabilizadores C_S



Alimentación de alto voltaje y divisor de voltaje - III

Nota relevante

Si la corriente interna en el pico de un pulso se hace comparable con la corriente de división, los voltajes de los dínodos normalmente comenzarán a desviarse de sus valores de equilibrio, llevando a variaciones en la ganancia del tubo FM.

Nota experimental

Para eliminar este efecto, es común utilizar capacitadores estabilizadores para las etapas de la cuerda divisora cerca del ánodo para ayudar a mantener estos voltajes posteriores del dínodo a un valor constante durante el pulso.

Nota experimental (IMPORTANTE)

- Para prevenir un cambio de voltaje entre dínodos mayor a 1%, la carga guardada en el capacitor estabilizador debe ser 100 veces más grande que la emitida por ese dínodo durante el pulso.



Alimentación de alto voltaje y divisor de voltaje - III

Nota relevante

Si la corriente interna en el pico de un pulso se hace comparable con la corriente de división, los voltajes de los dínodos normalmente comenzarán a desviarse de sus valores de equilibrio, llevando a variaciones en la ganancia del tubo FM.

Nota experimental

Para eliminar este efecto, es común utilizar capacitadores estabilizadores para las etapas de la cuerda divisora cerca del ánodo para ayudar a mantener estos voltajes posteriores del dínodo a un valor constante durante el pulso.

Nota experimental (IMPORTANTE)

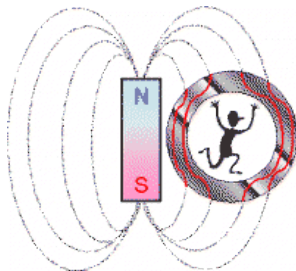
- Para prevenir un cambio de voltaje entre dínodos mayor a 1%, la carga guardada en el capacitor estabilizador debe ser 100 veces más grande que la emitida por ese dínodo durante el pulso.
- **La polaridad (+ o -) del alto voltaje usando en los tubos FM es en algún sentido una elección arbitraria. Es muy importante que el usuario sepa que convención ha sido utilizada por el fabricante para su tubo antes del uso inicial del equipo con un tubo FM.** Aplicar la polaridad errónea a un tubo FM usualmente no es fatal para el tubo, pero los electrones se negarán a “nadar cuesta arriba” y el tubo FM no funcionará.



Recubrimiento magnético

Nota relevante

La óptica de electrones adentro de un tubo FM es particularmente sensible a campos magnéticos debido al bajo promedio de energía (del orden de los 100 eV) de los electrones que viajan de etapa en etapa. Hasta la influencia del campo magnético de la Tierra es suficiente para tener un efecto apreciable en la trayectoria de los electrones.

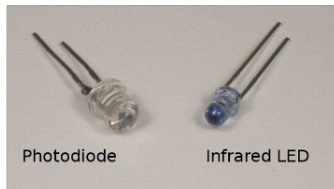


Nota experimental

En las situaciones en la que es probable mover físicamente el tubo o acercarlo a equipo con campo magnético, es esencial un recubrimiento magnético para prevenir cambios en la ganancia del tubo. Los más comunes consisten en un cilindro fino de μ -metal (aleación de níquel-hierro y otros elementos como el molibdeno) que se ajusta estrechamente a la envoltura de vidrio de un tubo FM.



Fotodiodos como sustitutos a los tubos FM



Potenciales ventajas

Los tubos FM son los amplificadores de luz más comúnmente usados con centelladores, tanto en modo de pulso y de corriente. Sin embargo, los avances en el desarrollo de fotodiodos semiconductores han llevado a la sustitución de tubos FM a dispositivos de estado sólido en algunas aplicaciones.

Algunas ventajas:

Nota relevante

- Tienen una eficiencia cuántica mayor, y por lo tanto el potencial para una mejor resolución energética.



Potenciales ventajas

Los tubos FM son los amplificadores de luz más comúnmente usados con centelladores, tanto en modo de pulso y de corriente. Sin embargo, los avances en el desarrollo de fotodiodos semiconductores han llevado a la sustitución de tubos FM a dispositivos de estado sólido en algunas aplicaciones.

Algunas ventajas:

Nota relevante

- Tienen una eficiencia cuántica mayor, y por lo tanto el potencial para una mejor resolución energética.
- Menor consumo de potencia.



Potenciales ventajas

Los tubos FM son los amplificadores de luz más comúnmente usados con centelladores, tanto en modo de pulso y de corriente. Sin embargo, los avances en el desarrollo de fotodiodos semiconductores han llevado a la sustitución de tubos FM a dispositivos de estado sólido en algunas aplicaciones.

Algunas ventajas:

Nota relevante

- Tienen una eficiencia cuántica mayor, y por lo tanto el potencial para una mejor resolución energética.
- Menor consumo de potencia.
- Tamaño más compacto.



Potenciales ventajas

Los tubos FM son los amplificadores de luz más comúnmente usados con centelladores, tanto en modo de pulso y de corriente. Sin embargo, los avances en el desarrollo de fotodiodos semiconductores han llevado a la sustitución de tubos FM a dispositivos de estado sólido en algunas aplicaciones.

Algunas ventajas:

Nota relevante

- Tienen una eficiencia cuántica mayor, y por lo tanto el potencial para una mejor resolución energética.
- Menor consumo de potencia.
- Tamaño más compacto.
- Mayor robustez comparado con los tubos FM usados en conteo de centelladores.



Potenciales ventajas

Los tubos FM son los amplificadores de luz más comúnmente usados con centelladores, tanto en modo de pulso y de corriente. Sin embargo, los avances en el desarrollo de fotodiodos semiconductores han llevado a la sustitución de tubos FM a dispositivos de estado sólido en algunas aplicaciones.

Algunas ventajas:

Nota relevante

- Tienen una eficiencia cuántica mayor, y por lo tanto el potencial para una mejor resolución energética.
- Menor consumo de potencia.
- Tamaño más compacto.
- Mayor robustez comparado con los tubos FM usados en conteo de centelladores.
- Son virtualmente insensibles a los campos magnéticos.



Potenciales ventajas

Los tubos FM son los amplificadores de luz más comúnmente usados con centelladores, tanto en modo de pulso y de corriente. Sin embargo, los avances en el desarrollo de fotodiodos semiconductores han llevado a la sustitución de tubos FM a dispositivos de estado sólido en algunas aplicaciones.

Algunas ventajas:

Nota relevante

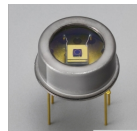
- Tienen una eficiencia cuántica mayor, y por lo tanto el potencial para una mejor resolución energética.
- Menor consumo de potencia.
- Tamaño más compacto.
- Mayor robustez comparado con los tubos FM usados en conteo de centelladores.
- Son virtualmente insensibles a los campos magnéticos.
- Su tiempo de respuesta es comparable con el de los tubos FM y también pueden ser utilizados para aplicaciones de temporización.



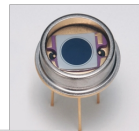
Tipos de fotodiodos de interés

En esta introducción que haremos sobre los fotodiodos, nos enfocaremos en tres diseños que son los que han recibido más atención como posibles sustitutos a los tubos FM.

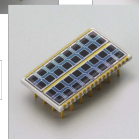
- **Fotodiodos convencionales:** También llamados fotodiodos PIN; no tienen ganancia interna y operan convirtiendo directamente los fotones ópticos desde el detector de centelleo a pares de electrón-hoyo que son colectados simplemente.
- **Fotodiodos de avalancha:** Incorporan la ganancia interna a través del uso de campos eléctricos fuertes que incrementan el número de portadores de carga que son colectados.
- **Fotomultiplicadores de silicio:** Son arreglos de muchos fotodiodos de avalancha operados en modo Geiger.



Fotodiodo PIN



Fotodiodo de avalancha



Fotomultiplicadores de silicio



Fotodiodos convencionales - I

La luz incide en una ventana de entrada, hecha de semiconductor (SM) tipo p^{\ddagger} , que se mantiene lo más delgada posible para mejorar la transmisión de luz al volumen activo de silicio. Los electrones y hoyos producidos por la luz son colectados en las fronteras de la región- i central, llevados por el campo eléctrico resultante del voltaje aplicado. La carga inducida correspondiente es procesada en un pre-amplificador para producir una pulso de señal de salida.

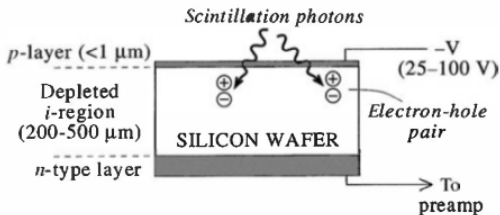


Figura 12 : Configuración básica de un fotodiodo convencional

[‡]Este tipo de SM se obtiene llevando a cabo un proceso de dopado, añadiendo un cierto tipo de átomos al SM para aumentar el número de portadores de cargas libres, en este caso positivos u hoyos.



Nota experimental

- Debido a la baja amplitud de la señal, el ruido electrónico es un problema muy importante en el modo de operación de pulsos, especialmente para detectores de gran área y radiaciones de baja energía.
- Sakai midió que la resolución energética a unos 662 keV puede ser hasta 2 veces menor que las mediciones en un tubo FM. Las diferencias son mucho menores para rayos gamma de alta energía, pero el rendimiento de los tubo FM siempre era mejor.

Nota relevante

- Aplicaciones exitosas hoy en día se limitan a radiaciones de alta energía y diodos de diámetros pequeños, para los cuales la corriente oscura asociada y capacitancia son pequeñas.
- Los fotodiodos convencionales se han convertido en el detector de luz por excelencia para centelladores en modo corriente usadas en tomografías computacionales de rayos-X, y escáneres para imágenes médicas.



Fotodiodos convencionales - III

El ruido en estos fotodiodos surge principalmente de dos fuentes distintas:

- 1 **Ruido en serie:** Se origina en la etapas iniciales de preamplificación. Aumentan con la capacitancia del detector.
- 2 **Ruido paralelo:** Se origina debido a grandes fluctuaciones en la corriente de fuga en el fotodiodo. Aumenta con el tamaño del fotodiodo.

Nota experimental

- La capacitancia del fotodiodo decrecerá mientras su grosor aumenta, pero la corriente de fuga tenderá a aumentar.



Fotodiodos convencionales - III

El ruido en estos fotodiodos surge principalmente de dos fuentes distintas:

- 1 **Ruido en serie:** Se origina en la etapas iniciales de preamplificación. Aumentan con la capacitancia del detector.
- 2 **Ruido paralelo:** Se origina debido a grandes fluctuaciones en la corriente de fuga en el fotodiodo. Aumenta con el tamaño del fotodiodo.

Nota experimental

- La capacitancia del fotodiodo decrecerá mientras su grosor aumenta, pero la corriente de fuga tenderá a aumentar.
- Los fotodiodos comunes para aplicaciones de centelladores se fabrican usando “obleas” de silicio entre los 300 – 500 μm .



Fotodiodos convencionales - III

El ruido en estos fotodiodos surge principalmente de dos fuentes distintas:

- 1 **Ruido en serie:** Se origina en la etapas iniciales de preamplificación. Aumentan con la capacitancia del detector.
- 2 **Ruido paralelo:** Se origina debido a grandes fluctuaciones en la corriente de fuga en el fotodiodo. Aumenta con el tamaño del fotodiodo.

Nota experimental

- La capacitancia del fotodiodo decrecerá mientras su grosor aumenta, pero la corriente de fuga tenderá a aumentar.
- Los fotodiodos comunes para aplicaciones de centelladores se fabrican usando “obleas” de silicio entre los 300 – 500 μm .
- Para los fotodiodos típicos, fabricados con silicio, los niveles de ruido son mucho mayores que en los tubos FM equivalentes.



Fotodiodos convencionales - III

El ruido en estos fotodiodos surge principalmente de dos fuentes distintas:

- 1 **Ruido en serie:** Se origina en la etapas iniciales de preamplificación. Aumentan con la capacitancia del detector.
- 2 **Ruido paralelo:** Se origina debido a grandes fluctuaciones en la corriente de fuga en el fotodiodo. Aumenta con el tamaño del fotodiodo.

Nota experimental

- La capacitancia del fotodiodo decrecerá mientras su grosor aumenta, pero la corriente de fuga tenderá a aumentar.
- Los fotodiodos comunes para aplicaciones de centelladores se fabrican usando “obleas” de silicio entre los 300 – 500 μm .
- Para los fotodiodos típicos, fabricados con silicio, los niveles de ruido son mucho mayores que en los tubos FM equivalentes.
- El rápido aumento en la corriente oscura (que es una fuente de ruido) a temperatura ambiente, hace que no se usen mucho los fotodiodos de silicio en aplicaciones que requieren altas temperaturas. Fotodiodos exitosos que permiten reducir este efecto están hechos de cristales de yoduro de mercurio.



Fotodiodos de avalancha - I

La pequeña carga producida en un fotodiodo convencional por un evento de centelleo típico, puede aumentarse a través de un proceso de avalancha que ocurre en un semiconductor a altos valores del voltaje aplicado. Los portadores de carga se aceleran lo suficiente entre colisiones para crear pares de electrón-hoyo adicionales a lo largo del camino de colección.

Nota experimental

- La ganancia interna ayuda a aumentar la señal más allá del nivel de ruido electrónico y permite una buena resolución energética en modo de pulso a más bajas energías de radiación que las posibles con fotodiodos convencionales.
- Debido a que el factor de ganancia es muy sensible a la temperatura y al voltaje aplicado, éstos requieren suplidores bien regulados de alto voltaje para una operación estable.
- La dependencia de la ganancia con la temperatura es fuerte comparada con los tubos FM, ésta puede decrecer hasta 2% por cada °C aumentado.



Nota relevante

Modo Geiger: Justo como en los detectores de gas, se llega a un punto en que si el voltaje se aumenta lo suficiente donde el proceso de avalancha “escapa”. Mientras nos acercamos a este valor del voltaje, las regiones de multiplicación de varios fotoelectrones comienzan a unirse en una sola avalancha. Entonces decimos que el diodo entra en modo “Geiger” en el cual la carga producida en la interacción inicial de fotones, es en principio, multiplicada sin límite.

Nota experimental

- Los fotodiodos de avalancha en modo Geiger pueden producir un gran pulso de salida de tan solo un fotón incidente.
- Fotodiodos de avalancha de un solo fotón (SPAD) han sido desarrollados y mejorados las últimas décadas, y están siendo aplicados en telecomunicaciones, mediciones de tiempo de vida con fluorescencia y mediciones con láser.



Arreglos de fotodiodos de avalancha en modo Geiger

Para aplicaciones normales de centelladores en las cuales una amplificación proporcional al número original de pares de electrones-hoyos es requerida, el modo Geiger de una sola celda es de poco interés, debido a que toda la información de este número original es perdida. Por lo tanto se han desarrollado arreglos de muchos fotodiodos de avalancha en modo Geiger de pequeñas dimensiones que solucionan este problema, los cuales son conocidos como fotomultiplicadores de silicio (SiPM).

Nota relevante

- Los fotomultiplicadores de silicio son arreglos de pequeñas celdas de fotodiodos de avalancha, cada una con dimensiones de decenas de micrones, producidos usando procesos CMOS en un chip de silicio.



Arreglos de fotodiodos de avalancha en modo Geiger

Para aplicaciones normales de centelladores en las cuales una amplificación proporcional al número original de pares de electrones-hoyos es requerida, el modo Geiger de una sola celda es de poco interés, debido a que toda la información de este número original es perdida. Por lo tanto se han desarrollado arreglos de muchos fotodiodos de avalancha en modo Geiger de pequeñas dimensiones que solucionan este problema, los cuales son conocidos como fotomultiplicadores de silicio (SiPM).

Nota relevante

- Los fotomultiplicadores de silicio son arreglos de pequeñas celdas de fotodiodos de avalancha, cada una con dimensiones de decenas de micrones, producidos usando procesos CMOS en un chip de silicio.
- El número de celdas que producen una avalancha es proporcional al número de fotones incidentes en el proceso de centelleo.



Arreglos de fotodiodos de avalancha en modo Geiger

Para aplicaciones normales de centelladores en las cuales una amplificación proporcional al número original de pares de electrones-hoyos es requerida, el modo Geiger de una sola celda es de poco interés, debido a que toda la información de este número original es perdida. Por lo tanto se han desarrollado arreglos de muchos fotodiodos de avalancha en modo Geiger de pequeñas dimensiones que solucionan este problema, los cuales son conocidos como fotomultiplicadores de silicio (SiPM).

Nota relevante

- Los fotomultiplicadores de silicio son arreglos de pequeñas celdas de fotodiodos de avalancha, cada una con dimensiones de decenas de micrones, producidos usando procesos CMOS en un chip de silicio.
- El número de celdas que producen una avalancha es proporcional al número de fotones incidentes en el proceso de centelleo.
- Debido a que los detectores de centelleo producen varios miles de fotones de luz en su ventana de salida, el número de celdas debe ser un múltiplo grande del número de fotones colectado para poder hacer esto. Son comunes los arreglos de 10^4 celdas o más por lo mismo.



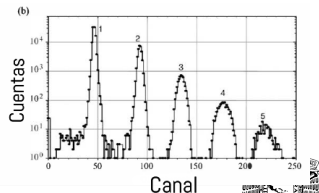
Pulsos oscuros y ruido

Debido a que los fotodiodos de avalancha den modo Geiger son muy sensible a un solo fotoelectrón, también lo son a electrones generados térmicamente en la banda de conducción. Estos electrones llevan a eventos térmicos falsos que agregan una componente de ruido aleatorio a la señal de centelleo.

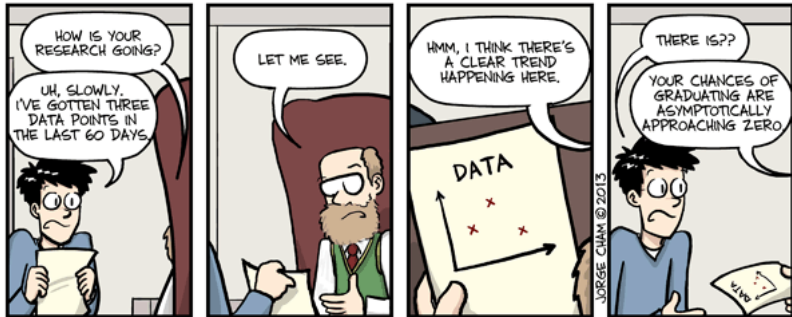
Nota experimental

- La tasa “oscura” observada en un SiPM puede ser tan grande como 10^6 pulsos/s por mm^2 a temperatura ambiente.
- La mayoría de estos eventos corresponden al disparo de una sola celda. Por lo que si la medición consiste en buscar pulsos desde solo un fotón, la tasa oscura espontánea puede ser muy alta.

(a)



Análisis de la forma de los pulsos de centelladores



WWW.PHDCOMICS.COM



Nota relevante

- La forma del pulso de voltaje producido en el ánodo de un tubo FM luego de un evento de centelleo depende de la constante de tiempo del circuito del ánodo.



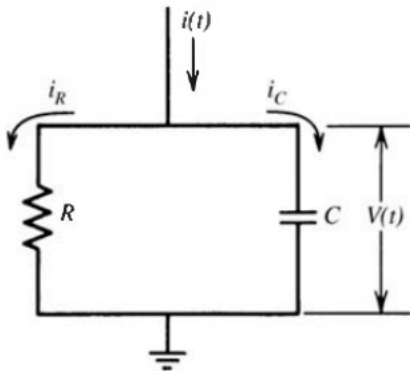
Nota relevante

- La forma del pulso de voltaje producido en el ánodo de un tubo FM luego de un evento de centelleo depende de la constante de tiempo del circuito del ánodo.
- Podemos identificar dos extremos los cuales son los más comúnmente usados con el conteo de centelleos. El primero corresponde a situaciones en la cual la constante de tiempo es seleccionada de manera tal que es **grande** comparada con el tiempo de decaimiento del centellador. El otro extremo se obtiene ajustando la constante de tiempo para que sea mucho **menor** que el tiempo de decaimiento del centellador.



Análisis de la forma de los pulsos de centelladores - II

El circuito del ánodo puede ser idealizado como en la figura de abajo.



C representa la capacitancia del ánodo, más la capacitancia del cable conector y la capacitancia de entrada del circuito al cual el ánodo está conectado. La resistencia de carga R puede ser una resistencia física conectada a la base del tubo, o, a la impedancia del circuito conectado. La corriente que fluye por el ánodo $i(t)$ es simplemente la corriente de electrones de un pulso simple, supuesto a comenzar en $t = 0$.



Análisis de la forma de los pulsos de centelladores - III

La forma de $i(t)$ influenciará la forma del pulso de voltaje del ánodo, y para el análisis breve que haremos, utilizaremos una representación simplificada de un pulso de electrones típico luego de un evento de centelleo. La componente principal de la luz emitida en la mayoría de los centelladores puede ser representada como un simple decaimiento exponencial.

Si el esparcimiento del tiempo de tránsito del tubo FM es pequeño comparado con este tiempo de decaimiento, entonces un modelo realista de la corriente de electrones que llega al ánodo del tubo FM es simplemente

$$i(t) = i_0 e^{-\lambda t}, \quad (3)$$

donde λ es la constante de decaimiento del centellador. La corriente inicial i_0 puede representarse en términos de la carga total Q colectada sobre el pulso entero como $i_0 = \lambda Q$, por lo tanto

$$i(t) = \lambda Q e^{-\lambda t}$$



Análisis de la forma de los pulsos de centelladores - IV

Para derivar el pulso de voltaje $V(t)$ esperado en el ánodo, notamos que la corriente que fluye al circuito paralelo RC debe ser la suma de la corriente que fluye a la capacitancia i_C y la corriente sobre la resistencia i_R , $i(t) = i_C + i_R$. Luego de unas sustituciones y trabajando sobre las anteriores ecuaciones llegamos a una ecuación diferencial de primer orden no homogénea con condición inicial $V(0) = 0$, cuya solución es

$$V(t) = \frac{1}{\lambda - \theta} \frac{\lambda Q}{C} (e^{-\theta t} - e^{-\lambda t}), \quad (5)$$

donde $\theta \equiv 1/(RC)$ es el recíproco la constante de tiempo del ánodo.



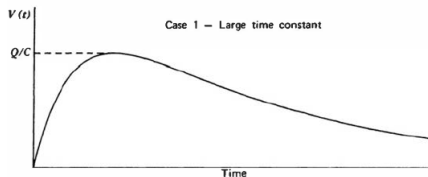
Constante de tiempo grande - I

Si la constante de tiempo se hace grande comparada con el tiempo de decaimiento del centellador, entonces $\theta \ll \lambda$, y tenemos entonces que

$$V(t) \cong \frac{Q}{C}(e^{-\theta t} - e^{-\lambda t}) \quad (6)$$

Debajo se muestra este pulso graficado.

El comportamiento a valores pequeños de t es ahora



$$V(t) = \frac{Q}{C}(1 - e^{-\lambda t}), \quad \left(t \ll \frac{1}{\theta}\right)$$

y para t grande

$$V(t) = \frac{Q}{C}e^{-\theta t}, \quad \left(t \gg \frac{1}{\lambda}\right)$$



Las siguientes observaciones importantes pueden hacerse,

Nota relevante

- La parte principal del pulso tiene un comportamiento temporal ($1 - e^{-\lambda t}$) y su tiempo de subida es determinado por la constante de decaimiento del centellador λ . Los centelladores rápidos tienen valores grandes de λ que llevan a pulsos que suben rápidamente.



Las siguientes observaciones importantes pueden hacerse,

Nota relevante

- La parte principal del pulso tiene un comportamiento temporal $(1 - e^{-\lambda t})$ y su tiempo de subida es determinado por la constante de decaimiento del centellador λ . Los centelladores rápidos tienen valores grandes de λ que llevan a pulsos que suben rápidamente.
- La cola del pulso tiene un comportamiento temporal $e^{-\theta t}$ y por lo tanto decae a una tasa determinada por la constante temporal del circuito del ánodo $RC \equiv 1/\theta$.



Constante de tiempo grande - II

Las siguientes observaciones importantes pueden hacerse,

Nota relevante

- La parte principal del pulso tiene un comportamiento temporal $(1 - e^{-\lambda t})$ y su tiempo de subida es determinado por la constante de decaimiento del centellador λ . Los centelladores rápidos tienen valores grandes de λ que llevan a pulsos que suben rápidamente.
- La cola del pulso tiene un comportamiento temporal $e^{-\theta t}$ y por lo tanto decae a una tasa determinada por la constante temporal del circuito del ánodo $RC \equiv 1/\theta$.
- La amplitud del pulso está dada simplemente por Q/C , pero este valor es alcanzado solo si $\theta \ll \lambda$. Es decir, como hemos establecido, la constante de tiempo del circuito debe ser más grande que el tiempo de decaimiento del centellador.



Nota experimental

- La mayoría de la cuenta de centelladores se hace en este modo debido a que la altura del pulso es maximizada y las fuentes subsecuentes de ruido tendrán un efecto degradante mínimo en la resolución de altura del pulso.



Nota experimental

- La mayoría de la cuenta de centelladores se hace en este modo debido a que la altura del pulso es maximizada y las fuentes subsecuentes de ruido tendrán un efecto degradante mínimo en la resolución de altura del pulso.
- La amplitud del pulso conseguida no es sensible a cambios en la resistencia de carga o a cambios pequeños en los tiempos característicos del pulso de electrones.



Nota experimental

- La mayoría de la cuenta de centelladores se hace en este modo debido a que la altura del pulso es maximizada y las fuentes subsecuentes de ruido tendrán un efecto degradante mínimo en la resolución de altura del pulso.
- La amplitud del pulso conseguida no es sensible a cambios en la resistencia de carga o a cambios pequeños en los tiempos característicos del pulso de electrones.
- El usuario debe escoger una constante de tiempo al menos unas 5 – 10 veces más grande que el tiempo de decaimiento del centellador pero que no sea excesivamente grande para prevenir un apilado innecesario de la cola de un pulso precedente.



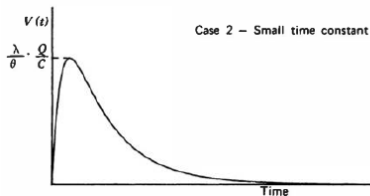
Constante de tiempo pequeña - I

En el extremo opuesto, la constante de tiempo del ánodo se hace pequeña comparada con el tiempo de decaimiento del centellador, o $\theta \gg \lambda$, entonces

$$V(t) \approx \frac{\lambda}{\theta} \frac{Q}{C} (e^{-\lambda t} - e^{-\theta t}) \quad (7)$$

Debajo se muestra este pulso graficado.

El comportamiento a valores pequeños de t es ahora



$$V(t) = \frac{\lambda}{\theta} \frac{Q}{C} (1 - e^{-\theta t}), \quad \left(t \ll \frac{1}{\lambda} \right)$$

y para t grande

$$V(t) = \frac{\lambda}{\theta} \frac{Q}{C} e^{-\lambda t}, \quad \left(t \gg \frac{1}{\theta} \right)$$



Las siguientes conclusiones generales ahora aplican,

Nota relevante

- La parte principal del pulso tiene un comportamiento temporal $(1 - e^{-\theta t})$, que está determinado por la constante de tiempo del ánodo $RC \equiv 1\theta$.



Las siguientes conclusiones generales ahora aplican,

Nota relevante

- La parte principal del pulso tiene un comportamiento temporal $(1 - e^{-\theta t})$, que está determinado por la constante de tiempo del ánodo $RC \equiv 1\theta$.
- La cola del pulso tiene comportamiento temporal $e^{-\lambda t}$, el cual es idéntico al de la luz de centelleo.



Constante de tiempo pequeña - II

Las siguientes conclusiones generales ahora aplican,

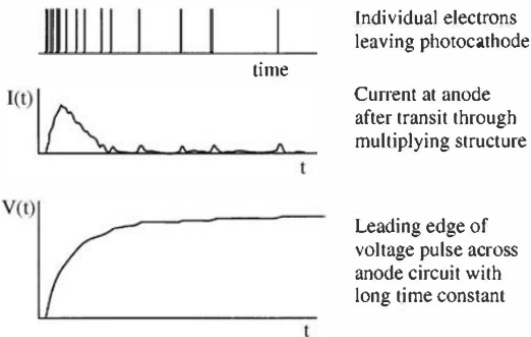
Nota relevante

- La parte principal del pulso tiene un comportamiento temporal $(1 - e^{-\theta t})$, que está determinado por la constante de tiempo del ánodo $RC \equiv 1\theta$.
- La cola del pulso tiene comportamiento temporal $e^{-\lambda t}$, el cual es idéntico al de la luz de centelleo.
- La amplitud máxima del pulso es ahora $(\lambda Q/\theta C)$, mucho más pequeña que en el caso 1, en el cual el máximo era (Q/C) , porque por definición para el caso 2 $\lambda \ll \theta$.

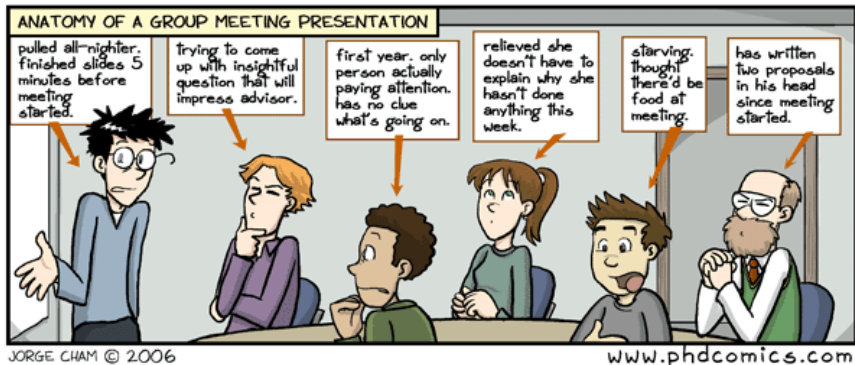


Consideraciones un poco más realistas

El modelo simplificado que hemos usado asume una corriente $i(t)$ continua y suave, no representa la naturaleza “rugosa” de la corriente que surge últimamente del ánodo de fotoelectrones discretos. En el caso 1, los efectos de discreción son muy suavizados por el proceso de integración de corrientes que se hace. En el caso 2, no se hace ninguna integración y el pulso es mucho más sensible a fluctuaciones que se originan de la naturaleza estadística de la producción de fotoelectrones. Estas fluctuaciones en la forma del pulso y la amplitud son muy significantes para los eventos de centelleo débiles, que producen solo un pequeño número de fotoelectrones.



Algunas cosas de las que no hablaré pero que valen la pena leer



Algunas cosas de las que no hablaré pero que valen la pena leer

- **Tubos FM híbridos:** La estructura fotomultiplicadora es reemplazada por un detector de silicio. Uno de los beneficios más importantes es que tienen un comportamiento estadístico superior de la amplificación y permiten separar eventos correspondientes a un solo fotoelectrón de los eventos correspondientes a muchos fotoelectrones.
- **Tubos FM detectores de posición:** Tubos FM que proveen información de la posición de la luz incidente. Usan estructuras multiplicadoras que mantienen la separación espacial entre las nubes de electrones que se originan de los fotoelectrones generados en lugares separados del fotocátodo. También utilizan dínodos especializados.
- **Detectores de fotoionización:** Funcionan en el rango de la luz ultravioleta. Vapor orgánico se incorpora como un componente del gas que llena un detector convencional sensible a la ionización, entonces la amplitud de la señal del pulso reflejará el número de fotones incidentes que se han convertido en iones. Comúnmente se usan con tubos FM detectores de posición.



YOUR CONFERENCE PRESENTATION

HOW YOU PLANNED IT:



HOW IT GOES:

