

Boletín 8

PANELES SOLARES

EFECTO
FOTOELECTRICO

Boletín técnico N°8
PARTE 1

Ing. Gregor Rojas

Caracas - Venezuela

PANELES SOLARES EFECTO FOTOELECTRICO.

PARTE 1

Por:

Ing. Gregor Rojas
GERENTE NACIONAL
MERCADERO Y VENTAS
División materiales eléctricos

1. Generalidades.

Se podría decir que el efecto fotoeléctrico es lo opuesto a los rayos X, ya que el efecto fotoeléctrico indica que los fotones pueden transferir energía a los electrones.

De los rayos X no se conocía la naturaleza de su radiación, de ahí proviene la letra "X" que representa una incógnita. Estos rayos son la transformación en un fotón de toda o parte de la energía cinética de un electrón en movimiento. Esto se descubrió casualmente antes de que se dieran a conocer los trabajos de Planck y Einstein.

El siguiente paso ocurrió en 1873 cuando el ingeniero eléctrico inglés Willoughby Smith descubre el efecto fotovoltaico en sólidos, en este caso sobre el Selenio. Pocos años más tarde, en 1877, el inglés William Grylls Adams profesor de Filosofía Natural en la King College de Londres, junto con su alumno Richard Evans Day, crearon la primera célula fotovoltaica de selenio.

2. Efecto Fotoeléctrico.

Cuando la luz brilla en un metal, los electrones son expulsados de la superficie del metal en un fenómeno que se denomina efecto fotoeléctrico. A este proceso también lo llaman fotoemisión, y a los electrones expulsados del metal, se les conoce como fotoelectrones.

El efecto fotoeléctrico lo podemos definir como la emisión de electrones de los átomos de un metal cuando sobre el mismo inciden rayos de luz que no es más que una radiación electromagnética,

produciendo que se liberen los electrones de la atracción que mantiene su átomo.

En la actualidad la base sobre el cual se fundan los sistemas fotovoltaicos comerciales se le denomina principio fotoeléctrico, mediante el cual las radiaciones solares se transforman en energía eléctrica.

El anterior efecto se produce en las células fotoeléctricas, que son los componentes básicos que conforman los paneles solares o fotovoltaicos. En la figura 1 se aprecia una Célula fotoeléctrica componente fundamental de un panel solar.



Figura 1. Célula fotoeléctrica

En 1884, el inventor neoyorquino Charles Fritts creó el primer panel solar de la historia. Extendió una capa de selenio sobre una plancha de metal y la recubrió con una fina película de pan de oro.

Aunque este panel alcanzaba una eficiencia de entre el 1 y el 2%, un rendimiento muy inferior al de los modernos, le permitió concluir que su invento produjo corriente continua constante.

A los materiales que al absorber la radiación electromagnética recibida de la luz solar y emiten electrones se les denomina fotoemisores y están conformados en su totalidad por metales.

Como todos sabemos la corriente eléctrica es un desplazamiento de electrones, de ahí que el efecto fotoeléctrico es una forma de generar corriente eléctrica, esto debido a que la luz solar desplaza electrones.

$$E = \frac{h \times c}{\lambda}$$

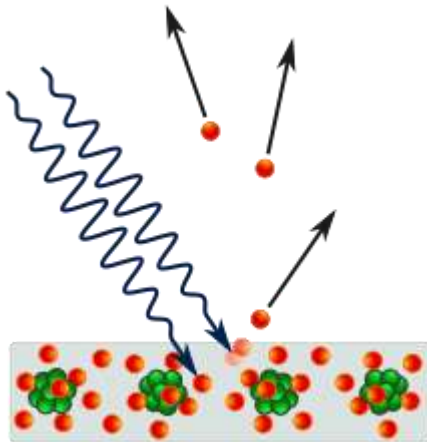


Figura 2. Efecto fotoeléctrico

En la figura 2 se puede apreciar los fotones provenientes de la luz solar cuando inciden en la superficie del panel (líneas onduladas), de igual forma, se observa que al chocar estas partículas con los electrones en color rojo liberan a los mismos de su capa. Estos son partículas sin masa pero con energía que forman parte de la luz.

La luz se compone de infinidad de partículas muy pequeñas, sin masa no obstante, con una energía, a estas partículas se les denomina fotones.

Cuando estas partículas inciden sobre el metal a través de la luz y chocan contra un electrón del átomo del metal, cuando el fotón posee bastante energía en esa misma proporción se la confiere al electrón con el cual colisiono, liberándolo de su última capa, lo que significa que lo libera de la atracción del átomo, dejándolo libre por el metal o expulsándolo fuera de él.

Ya hemos visto que toda radiación de luz solar está compuesta por partículas denominadas fotones y poseen asociadas un determinado valor de energía (E), que va en función de la longitud de onda (λ) de la radiación y su valor cuantitativo esta expresado de la siguiente forma:

De donde:

h es la constante de Planck, con un valor de 6.63×10^{-34} J·s

c es la velocidad de la luz, cuyo valor es 299.792.458 m/s

λ es la longitud de onda de radiación solar

El Sol emite energía en forma de radiación de onda corta, principalmente en la banda del ultravioleta, visible y cercano al infrarrojo con longitudes de onda que van entre 0,2 y 3,0 micrómetros, tal como se aprecia en la figura 3.

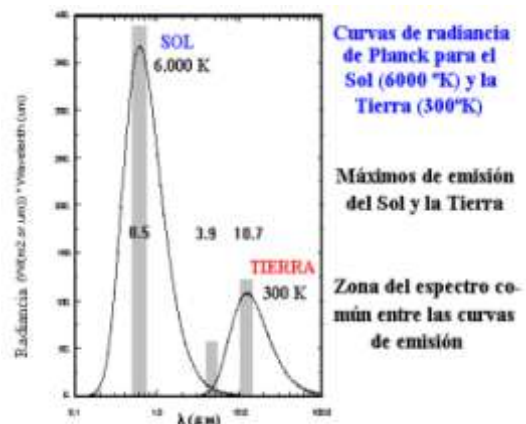
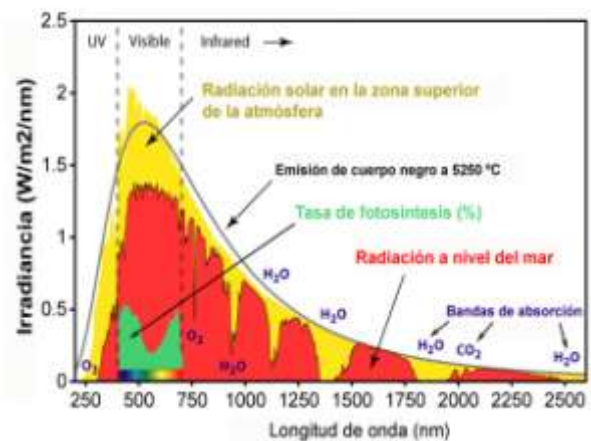


Figura 3. Espectro de radiación solar y actividad fotosintética

Aproximadamente un 99% de la radiación solar de onda corta que incide sobre la superficie de la tierra está contenida en la región que va entre 0,3 y 2,8 μm , mientras que la mayor proporción de la radiación terrestre de onda larga está contenida en la región que va desde los 3,5 hasta 50 μm .

La región visible entre $400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$ corresponde a la radiación que puede percibir la sensibilidad del ojo humano e incluye los colores: violeta 0,42 μm ó 420 nm, azul 0,48 μm , verde 0,52 μm , amarillo 0,57 μm , naranja 0,60 μm y rojo 0,70 μm .

La luz de color violeta es más energética que la luz de color rojo, porque tiene una longitud de onda más pequeña. La radiación con las longitudes de onda más corta que la correspondiente a la luz de color violeta es denominada radiación ultravioleta.

Los distintos colores de luz tienen en común el ser radiaciones electromagnéticas que se desplazan con la misma velocidad. Se diferencian en su frecuencia y longitud de onda. Dos rayos de luz con la misma longitud de onda tienen la misma frecuencia y el mismo color.

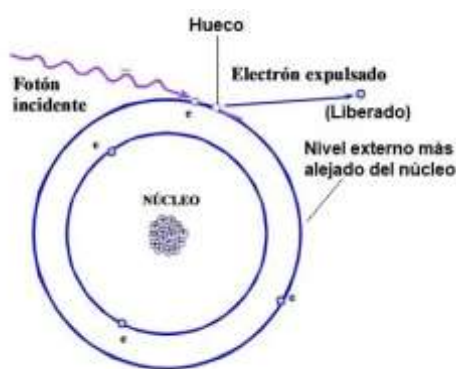


Figura 4. Estructura atómica del átomo

Retomando lo tratado sobre el efecto fotovoltaico, los electrones más cercanos al núcleo se encuentran fuertemente ligados a él, además de poseer poca energía. Los más electrones que se encuentran más externos son las que poseen más

energía y a su vez son los más fáciles de hacerles abandonar el átomo, debido a que son los más retirados al núcleo.

Estos electrones son los que expulsan o liberan los fotones al incidir con el metal y se denominan electrones de valencia debido a que ellos pueden establecer enlaces con otros átomos que se encuentren próximos. En la figura 4 podemos ver la estructura atómica de un átomo y como se produce el desprendimiento o liberación del electrón ubicado en su capa mas externa cuando un fotón colisiona con él expulsándolo del átomo.

Lo que denominamos como electrones de valencia de un átomo de un metal, son los que están siempre unidos a otros electrones de otro átomo cercano del metal mediante lo que se conoce como enlace covalente.

Los fotones poseen una energía característica determinada por la frecuencia de onda de la luz. Si un átomo absorbe energía de un fotón que tiene más energía que la necesaria para expulsar un electrón del material y tiene una trayectoria dirigida hacia la superficie, entonces el electrón puede ser expulsado del material.

Cuando la energía del fotón es muy pequeña, el electrón no puede ser capaz de escaparse de la superficie del material.

Cuando existen cambios en la intensidad de la luz estos no modifican la energía de sus fotones, tan solo el número de electrones que pueden escapar de la superficie sobre la que incide y por tanto la energía de los electrones emitidos no depende de la intensidad de la radiación que le llega, sino de su frecuencia.

Cuando un fotón expulsa a un electrón de un átomo, está rompiendo con el enlace covalente que existía, generándose un hueco en dicho enlace. Lo anterior es lo que se conoce como par electrón-hueco.

Cada vez que se libera un electrón, se genera un hueco en el átomo. En la figura 5 puedes ver el caso del silicio:

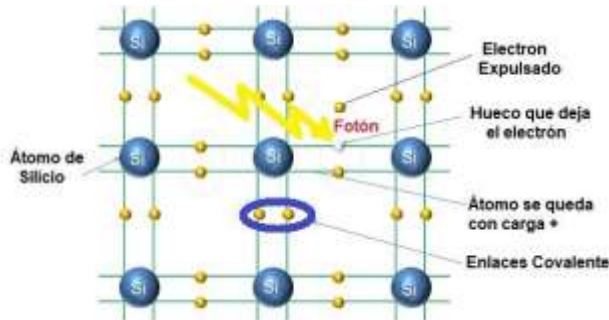


Figura 5. Caída de voltajes máximas permitidas

Cuando la luz incide sobre el panel los electrones liberados y huecos que se generan se desplazan por su interior de manera aleatoria, cada vez que un electrón encuentra un hueco, lo ocupa y libera la energía adquirida anteriormente suministrada por el fotón. Este proceso se le denomina recombinación de un par electrón-hueco.

Por otra parte, denominamos energía de enlace de un material a la mínima energía necesaria para romper un enlace y de esta forma crear un par electrón-hueco. Sin importar el tipo de material esta energía es constante y siempre es la misma. Silicio es un buen ejemplo, la energía mínima requerida es de 1,12 eV (electrón voltio).

Como lo habíamos comentado anteriormente, la energía de un fotón obedece al espectro de la longitud de onda de la luz a la que pertenece. Debido a que la luz puede tener distintas longitudes de onda, podemos hallarnos con fotones con otras energías. Si la energía del fotón es inferior a la energía de enlace del material, este lo atraviesa sin generar ningún efecto, en conclusión, no será capaz de liberar electrones.

Se debe tener claridad de que las distintas energías que poseen los fotones corresponden a diferentes longitudes de onda que componen lo

que se denomina espectro electromagnético solar o el espectro de la luz.

Es importante tener presente que no todos los fotones logran alcanzar el objetivo de apartar electrones en un metal. Esto se debe a que en la medida en que los fotones atraviesan el material estos van perdiendo energía. Es frecuente que para el momento de la colisión ya algunos fotones hayan perdido gran parte de su energía para desplazar a un electrón.

De igual forma, un porcentaje de fotones que logran traspasar la lámina del semiconductor no colisionan con ningún electrón y de otros que son reflejados. En consecuencia no podrá producirse el efecto fotovoltaico y solo los electrones saltarán de una capa a otra.

También debemos resaltar que no todos los fotones que llegan a las células solares se convierten en electricidad. Parte de la radiación incidente se pierde por reflexión y otra parte por transmisión cuando atraviesa la célula del panel solar.

La investigación del impacto fotoeléctrico provocó grandes avances muy importantes en la comprensión de la forma cuántica de la luz y de los electrones, esto afectó el desarrollo de la idea de la dualidad onda partícula donde una onda formada por partículas, en este caso los fotones, permitió explicar la energía luminosa.

En un aislante (dieléctrico), los electrones más energéticos se encuentran en la banda de valencia. En un metal, los electrones con mayor energía se encuentran en la banda de conducción.

En un semiconductor de tipo N, los electrones de la banda de conducción son los que poseen mayor energía, al igual, que en un semiconductor de tipo P, no obstante, hay muy pocos en la banda de conducción. Se debe tener en cuenta que para

este tipo de semiconductor los electrones de la banda de valencia.

A temperatura ambiente, los electrones con mayor energía se ubican cerca del nivel de Fermi no así en los semiconductores intrínsecos en los cuales no hay electrones cerca del nivel de Fermi.

La energía que se debe suplir a un electrón para llevarlo del nivel de Fermi hasta el exterior del material se le denomina función de trabajo, y a la frecuencia mínima requerida de radiación que incide para sacar un electrón del metal, se le llama frecuencia umbral.

Los valores de esta energía son muy variables y dependen del material, estado cristalino y sobre todo, de las últimas capas atómicas que recubren la superficie del material. Los metales alcalinos como sodio, calcio, cesio, etc., ostentan las funciones de trabajo más bajas.

Los fotones del rayo de luz tienen una energía característica determinada por la frecuencia de la luz. En el proceso de fotoemisión, cuando un electrón toma la energía de un fotón y este último posee más energía que la función de trabajo, el electrón es removido del material. Si la energía del fotón es muy baja, el electrón no puede escapar de la superficie del material.

Debemos tener presente que al aumentar la intensidad del haz no cambiamos la energía de los fotones integrantes, únicamente modificamos la cantidad de fotones, como resultado tenemos que la energía de los electrones emitidos no depende de la intensidad de la luz, sino de la energía de los fotones.

Toda la energía de un fotón debe ser absorbida y utilizada para liberar un electrón de un enlace atómico, o si no la energía es reemitida. Si la energía del fotón es absorbida, una parte libera al electrón del átomo y el resto contribuye a la

energía cinética del electrón como una partícula libre.

Albert Einstein intentó explicar el comportamiento de la radiación, que obedecía a la intensidad de la radiación incidente, al conocerse la cantidad de electrones que abandonaba el metal, y a la frecuencia de la misma, que era proporcional a la energía que impulsaba a dichas partículas.

3. Comprendiendo el efecto fotoeléctrico.

Debemos estar claros que la energía de los fotones no obedece a la intensidad de la radiación, está condicionada por su longitud de onda. A menor longitud de onda, se tendrá mayor energía tal como se puede deducir de la fórmula.

$$E = h \cdot c / \lambda$$

De lo anterior, podemos aseverar que si a una determinada longitud de onda no obtenemos el efecto fotoeléctrico, tampoco con un aumento de su intensidad lo alcanzaremos. No obstante, si reducimos su longitud de onda incrementando su energía, si lo conseguiremos.

Para cada semiconductor existe una mínima energía requerida para poder romper un enlace covalente y que se produzca un par electrón-hueco, y en consecuencia una máxima longitud de onda. Como ejemplo, para el silicio necesitamos una energía mayor a 1,12 eV, lo que corresponde con una longitud de onda menor a 1.100 nm.

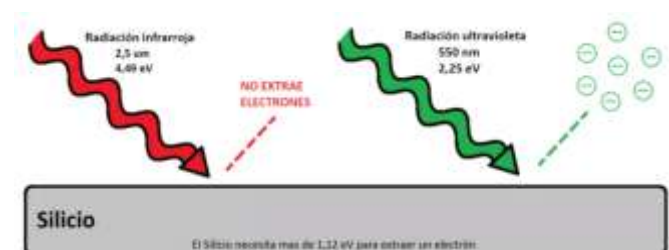


Figura 6. Radiaciones sobre silicio

4. Aplicaciones del efecto fotoeléctrico.

Ya hemos visto que el efecto fotoeléctrico es la base de la producción de energía solar fotovoltaica. Este principio se utiliza también para la fabricación de células utilizadas en los detectores de llama de las calderas de las grandes centrales termoeléctricas, así como para los sensores utilizados en las cámaras digitales.

Es empleado en diodos fotosensibles tales como los que se utilizan en las células fotovoltaicas y en electroscopios o electrómetros. En nuestros días la materia prima fotosensibles más utilizada es el cobre y el silicio, que produce corrientes eléctricas mayores.

El efecto fotoeléctrico también se manifiesta en cuerpos expuestos a la luz solar de forma prolongada. Como lo es el caso de las partículas de polvo en la superficie lunar que adquieren carga positiva del impacto de fotones. Las partículas cargadas se repelen mutuamente elevándose de la superficie y formando una tenue atmósfera.

Además de la fotovoltaica que explicaremos en el próximo boletín técnico, el principio del efecto fotoeléctrico es empleado en una gran cantidad de dispositivos, entre los que se pueden mencionar: fotocopiadoras, medidores de luz, componentes electrónicos como fotodiodos, fototransistores, optoacopladores, etc.

Otro de los usos del efecto fotoeléctrico son los centelladores o detectores de radiación. El centellador es un dispositivo que emite luz cuando detecta radiación de una fuente de luz en el laboratorio o de una fuente cósmica.

Tal como anteriormente se comentó la generación de corriente eléctrica parte a raíz del contacto de dos piezas de distinto material y esto es exactamente lo que nos ayuda a crear ese campo eléctrico en el interior de las células del panel solar fotovoltaico.

5. Leyes de la emisión fotoeléctrica

Estas regulan este fenómeno a través de diferentes estudios e investigaciones realizadas.

1. Para un metal y una frecuencia de radiación incidente dado, la cantidad de fotoelectrones emitidos es directamente proporcional a la intensidad de luz incidente.
2. Para cada metal dado, existe una cierta frecuencia mínima de radiación incidente debajo de la cual ningún fotoelectrón puede ser emitido. Esta frecuencia se llama frecuencia de corte, también conocida como "Frecuencia Umbral".
3. Por encima de la frecuencia de corte, la energía cinética máxima del fotoelectrón emitido es independiente de la intensidad de la luz incidente, pero depende de la frecuencia de la luz incidente.
4. La emisión del fotoelectrón se realiza instantáneamente, independientemente de la intensidad de la luz incidente.

Cuando se realizaron los experimentos para ver el efecto de la amplitud y frecuencia de la luz, se observaron los siguientes resultados:

- ❖ La energía cinética de los fotoelectrones se incrementa con la frecuencia de la luz.
- ❖ La corriente eléctrica permanece constante a medida que la frecuencia de la luz aumenta.
- ❖ La corriente eléctrica aumenta con la amplitud de la luz.
- ❖ La energía cinética de los fotoelectrones permanece constante a medida que la amplitud se incrementa.

Estos resultados estaban completamente en desacuerdo con las predicciones basadas en la descripción clásica de la luz como onda.

Para explicar qué estaba pasando, se necesitaba un modelo de la luz completamente nuevo desarrollado por Albert Einstein, quien propuso que la luz a veces se comporta como partículas de energía electromagnética que llamamos fotones.

6. Frecuencia de la luz y la frecuencia umbral ν_0

Podemos elucubrar con en la luz incidente como si fuese un manantial de fotones con una energía determinada por la frecuencia de la luz.

Como ya hemos visto cuando un fotón incide en la superficie de un metal, la energía de este fotón es absorbida por un electrón del metal.

En la figura 7 de más abajo, podemos observar la relación existente entre la frecuencia de la luz y la energía cinética de los electrones expulsados.

Como se aprecia la frecuencia de la luz roja que incide es menor que la frecuencia umbral en este metal es decir, $\nu_{\text{rojo}} < \nu_0$, lo que implica electrones expulsados.

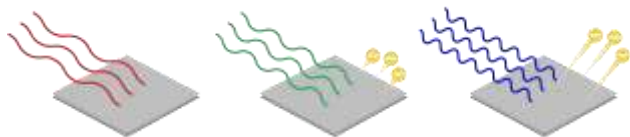


Figura 7. Diferentes valores de frecuencia de luz

Al observar la luz verde y la azul que inciden en las superficies tienen frecuencias mayores que la frecuencia de umbral para estos metales, es decir, ambas tienen $\nu > \nu_0$, lo que implica que ambas causan fotoemisión. No obstante, la luz azul que posee una energía mayor expulsa electrones con una energía cinética mucho más elevada si la comparamos con la de la luz verde.

Los encargados de realizar estudios en esta materia concluyeron que si la luz incidente tenía una frecuencia más baja que la frecuencia de umbral ν_0 , esto implicaría que no sería capaz de expulsar electrones sin importar cuál sea la amplitud de la luz.

Tenga siempre presente que la frecuencia mínima también se denomina frecuencia umbral (ν_0), y el valor de la misma depende del metal. Para frecuencias mayores que ν_0 , los electrones serían expulsados del metal.

En el próximo boletín técnico realizaremos un análisis del efecto fotovoltaico, y veremos las diferencias entre estos dos conceptos básicos en los sistemas solares.