

Principios de la Energía Solar Fotovoltaica

Energía Integral S. de R.L. de C.V.

Mauricio Zelaya Aguilar *

February 24, 2015

Nuestro entendimiento de la Naturaleza le pertenece al mundo

Resumén

Recientemente, el ser humano ha aprendido a obtener electricidad a partir de la energía solar mediante procesos fototérmicos y fotovoltaicos. Los primeros operan bajo principios semejantes a los de las centrales térmicas convencionales. Los denominados fotovoltaicos, presentan una importante simplificación respecto a los procesos energéticos usuales, debido a que transforman una energía primaria, la solar, en electricidad de un modo directo, es decir, sin transformaciones intermedias en otras formas de energía. Estos dispositivos son estáticos y en absoluto semejantes a los generadores convencionales.

Los procesos que implican la dispersión o absorción de radiación por materia son tres, a saber: el **efecto fotoeléctrico** (proceso involucrado en la conversión de energía solar en energía eléctrica), el **efecto Compton** y la **producción de pares**.

El crecimiento exponencial es probablemente el mas familiar para los ingenieros electricistas, en la ecuación del diodo, la cual relaciona la corriente en el diodo I , al voltaje en el diodo V

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (1)$$

Mientras la ecuación (1) es fundamental en el rendimiento de las celdas fotovoltaicas, muchos otros procesos físicos son caracterizados por el crecimiento exponencial.

La celda fotovoltaica es un diseño especial de la *unión p-n* o diodo de barrera de Schottky.

En una célula solar, la luz solar entrante desaloja electrones y sus contrapartes cargadas positivamente, llamados huecos, en la capa media del dispositivo. Los electrones luego migran a un electrodo, liberando alguna carga eléctrica y vuelven a los huecos a través de otro electrodo para completar el circuito

Fundamentos de Dispositivos Fotovoltaicos

1. *Generación de carga*: La luz excita los electrones, liberándolos para moverse a través del cristal.
2. *Separación de la carga*: Un campo eléctrico dirigido hacia el material (unión p-n) barre electrones.
3. *Colección de carga*: Los electrones depositan su energía en una carga externa, lo cual completa el circuito.

Historia

Fue *Becquerel* el primero en descubrir que la luz solar podía ser convertida directamente en electricidad en 1839, cuando observaba el efecto fotovoltaico. Entonces en 1876, *Adamas y Day* encontraron que el selenio poseía propiedades fotovoltaicas. Cuando *Planck* postuló la naturaleza cuántica de la luz en el año 1900, la puerta se abrió para otros científicos al construir la teoría. Luego en 1930 *Wilson* propuso la teoría cuántica de los sólidos, que brindo un enlace teórico entre el fotón y las propiedades de los sólidos. Diez años después, *Mott y Schottky* desarrollaron la teoría del diodo de estado sólido, y en 1949 *Bardeen, Brattain y Shockley* inventaron el transistor bipolar. Esta invención revoluciono el mundo de los dispositivos de estado sólido. La primer celda solar fue desarrollada por *Chapin, Fuller, Pearson*, seguidamente en 1954, la cual tenía una eficiencia del 6%. Solo cuatro años después, la primer celda solar fue usada en el satélite estadounidense *Vanguard I*.

El Espectro Solar

El Sol provee la energía necesaria para sostener la vida en nuestro Sistema Solar. En una hora la Tierra recibe suficiente energía solar para satisfacer la demanda que se necesita para la producción de un año. En otras palabras, esto es cerca de 5000 veces la energía que la Tierra produce de todas sus fuentes energeticas.

El Sol esta compuesto de una mezcla de gases con predominancia de hidrógeno. Como el Sol convierte el hidrógeno en helio en una fusión termonuclear de

*mauricio.zelaya.aguilar@gmail.com

reacción masiva, la masa es convertida en energía de acuerdo a la famosa fórmula de *Einstein* $E = mc^2$. como resultado de esta reacción la superficie del Sol se mantiene a una temperatura aproximada de 5800 °K. Esta energía es radiada desde el Sol de manera uniforme en todas las direcciones, de acuerdo con la fórmula de la radiación del cuerpo negro de *Planck*

$$W_\lambda = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (2)$$

donde $h = 6.63 \times 10^{-34} J \cdot s$ (constante de Planck) o $h = 4.14 \times 10^{-15} eV$ y $k = 1.38 \times 10^{-23} J/K$ (constante de Boltzmann) o $k = 8.62 \times 10^{-5} eV$. El electrón Voltio (eV) es la unidad de medida de la energía en la física de las partículas elementales, la cual es la energía ganada por un electrón al superar una diferencia de potencial de 1 V.

La ecuación (2) nos brinda la densidad de energía en la superficie del Sol en $W/m^2/m$. El Sol irradia energía a razón de $3.90 \times 10^{26} W$, la distancia media desde el Sol es de $150 \times 10^6 km$, la energía solar se recibe a razón de $1367 W/m^2$, justo afuera de la atmósfera de la Tierra suponiendo incidencia normal, y es conocida como la constante solar¹.

La figura 1 nos muestra los gráficos de la fórmula de radiación del cuerpo negro de Planck para diferentes temperaturas y espectro electromagnético. Un **cuerpo negro** es aquel cuya superficie puede absorber toda la radiación que incide sobre él².

El conocimiento de la composición espectral del Sol es importante para la comprensión de los efectos atmosféricos en la radiación solar, para ayudarnos a entender cuales materiales pueden ofrecer una mayor eficiencia en la conversión de luz solar a electricidad.

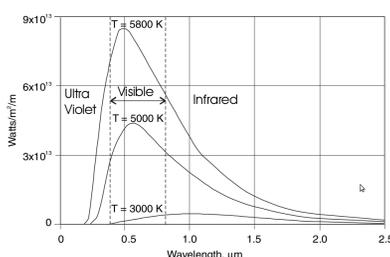


Figure 1: Espectro de radiación del cuerpo negro. (Imagen de dominio público)

Cuando la luz ingresa a la atmósfera terrestre alguna es absorbida, otra es dispersada y alguna pasa sin ser afectada por las moléculas en la atmósfera y es absorbida o reflejada por objetos al nivel del suelo.

La cantidad de luz absorbida o dispersada depende de la longitud de la trayectoria a través de la

atmósfera. Esta longitud de trayectoria es generalmente comparada con una trayectoria directamente vertical al nivel del mar, la cual se designa como **masa de aire=1** (AM1). En general la masa de aire a través de la luz solar que pasa es proporcional a la secante del **ángulo cenit** θ_c , el cual se mide directamente entre el haz directo y la vertical. En AM1 después de la absorción la intensidad de la radiación global se reduce generalmente de $1367 W/m^2$ en la cima de la atmósfera, a un poco más de $1000 W/m^2$ al nivel del mar. Para AM1 la intensidad de la luz solar se ha reducido un 70% de su valor original AM0.

En forma de ecuación, está observación puede ser expresada como

$$I = 1367(0.7)^{AM} \quad (3)$$

De acuerdo a Meinel y Meinel³, el mejor dato observado que encaja viene dado por

$$I = 1367(0.7)^{(AM)^{0.678}} \quad (4)$$

Irradiancia es la medida de la densidad de potencia de la luz solar y se mide en W/m^2 . Por lo tanto es una cantidad instantánea. La constante solar para la Tierra es la irradiancia recibida por ella desde el Sol en la cima de la atmósfera (i.e. en AM0 es igual a $1367 W/m^2$). Después de pasar a través de la atmósfera con una longitud de trayectoria de AM1 la irradiancia es reducida aproximadamente a $1000 W/m^2$, y su contenido espectral fue modificado debido a la absorción atmosférica. La irradiancia para AM1.5 es la aceptada como el espectro de calibración estándar para las celdas fotovoltaicas.

Cuando hablamos de la cantidad de luz que ilumina una superficie, nos estamos refiriendo a la *Irradiancia*, denotada por I , la cual es la energía promedio por unidad de área por unidad de tiempo⁴.

La irradiancia es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico \vec{E} , dos formas alternativas de expresar lo mismo es simplemente

$$I = \frac{c}{\mu_0} \langle B_0 \rangle_T \quad (5)$$

$$I = \epsilon_0 c \langle E_0^2 \rangle_T \quad (6)$$

Ejemplo

A continuación se presentan los valores de los niveles de irradiancia obtenidos de las mediciones realizadas en Ciudad Universitaria⁵, Tegucigalpa M.D.C., Latitud: 14°05' Norte, Longitud: 87°14' Oeste.

³Meinel A.B & Meinel M.P., Applied solar energy, an introduction

⁴Hecht E. Optics 4th Edition, Section 3.3.2

⁵Kawas N., Determinación del potencial de generación de energía renovable en la U.N.A.H., Revista Ciencia y Tecnología Número 13, Diciembre 2013

¹Markvart T. Solar electricity 2nd Edition, Section 2.2.1

²Eisberg R.M. & Resnick R. Física cuántica. Átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas Sección 1.2

Mes	Irradiancia W/m^2
Enero	254.5
Febrero	364.3
Marzo	371.4
Abril	389.3
Mayo	302.0
Junio	368.8
Julio	355.7
Agosto	399.0
Septiembre	372.4
Octubre	316.2
Noviembre	260.2
Diciembre	281.2
Promedio	336.3

Irradiación es la medida de la densidad de energía de la luz solar y se mide en kWh/m^2 . La irradiación es la integral de la irradiancia. Normalmente el marco de tiempo para integración es un día, de hecho, se mide durante las horas de luz diaria. Se expresa comunmente como *peak sun hours* (*psh*). El psh es simplemente la longitud de tiempo en horas de un nivel de irradiancia de $1 kW/m^2$ necesario al producir la irradiación diaria obtenida en la integración de la irradiancia sobre todas las horas de luz diaria.

Desde el punto de vista ondulatorio, la intensidad de la radiación I es proporcional a $\overline{E^2}$, donde $\overline{E^2}$ es el promedio de la intensidad del campo eléctrico de la onda. (I es el valor promedio del *vector de Poynting* y \vec{E} es el campo eléctrico).

Desde el punto de vista corpuscular o de los fotones, la intensidad de la radiación se escribe como $I = Nh\nu$ donde N es el número promedio de fotones que cruzan una unidad de área perpendicular a la dirección de propagación por unidad de tiempo. Fue *Einstein* quien sugirió que $\overline{E^2}$, el cual en la teoría electromagnética es proporcional a la energía radiante en una unidad de volumen, podría interpretarse como una medida del número promedio de fotones por unidad de volumen.

Al determinar la cantidad de irradiación disponible en un lugar y tiempo dado para la conversión a electricidad, lo cual es de utilidad al desarrollar expresiones para la irradiancia sobre superficies, dependiendo del ángulo entre la superficie y el haz incidente. Esto es además interesante al ser capaz de determinar el número de horas de luz solar en un día y locación dada.

Ondas Electromagnéticas

La radiación electromagnética es una vibración transversal con el vector de campo eléctrico \vec{E} perpendicular a la dirección de propagación.

Las ondas pueden también clasificarse como uni, bi o tridimensionales, de acuerdo con el número de dimensiones en que propaguen la energía.

La analogía tridimensional, en la cual las perturbaciones viajan en una sola dirección es la onda plana. En un instante dado, las condiciones son las mismas en todas partes de cualquier plano perpendicular a la dirección de propagación⁶.

Una onda electromagnética (nos referiremos a ellas en este caso como luz, además pueden ser rayos-X, luz ultravioleta, microondas, etc; las cuales difieren solo en la frecuencia) consiste de campos eléctricos \vec{E} y campos magnéticos \vec{B} oscilando transversalmente y mutuamente perpendiculares. Un átomo en presencia de luz, responde primero a la componente eléctrica, entonces el átomo es expuesto a un campo eléctrico oscilando

$$\vec{E} = E_0 \cos(\omega t) \hat{k} \quad (7)$$

Donde E_0 representa la amplitud del campo eléctrico, ω la frecuencia de la onda, t el tiempo y \hat{k} el vector de propagación⁷.

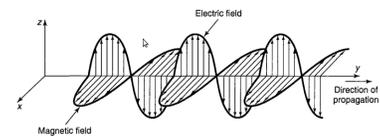


Figure 2: Una onda electromagnética. (Imagen de dominio público)

Movimiento de la Tierra⁸

La Tierra gira alrededor del sol una vez por año en una órbita elíptica (en uno de sus focos), la distancia del Sol a la Tierra está dada por

$$d = 1.5 \times 10^{11} \left\{ 1 + 0.017 \sin \left[\frac{360(n - 93)}{365} \right] \right\} \quad (8)$$

donde n representa el día del año con Enero 1 como día 1.

La Tierra además rota alrededor de su propio eje polar una vez por día. El cual está inclinado un ángulo de 23.45° con respecto al plano de la órbita terrestre alrededor del Sol.

El ángulo de desviación del Sol directamente arriba del ecuador se llama la **declinación** δ . Si los ángulos al norte del ecuador son considerados positivos, y los ángulos al sur son considerados negativos, entonces en algún día dado del año n , la declinación puede ser encontrada de

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[\frac{360(n - 80)}{365} \right] \quad (9)$$

El **cenit** es una línea perpendicular a la Tierra (i.e. hacia arriba). El **ángulo cenit** θ_c es definido

⁶Resnick-Halldiday-Krane Física 3ra Edición, Sección 19.2

⁷Griffiths D.J. Introduction to quantum mechanics 2nd Edition, Section 9.2.1

⁸Markvart T. Solar electricity 2nd Edition Section 2.2.2

como el ángulo entre el Sol y el cenit. La declinación puede ser relacionada al ángulo cenit en el mediodía solar señalando que el Sol está en su punto más alto en el cielo.

El Sol está directamente encima de la cabeza en el primer día de verano, se hace evidente que

$$\theta_c = \phi - \delta \quad (10)$$

donde ϕ representa la latitud (o distancia angular del ecuador), cuando la latitud y declinación son iguales, el ángulo cenit es cero.

La ecuación es útil al determinar el punto más alto alcanzado en el cielo por el Sol, en algún día del año en una latitud particular.

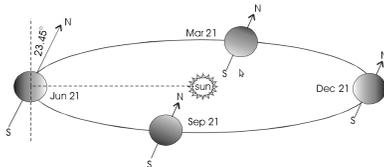


Figure 3: La órbita de la Tierra y la declinación en diferentes meses del año. (Imagen de dominio público)

La relación entre θ_c , ϕ , δ se ilustra en la figura 4.

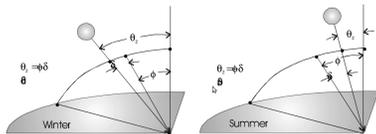


Figure 4: Relación entre θ_c , ϕ , δ y el mediodía solar en invierno y en verano. (Imagen de dominio público)

Al especificar completamente la posición del Sol es necesario especificar tres coordenadas. Asumiendo que la distancia del Sol a la Tierra es constante, puede especificarse usando solamente dos coordenadas. Las opciones comunes son la altitud solar y el acimut. El complemento del ángulo cenit θ_c es llamado la altitud solar α , y representa el ángulo entre el horizonte y el rayo solar incidente en un plano determinado por el cenit y el Sol, como se muestra en la figura 4. Ya se ha señalado que la masa de aire es proporcional a $\sec \theta_c$. Por lo tanto

$$AM = AM(90^\circ) \csc \alpha \quad (11)$$

La desviación angular del Sol directamente al sur puede ser descrita por el **ángulo acimut** ψ , que mide la posición angular al este del Sol o al oeste del sur.

El ángulo acimut es cero en el mediodía solar y se incrementa hacia el este. Éste es el ángulo entre la intersección del plano vertical determinado por el Sol y el observador, con la línea horizontal directamente al sur del observador.

Otro ángulo útil en la descripción de la posición del Sol es el desplazamiento angular del Sol en el mediodía solar en el plano del aparente recorrido del Sol. El ángulo horario es la diferencia entre el mediodía solar y la hora deseada del día, en términos de una rotación de 360° en 24 horas. En otras palabras,

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{12 - T}{24} \times 360^\circ \\ &= 15(12 - T)^\circ \end{aligned} \quad (12)$$

donde T es la hora del día expresada con respecto a la medianoche solar en un reloj de 24 horas. Si se relaciona ω a otros ángulos ya enunciados, es posible mostrar que el ángulo de la salida del Sol está dado por $\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta)$.

El cual implica que el ángulo de la puesta del Sol viene dado por $-\omega_s$.

Esta fórmula es útil, ya que permite determinar el número de horas en un día y latitud específica en que el Sol está sobre el horizonte. Obteniendo el número de horas de luz del día

$$\begin{aligned} HLD &= \frac{48}{360} \times \omega_s \\ &= \frac{\cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta)}{7.5} \end{aligned} \quad (13)$$

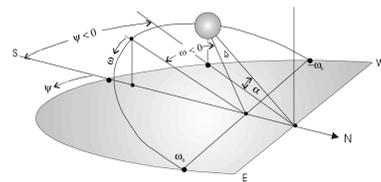


Figure 5: Ángulos del Sol, mostrando altitud, ángulo acimut y ángulo horario. (Imagen de dominio público)

Si δ , ϕ , ω con conocidas, entonces la posición del Sol en terminos de α y ψ en está locación, fecha y hora; puede ser determinada de

$$\sin \alpha = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (14)$$

$$\cos \psi = \frac{\sin \alpha \sin \phi - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \phi} \quad (15)$$

Absorción Óptica

La absorción óptica es la responsable de la generación del par *electrón-hueco*.

Cuando la luz incide sobre un material, puede ser reflejada, transmitida o absorbida. La absorción de la luz es simplemente la conversión de la energía contenida en el fotón incidente en alguna otra forma de energía. Algunos materiales tienen las propiedades necesarias para convertir la energía de los fotones incidentes en energía eléctrica.

Cuando un fotón es absorbido, este interactúa con un átomo del material absorbente entregando

su energía a un electrón del mismo. Esta energía transferida es gobernada por las reglas de conservación del momento y de conservación de la energía. El fotón de masa invariante cero tiene un momento muy pequeño en comparación al momento de los electrones y huecos. Dependiendo de la energía del fotón, un electrón puede ser elevado a un estado de alta energía dentro de un átomo, o este puede ser liberado desde el átomo. Los electrones liberados son entonces capaces de moverse a través del cristal de acuerdo con los fenómenos que pueden estar presentes y causar que el electrón se mueva, tales como la temperatura, la difusión o un campo eléctrico.

Los fotones que no son absorbidos no se pueden utilizar para crear energía útil (en el medio son reflejados o transmitidos). Solo de la cantidad de energía absorbida se puede transformar energía útil, el objetivo es aprovechar al máximo esta fracción. Las longitudes de onda de fotones visibles están en los cientos de nanómetros (nm) (espectro solar pico $\sim 550 nm$). A bajas energías (eV) típicos para luz visible, los fotones interactúan principalmente con los electrones de valencia.

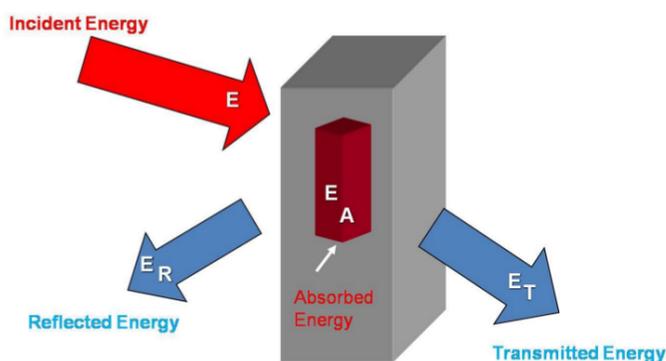


Figure 6: Absorción de la luz en celdas solares. (Imagen de dominio público)

Derivación de la Ley de Beer-Lambert

Se puede decir que esta ley se trata de un medio o método matemático, el cual es utilizado para expresar de que modo la materia absorbe la luz

$$\begin{aligned} \frac{dI_z}{I_z} &= -\sigma N dz \\ \ln(I_z) &= -(\sigma N z) + C \\ \ln(I_0) - \ln(I_l) &= -(\sigma N \cdot 0) + C + (\sigma N \cdot l) + C \\ &= \sigma N l \\ I &= I_0 e^{-\sigma N l} \\ &= I_0 e^{-\alpha l} \end{aligned}$$

en donde α es una función de la longitud de onda de la luz y propiedad del medio.

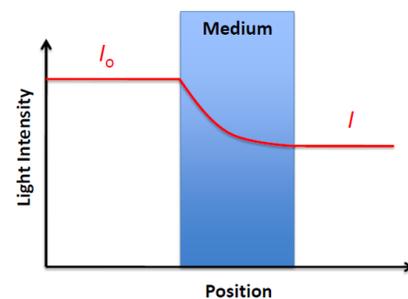


Figure 7: Transmisión de fotones a través de un medio. (Imagen de dominio público)

El Efecto Fotoeléctrico

Se denomina **efecto fotoeléctrico** a la emisión de electrones desde una superficie por la acción de la luz. En este proceso los fotones son absorbidos completamente.

Max Planck pensaba que la energía electromagnética una vez radiada se esparcía en el espacio de la misma manera que las ondas de agua se esparcen en ella. En vez de esto, *Einstein* propuso que la energía radiante estaba cuantizada en paquetes concentrados a los cuales posteriormente se les llamo **fotones**⁹.

La palabra *fotón* realmente pertenece a la electrodinámica cuántica (QED, por sus siglas en inglés), la cual es la teoría cuántica del campo electromagnético.

El descubrimiento inesperado del efecto fotoeléctrico realizado por *Hertz* lo molestó porque interfirió con su investigación primaria, pero reconoció su importancia inmediata e interrumpió su otro trabajo durante seis meses con el fin de estudiarlo en detalle. Sus resultados, publicados ese mismo año, fueron luego extendidos por otros físicos. Se encontró que un tipo de partículas negativas son emitidas desde una superficie limpia cuando se expone a la luz, las partículas emitidas eran electrones.

Solo los electrones con energía cinética $\frac{1}{2}mv^2$ mayores que eV_0 pueden escapar del material. Donde e es la carga del electrón, y V_0 se llama **potencial de frenamiento** y está relacionado con la energía cinética máxima de los electrones emitidos por

$$\left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{\text{máx}} = K_{\text{máx}} = eV_0 \quad (16)$$

El resultado experimental en el cual se verificó que V_0 es independiente de la intensidad de la luz fue sorprendente. Aparentemente, el aumento de la tasa de energía que cae en el material no aumenta la energía cinética máxima de los electrones emitidos, contrariamente a las expectativas clásicas. En 1905, *Einstein* ofreció una explicación de este resultado en un notable artículo en el mismo volumen de

⁹Eisberg R.M. & Resnick R. Física cuántica. Átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas, Sección 2.2

Annalen der Physik que contenía su trabajos sobre la relatividad especial y el movimiento browniano.

Einstein considero que la cuantización de la energía utilizada por *Planck* en la solución de la radiación del cuerpo negro era de hecho, una característica universal de la luz, la cual está distribuida de manera uniforme en el espacio a través del cual se propaga, además propuso que la energía radiante consistía de cuantos discretos, cada uno de energía

$$E = hv \quad (17)$$

Cuando uno de estos cuantos, llamado fotón, penetra en la superficie del material, donde hv es la energía del fotón incidente absorbido, toda su energía puede ser absorbida completamente por un solo electrón. Donde w es el trabajo necesario para arrancar un electrón de la superficie. La energía cinética máxima de un electrón que deja la superficie será $hv - \phi$ como consecuencia de la conservación de la energía, donde ϕ es la energía mínima característica del material denominada **función trabajo**, la cual es simplemente la diferencia entre el nivel de *Fermi* y el nivel de vacío.

$$\begin{aligned} K_{\text{máx}} &= hv - w \\ &= hv - \phi \end{aligned} \quad (18)$$

La ecuación (18) se conoce como la *ecuación del efecto fotoeléctrico*.

Como puede verse a partir de la ecuación (18), la pendiente de V_0 en función de v debe ser igual a $\frac{h}{e}$. En el momento de esta predicción no había pruebas de que la constante de Planck tenía algo que ver con el efecto fotoeléctrico. Tampoco había evidencia de la dependencia del potencial de frenamiento V_0 con la frecuencia v .

Existe completa concordancia entre la teoría del fotón y el experimento, puesto que duplicando la intensidad de la luz simplemente se duplicó el número de fotones y por ende la corriente fotoeléctrica; lo cual no cambia la energía hv de los fotones individuales o la naturaleza del proceso fotoeléctrico. Si $K_{\text{máx}} = 0$ se tiene que $hv_0 = \phi$ lo cual asevera que un fotón de frecuencia de corte característica v_0 tiene la energía suficiente para extraer los fotoelectrones y nada extra que aparezca como energía cinética.

Volviendo a escribir la ecuación de *Einstein* del efecto fotoeléctrico se tiene que

$$\begin{aligned} K_{\text{máx}} &= hv - \phi \\ eV_0 &= hv - \phi \\ V_0 &= \frac{hv}{e} - \frac{\phi}{e} \end{aligned} \quad (19)$$

Por lo tanto la teoría de Einstein para el efecto fotoeléctrico predice una relación lineal entre el potencial de frenamiento V_0 y la frecuencia v .

Materiales Semiconductores

Los semiconductores son sólidos covalentes que pueden ser considerados como aislantes, puesto que su banda de valencia se encuentra completamente llena y la banda de conducción completamente vacía a la temperatura de cero absoluto. Sin embargo poseen un intervalo de energías prohibidas entre las bandas de conducción y de valencia de no más aproximadamente $2eV$. Para el silicio(Si) el intervalo de energías prohibidas es de $1.14eV$.

A una impureza que cede electrones se le llama impureza donante, y el semiconductor resultante es llamado tipo n (negativo) ya que posee un exceso de electrones libres.

Una impureza deficiente en electrones se denomina aceptante y el semiconductor resultante se le llama tipo p (positivo).

A la frontera entre estas dos regiones se le denomina *unión p-n*¹⁰.

La banda de valencia representa las energías permitidas de los electrones de valencia que son unidos a los átomos. La banda de conducción representa las energías permitidas de los electrones que han recibido la energía de algún tipo de mecanismo y ahora ya no están unidos a átomos específicos.

En $T = 0^\circ\text{K}$, todos los estados de energía permitidos en la banda de valencia de un semiconductor están ocupados por electrones, y no hay estados de energía permitidos en la banda de conducción. Dado que el proceso de conducción requiere que los portadores de carga pasen de un estado a otro dentro de una banda de energía, la no conducción puede tomar lugar cuando todos los estados están ocupados o cuando todos los estados están vacíos, lo cual se ilustra en la figura 8.

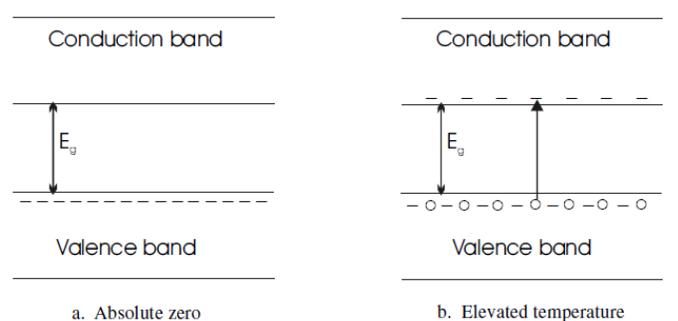


Figure 8: Estados de la banda de valencia y la banda de conducción en un material semiconductor. (Imagen de dominio público)

A medida que aumenta la temperatura en el semiconductor, una cantidad suficiente de energía es impartida a una pequeña fracción de los electrones en la banda de valencia para luego pasar a la banda de conducción. Cuando un electrón deja la banda de valencia, deja un hueco para que ahora puede ser ocupado por otro electrón, siempre que

¹⁰Eisberg R.M. & Resnick R. Física cuántica. Átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas Sección 13.8

el otro electrón se mueva hacia él. Si esto sucede, el electrón que se mueve de la banda de valencia a la banda de conducción, deja tras de sí un hueco. Si uno se dedica a una elegante explicación mecánico cuántica de este fenómeno, se debe concluir que el electrón que se mueve en la banda de valencia debe tener ya sea una masa efectiva negativa junto con su carga negativa, o, alternativamente, una masa efectiva positiva y una carga positiva. Este último ha sido la descripción popular, y, como resultado, el movimiento de los electrones en la banda de valencia se llama movimiento agujero, donde los **agujeros** o **huecos** es el nombre elegido para las cargas positivas, ya que se relacionan con los agujeros en movimiento que los electrones han dejado en la banda de valencia.

Algunos materiales semiconductores se clasifican como materiales de banda prohibida directa, mientras que otros se clasifican como materiales de banda prohibida indirecta. La figura 9 muestra la banda de energía prohibida para el silicio con respecto al momento y la energía. Se debe considerar que para el silicio, la parte inferior de la banda de conducción se desplaza en la dirección momento desde el pico de la banda de valencia, la cual es una banda prohibida indirecta. Lo que este diagrama muestra es que las energías permitidas de una partícula en la banda de valencia o la banda de conducción dependen del movimiento de la partícula en estas bandas. Una transición de electrones desde un punto en la banda de valencia a un punto en la banda de conducción debe involucrar a la conservación del momento. Así como la energía para el silicio, a pesar de que la separación de la parte inferior de la banda de conducción y la parte superior de la banda de valencia es 1.1eV , es difícil para un fotón de 1.1eV excitar un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción, debido a la transición tiene que ser acompañado con impulso suficiente para causar el desplazamiento.

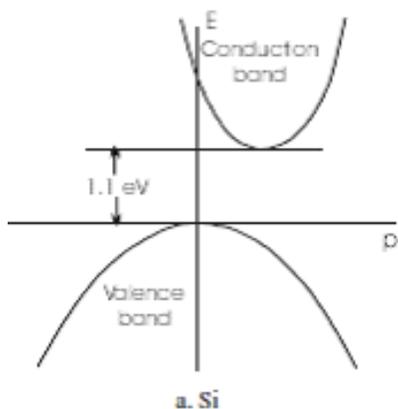


Figure 9: Diagrama de la energía y el momento de las bandas de valencia y conducción en silicio. (Imagen de dominio público)

La Unión p-n

Cuando las partículas cargadas se colocan en un campo eléctrico, están expuestas a una fuerza electrostática. Esta fuerza acelera las partículas hasta que se someten a una colisión con otro componente del material que las desacelera. Entonces aceleran una vez más y chocan de nuevo. El proceso continúa, con el resultado de la carga neta del portador de lograr una velocidad media, ya sea en la dirección del campo eléctrico para cargas positivas, o en dirección opuesta al campo eléctrico para cargas negativas.

Cabe señalar que este promedio, o velocidad de deriva, se superpone a la velocidad térmica de los portadores de carga. Normalmente, la velocidad térmica es mucho mayor que la velocidad de arrastre, pero la velocidad térmica es completamente al azar por lo que el desplazamiento neto de los portadores de carga es cero. Otra forma de considerar la velocidad térmica es que en cualquier instante, es igualmente probable que una partícula se mueva en cualquier dirección.

Corriente de deriva, no es más que el componente de flujo de corriente debido a la presencia de un campo eléctrico, y es descrito por la ecuación familiar,

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (20)$$

Esto es simplemente la forma vectorial de la ley de Ohm¹¹, donde \vec{J} es la densidad de corriente en A/cm^2 cuando σ se expresa en $\Omega^{-1}cm^{-1}$ y \vec{E} se mide en V/cm .

La *difusión* es el proceso conocido por el cual el movimiento térmico aleatorio de las partículas hace que se distribuyan a sí mismos de manera uniforme dentro de un espacio. Siempre que las partículas están en movimiento térmico, tienden a moverse de áreas de mayor concentración a áreas de menor concentración, simplemente porque en cualquier punto, la probabilidad de movimiento en todas las direcciones es igual.

Si las partículas son agujeros, este movimiento neto de las regiones de mayor concentración a regiones de menor concentración constituye un flujo de corriente que puede ser descrito en una dimensión por la ecuación

$$\vec{J}_p = -qD_p \frac{dp}{dx} \quad (21)$$

Mientras que si las partículas son electrones viene dada por la ecuación

$$\vec{J}_n = -qD_n \frac{dn}{dx} \quad (22)$$

En (21) y (22) el cambio en la concentración con la posición se conoce como el gradiente de concen-

¹¹Pérez G., Tabla de fórmulas matemáticas y electromagnéticas 3ra. Edición

tracción, D_p y D_n son la constante de difusión agujero y la constante de difusión de electrones, respectivamente. El signo menos en (21) explica el hecho de que si el gradiente es negativo, el flujo de agujeros es en la dirección x positiva. La falta de el signo menos en (22) representa el hecho de que si el flujo de electrones es en la dirección x positiva, la corriente asociada está en la dirección x negativa. En cada caso, $q = 1,6 \times 10^{-19} C$ es la carga elemental.

Generación de Par Electrón-Hueco(EHP) por Absorción de Fotones

La energía de un fotón esta dada por la ecuación

$$\begin{aligned} E &= h\nu \\ &= \frac{hc}{\lambda} \end{aligned} \quad (23)$$

medida en *joules*, donde h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz ($c = 2.998 \times 10^8$ m/s), ν es la frecuencia del fotón en *Hz*, y λ es la longitud de onda del fotón en metros.

Las energías en el nivel atómico son típicamente expresadas en *electrón voltios* $1eV = 1.6 \times 10^{-19} J$ y las longitudes de onda se expresan en micrometros (μm), es posible al expresar hc en unidades apropiadas, entonces puede ser expresada en *eV*, la conversión proporciona

$$E = \frac{1.24}{\lambda} \quad (24)$$

La energía de un fotón debe ser superior a la energía de banda prohibida E_g del semiconductor para ser absorbido. Los fotones con energías en y justo por encima de E_g se absorben más fácilmente porque coinciden más estrechamente con la energía de banda prohibida. Si un fotón tiene una energía mayor que el intervalo de banda, todavía puede producir sólo un único EHP. El resto de la energía del fotón se pierde a la celda en forma de calor. Por tanto, es deseable que el semiconductor que se utiliza para la fotoabsorción tenga una energía de banda prohibida de tal manera que un porcentaje máximo del espectro solar sea absorbido eficientemente.

La naturaleza de la banda prohibida también afecta a la eficacia de la absorción en un material. Una representación más completa de bandas prohibidas de semiconductores debería de mostrar la relación entre la energía de banda prohibida, así como el impulso de banda prohibida. Cuando los electrones hacen las transiciones entre la banda de conducción y la banda de valencia, la transferencia de energía y de momento se realizarán normalmente, y ambos deben hacerse de manera armónica conforme a las leyes de conservación de la energía y la conservación de momento.

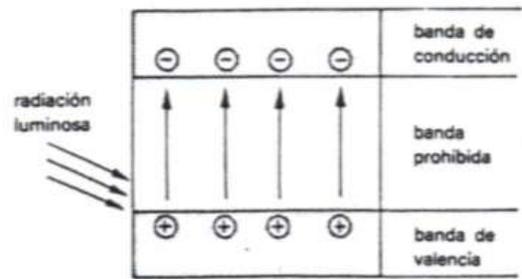


Figure 10: Generación de par electrón-hueco.(Imagen de dominio público)

El proceso de absorción es similar a muchos otros procesos físicos, en los cuales la variación en la intensidad con respecto a la posición es proporcional a la intensidad inicial. Como en la ecuación

$$\frac{dI}{dx} = -\alpha I \quad (25)$$

teniendo como solución $I = I_0 e^{-\alpha x}$

Donde I es la intensidad de la luz en un espesor x en el material, I_0 es la intensidad en la superficie, y α es la constante de absorción, la cual depende del material y de la longitud de onda.

La Celda Fotovoltaica

Es muy importante el recordar que cuando una celda es iluminada, generalmente solo convierte 20% de irradiancia en electricidad.

Cuando la celda es iluminada, los pares electrón-hueco son producidos por la interacción de los fotones incidentes con los átomos de la celda. El campo eléctrico creado por la unión de células hace que los pares electrón-hueco se separen, con los electrones a la deriva en la región n , y lo huecos a la deriva en la región p .

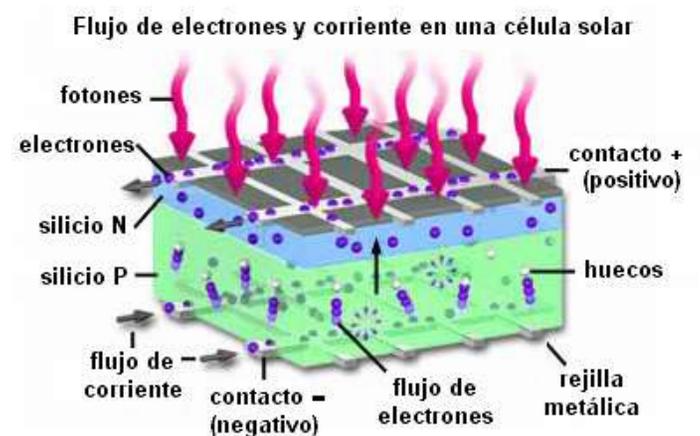


Figure 11: Flujo de electrones y corriente en una celda fotovoltaica.(Imagen de dominio público)

La figura 12 muestra las características $I - V$ de una celda fotovoltaica. Notar que las cantidades de corriente y de voltaje disponibles en la celda dependen sobre el nivel de irradiancia. En el caso

ideal la ecuación característica $I-V$ es

$$I = I_l - I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (26)$$

donde I_l es la componente de la corriente en la celda debido a los fotones, $q = 1.6 \times 10^{-19} C$, T es la temperatura de la celda en $^{\circ}K$.

Cuando las características $I-V$ de la celda fotovoltaica difieren algo de la versión ideal, la ecuación (26) proporciona una manera de determinar los límites de rendimiento ideal de las celdas fotovoltaicas.

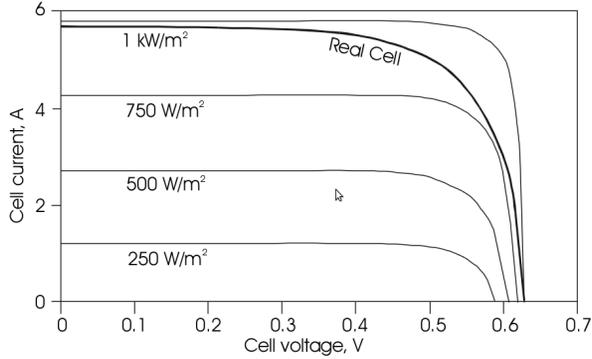


Figure 12: Características $I-V$ real e ideal de las celdas fotovoltaicas bajo diferentes niveles de irradiancia. (Imagen de dominio público)

La figura 12 muestra que la celda fotovoltaica tiene tanto un voltaje como una corriente limitada. Al determinar la corriente de cortocircuito de una celda fotovoltaica simplemente colocamos $V = 0$ en el exponente. Esto lleva a que $I_{CC} = I_l$. Como una muy buena aproximación, la corriente en la celda es directamente proporcional a la irradiancia en la celda. Así, si la corriente en la celda es conocida por debajo de las condiciones de la prueba estandar $G_0 = 1kW/m^2$ en AM1.5, entonces la corriente en la celda en cualquier otro nivel de irradiancia viene dado por

$$I_l(G) = \left(\frac{G}{G_0} \right) I_l(G_0) \quad (27)$$

Al determinar el voltaje de circuito abierto de la celda, la corriente en la celda es igualada a cero, y resolviendo la ecuación (26) para V_{CA} obtenemos como resultado

$$\begin{aligned} V_{CA} &= \frac{kT}{q} \ln \frac{I_l - I_0}{I_0} \\ &= \frac{kT}{q} \ln \frac{I_l}{I_0} \end{aligned} \quad (28)$$

además normalmente $I_l \gg I_0$.

Multiplicando la corriente de la celda por el voltaje de la celda se obtiene la potencia de la celda. Refiriendonos a la figura 13, debemos tener en cuenta que hay un punto en la curva característica $I-V$ donde la celda produce la potencia máxima. Además hay que considerar que la tensión a la que se produce la potencia máxima depende del

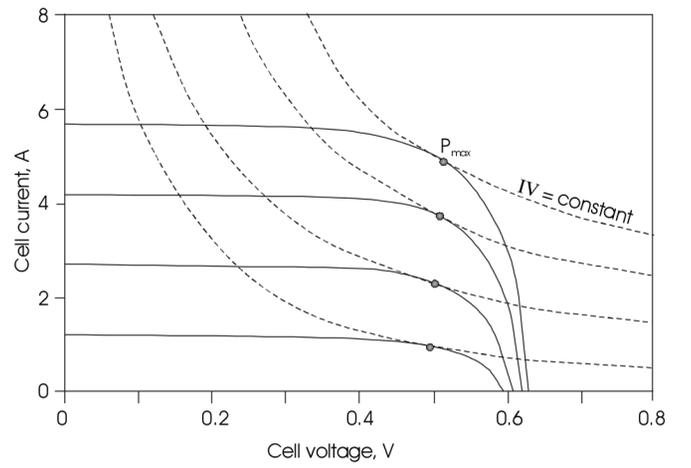


Figure 13: Determinación del punto de potencia máxima en el funcionamiento de celdas fotovoltaicas (Imagen de dominio público)

nivel de irradiancia que recibe la celda. El punto de potencia máxima se puede conseguir mediante el trazado de un conjunto de hipérbolas definidos como la curva $IV=constante$, y tomando nota de la potencia asociada con la hipérbola que es tangente a la curva de la celda $I-V$ en un solo punto. El punto de potencia máxima también se puede determinar mediante la diferenciación de la ecuación de energía de la celda y estableciendo el resultado igual a cero. Después de encontrar el voltaje para el cual se satisface esta condición, y la comprobación para verificar que esta tensión representa un máximo, se conoce el punto de potencia máxima.

Si I_m representa la corriente en la celda en su potencia máxima, y V_m representa el voltaje en la celda en su potencia máxima, entonces la potencia máxima de la celda puede ser expresada como

$$\begin{aligned} P_{\text{máx}} &= I_m V_m \\ &= FF \cdot I_{CC} V_{CA} \end{aligned} \quad (29)$$

donde FF es definido como **fill factor** (**factor de llenado**) de la celda.

El cual da una medida de la eficiencia de la celda. Usualmente las celdas con resistencias internas grandes tienen un FF pequeño, mientras la celda ideal debe tener un $FF = 1$.

Tipicamente el factor de llenado para celdas fotovoltaicas reales dependen de la tecnología, suele oscilar de 0.5 a 0.82

Bibliografía

1. Becquerel E. *Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires*
2. Hu C.-White R.M. *Solar cells, from basics to advanced systems*, McGraw Hill 1983
3. Markvart T. *Solar electricity* 2nd Edition, John Wiley & Sons 2000
4. Meinel A.B.& Meinel M.P. *Applied solar energy, an introduction*, Addison-Wesley 1976
5. Würfel P. *Physics of solar cells. From principles to new concepts*, Wiley-VCH Verlag 2005

Sitios Web Relacionados

1. Department of Energy, www.energy.gov
2. National Renewable Energy Laboratory, www.nrel.gov
3. Sandia National Laboratories, www.sandia.gov
4. PVEducation, www.pveducation.org/pvedrom

Cursos Recomendados

1. Carrera de Física, U.N.A.H., *Electricidad y Magnetismo I-II*, FS321-FS415
2. Carrera de Física, U.N.A.H., *Óptica* FS425
3. Carrera de Física, U.N.A.H., *Física Moderna* FS371
4. Carrera de Física, U.N.A.H., *Física del Estado Sólido* FS517
5. Carrera de Física, U.N.A.H., *Teoría Electromagnética* FS635