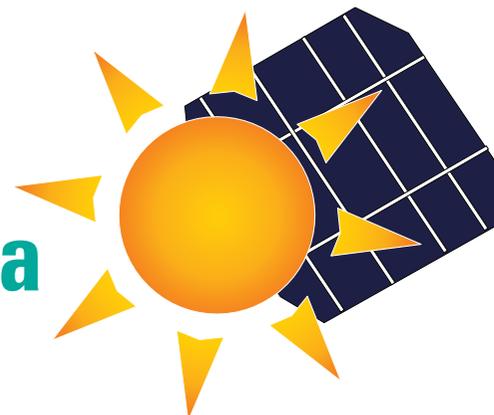


Karen Rodríguez Rosales, Francisco Javier de Moure Flores y José Guadalupe Quiñones Galván

Energía solar fotovoltaica



En este artículo se presentarán los conceptos más importantes en el tema de los materiales semiconductores, el efecto fotovoltaico y el uso de celdas solares para la conversión de energía solar a eléctrica. Asimismo, se hablará acerca del estado actual de la tecnología fotovoltaica y de las posibles alternativas para el crecimiento y desarrollo de materiales y dispositivos solares más eficientes.

Introducción

La dependencia de la tecnología, la mejora en la calidad de vida de los países desarrollados y el continuo crecimiento de la población han dado lugar al aumento de la demanda energética. En la actualidad los combustibles fósiles son la base de la producción de energía, lo cual significa que el desarrollo depende de un recurso no renovable y en vías de agotarse. Adicionalmente, quemar combustibles fósiles está causando una serie de problemas ambientales, como el cambio climático, la contaminación del aire y la lluvia ácida. Según el acuerdo de la COP21 (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, 2015), el calentamiento global debe mantenerse por debajo de 2 °C mediante la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Para tener una política de desarrollo sustentable es indispensable que la mayoría de los recursos, particularmente los energéticos, sean del tipo renovable. Estas fuentes de energía, administradas de forma adecuada, pueden explotarse ilimitadamente; es decir, la cantidad disponible no disminuye a medida que se aprovecha el recurso. Entre las llamadas fuentes energéticas renovables se encuentran la energía solar, la eólica, la mareomotriz, la geotérmica, entre otras (Estrada y Arancibia, 2010). Sin duda, la energía solar es la más importante y abundante de las fuentes renovables (Tonda, 2003); por ejemplo, la energía solar que llega a la Tierra en un año es equivalente a 20 veces la energía almacenada en todas las reservas de combustibles fósiles en el mundo y supera 10,000 veces el consumo actual (Gurevich y Meléndez, 2010). El Sol es capaz de producir diariamente hasta 1,000 kWh por



cada metro cuadrado de la Tierra; si se cubriera 1% de la superficie del desierto del Sahara con paneles solares, se podría generar la energía suficiente para abastecer a la población mundial. Para darnos una mejor idea del gran potencial que tiene la energía solar, pensemos en que una casa habitación normal consume en promedio 5 kWh al día, y cada kWh tiene un costo aproximado de \$0.996, según la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

La energía solar se puede aprovechar de diversas maneras:

1. Producción de electricidad mediante sistemas fotovoltaicos para su empleo terrestre y en sistemas espaciales.
2. Sistemas solares térmicos que convierten la luz del Sol en energía térmica almacenable y fácil de distribuir.
3. Combustibles solares que permiten la conversión de la energía solar en combustibles fáciles de almacenar y transportar, mediante el uso de materiales fotocatalizadores y reactores especiales (Gurevich y Meléndez, 2010).

La forma más versátil y prometedora de convertir la energía solar es con el efecto fotovoltaico, mediante el uso de celdas solares que permiten la transformación directa de la luz solar en electricidad. Las celdas solares están formadas por semiconductores, los cuales son materiales que, en función de condiciones externas como la luz o la temperatura, presentan características peculiares que permiten su uso en diversas aplicaciones electrónicas, como la termoelectrica, la fotocatalisis y la fotovoltaica.

En este artículo presentamos un resumen de los conceptos más relevantes respecto a los materiales semiconductores, el efecto fotovoltaico y el uso de celdas solares para la conversión de energía solar a eléctrica. Indicaremos cuáles son los semiconductores más empleados en el sector fotovoltaico, además de los materiales emergentes más promisorios en esta área. Por último, mencionaremos las perspectivas para el estudio y desarrollo de semiconductores y dispositivos solares con mayor eficiencia de conversión.

■ **Efecto fotovoltaico y celdas solares**

El físico francés Alexander Bequerel descubrió en 1839 el efecto fotovoltaico, que puede definirse como el fenómeno en el cual al incidir luz (los fotones) sobre la superficie de un material semiconductor, éste liberará electrones que pueden generar una corriente eléctrica (véase la Figura 1).

Como se mencionó, el efecto fotovoltaico se basa en el uso de semiconductores. Estos materiales se caracterizan por presentar una conductividad eléctrica inferior a la de un conductor metálico (por ejemplo, la plata), pero superior a la de un aislante (por ejemplo, un plástico). No obstante, una de sus propiedades más importantes es que al ser iluminados mejoran su capacidad de conducción eléctrica. Esto se debe a que, al incidir la energía luminosa sobre un semiconductor, los electrones tienen una mayor capacidad para moverse y, por ende, generar una corriente eléctrica.

Sin embargo, para que ocurra el efecto fotovoltaico no es suficiente con liberar electrones, también es necesaria la presencia de un voltaje para que los electrones liberados puedan ser direccionados. Una de las formas más simples para conseguir lo anterior es uniendo dos semiconductores con características electrónicas diferentes. Uno de los semiconductores debe tener un exceso de electrones (denominado tipo *n*), mientras que el otro debe presentar una deficiencia de electrones (llamado tipo *p*). La unión de dichos semiconductores, *n* y *p*, forma una celda solar.

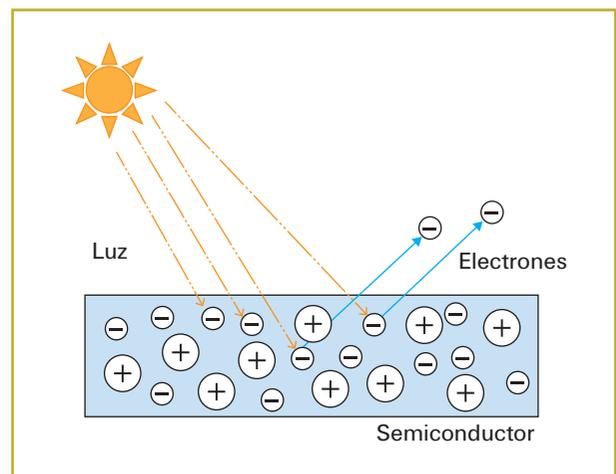


Figura 1. Esquema del efecto fotovoltaico.

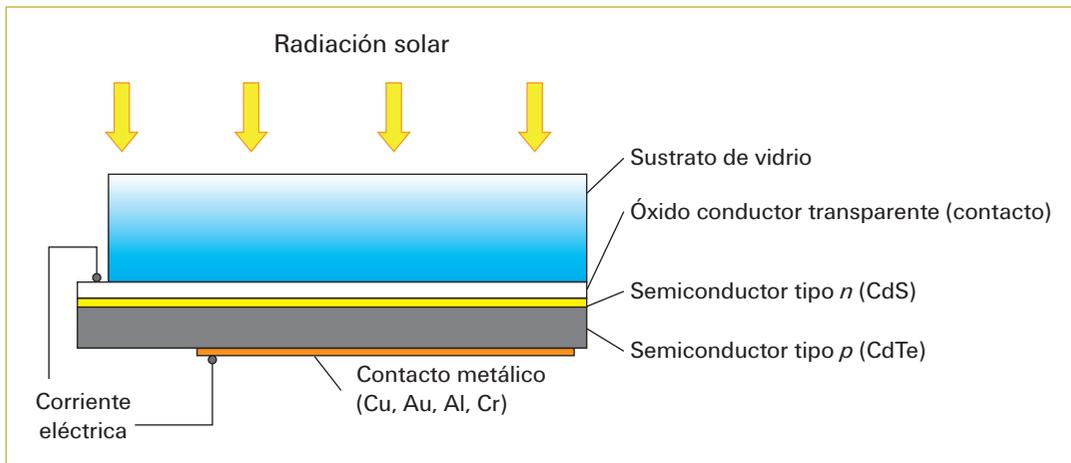


Figura 2. Estructura básica de una celda solar.

El efecto fotovoltaico constituye el principio de funcionamiento de las celdas solares, también llamadas celdas fotovoltaicas (véase la Figura 2). En dicha unión se crea un campo eléctrico que permite a los electrones, liberados por el efecto fotovoltaico, moverse hacia el contacto eléctrico; justo en este sitio el electrón es capturado para la generación de la corriente eléctrica en la celda solar.

A partir de la aplicación del efecto fotovoltaico en una celda de silicio, en 1954 comenzó su explotación para la obtención de electricidad y, por ende, se inició la investigación en este campo. Las celdas solares han ido cambiando a lo largo de los años; según los expertos, se pueden clasificar en cuatro generaciones principales:

1. Celdas fabricadas mediante la unión de dos láminas de silicio; una lámina debe ser tipo n y la otra, p . En su mayoría, las celdas solares actuales están hechas de silicio, ofrecen una buena **eficiencia** (entre 16 y 27%) y tienen precios razonables. Por lo general, son ensambladas en módulos grandes, lo que permite su instalación en los techos de edificios residenciales y comerciales.
2. Celdas solares de película delgada, hechas de finas capas del material semiconductor y aproximadamente 100 veces más delgadas que las celdas de primera generación; el espesor de las películas semiconductoras es de unos cuantos micrómetros (millonésimas de metro). Estas celdas están fa-

bricas con semiconductores como el sulfuro de cadmio (CdS), el telurio de cadmio (CdTe) o el diselenuro de cobre, indio y galio (CuIn(Ga)Se_2), con eficiencias cercanas a 23 por ciento. Suelen ser livianas y en ocasiones flexibles, lo que permite su fácil transporte. Además, sus métodos de fabricación requieren menos energía y ofrecen la posibilidad de obtener dispositivos de mayor área.

3. Celdas solares basadas en los grupos III-V de la tabla periódica de los elementos (II: galio e indio, V: arsénico y antimonio, por mencionar algunos ejemplos). Estas celdas se fabrican con métodos más costosos que los empleados en las generaciones anteriores; sin embargo, tienen una eficiencia de conversión más alta, de hasta 45%, por lo que frecuentemente se emplean en satélites y vehículos aéreos no tripulados.
4. Las celdas solares de próxima generación, debido a que engloban las más recientes investigaciones de nuevas –y prometedoras– tecnologías fotovoltaicas, están basadas en materiales orgánicos, puntos cuánticos y materiales híbridos orgánico-inorgánicos (conocidos como perovskitas). Estas celdas pueden tener costos menores y métodos de fabricación más sencillos, entre otros beneficios. Las eficiencias reportadas hasta el momento rondan 28 por ciento.

Eficiencia

Tasa de conversión de la luz solar en electricidad.

Sin importar la generación a la que pertenezca, la eficiencia de una celda fotovoltaica está íntimamen-



te relacionada con las propiedades de los materiales que la constituyen. Como ya se mencionó, existe una gran variedad de semiconductores que pueden emplearse en el procesamiento de dispositivos fotovoltaicos y, a su vez, son diversas las características que presentan, las cuales determinan su potencial para la conversión de energía solar a eléctrica.

■ **Semiconductores**

■ Los materiales semiconductores poseen diferentes propiedades, las cuales determinan la posibilidad de que sean empleados en diversas aplicaciones, entre las que destacan celdas fotovoltaicas, dispositivos electrónicos, sensores, láseres, etcétera. Estos materiales pueden clasificarse según sus propiedades, ya sean ópticas o eléctricas, así como por su estructura y composición. A continuación abordaremos las características más relevantes de un semiconductor aplicado en el sector fotovoltaico, específicamente en la fabricación de celdas solares de película delgada.

Las propiedades ópticas de un semiconductor están relacionadas de manera estrecha con sus propiedades eléctricas y electrónicas. Hablar de dichas propiedades implica también considerar la interacción entre un material y la radiación electromagnética (la luz). Por ejemplo, si una onda electromagnética choca contra un material, ésta podría ser reflejada

(como en un espejo), transmitida (cuando una fracción de la energía incidente “atraviesa” un material) o absorbida (cuando parte de la energía incidente se “queda” dentro del material). Dicho de manera más simple, una parte de la radiación será absorbida mientras que la otra será dispersada en cualquier dirección. Algunos semiconductores presentan mayor absorbanza que otros; por el contrario, otros tienen mayor transmitancia. Dichas propiedades son muy importantes en una celda solar. Recordemos que un dispositivo fotovoltaico está formado por la unión de dos semiconductores: uno de ellos debe dejar pasar la mayor cantidad de luz posible, mientras que el otro debe absorberla; de esta manera, se liberarán más electrones y, por ende, se generará una corriente eléctrica mayor.

Otra propiedad relevante en los semiconductores es su conductividad eléctrica, la cual es la capacidad que tiene un material de permitir el paso de la corriente eléctrica. Dicha capacidad depende directamente de la estructura atómica del material, así como de otros factores físicos, como la temperatura o el estado en que se encuentre la materia (sólido, líquido, gaseoso). Específicamente hablando de la materia en estado sólido, los semiconductores pueden ser cristalinos o amorfos. Los átomos de un material cristalino están acomodados de forma ordenada y constante, como piezas de Lego; en cambio, un material amorfo no presenta un acomodo de sus átomos, por lo que tiene características eléctricas que se consideran inferiores a las de un material cristalino. El ordenamiento en este último facilita que los electrones se muevan por caminos bien definidos, lo cual no sucede en los materiales amorfos.

La característica más importante de cualquier material semiconductor es su energía de ancho de banda prohibida (E_g), que es la cantidad mínima de energía que se requiere para liberar un electrón de su estado ligado (romper un enlace) y, por lo tanto, participar en la conducción de la electricidad. El valor de E_g también ayuda a determinar la capacidad que un semiconductor tiene para absorber o transmitir la radiación solar; a mayor valor de ancho de banda, mayor será la transmitancia óptica del material, mientras que a valores bajos de E_g , predominará



la absorbancia. Además, el ancho de banda prohibida, también conocido como *band gap*, establece la cantidad de energía que un semiconductor necesita del Sol para generar electricidad; por ello, la eficiencia de una celda solar depende fuertemente de esta propiedad.

Al momento de fabricar una celda fotovoltaica resulta primordial conocer las características de los materiales que la formarán; es necesario saber qué tan buena y alta es su conductividad, si es un material que absorbe o transmite la radiación solar, el grado de cristalinidad que presenta y, por último, cuál es el valor de su ancho de banda prohibida. De todos los semiconductores que se pueden emplear en la fabricación de dispositivos fotovoltaicos de segunda generación destacan el sulfuro de cadmio (CdS), el telurio de cadmio (CdTe) y el diselenuro de cobre, indio y galio (CuIn(Ga)Se₂), debido a sus excelentes propiedades ópticas, eléctricas y estructurales.

El sulfuro de cadmio es un semiconductor tipo *n* con un amplio valor de ancho de banda prohibida, lo cual le permite dejar pasar una gran cantidad de luz; por ello, se ha utilizado desde hace más de 40 años en la fabricación de celdas solares. Por otro lado, el telurio de cadmio y el diselenuro de cobre, indio y galio son semiconductores con conductividad tipo *p*, con anchos de banda prohibida pequeños, lo cual indica que son materiales con una alta capacidad de absorción. Ambos pueden unirse con el sulfuro de cadmio, lo que da como resultado celdas solares con las configuraciones CdS/CdTe y CdS/CuIn(Ga)Se₂, respectivamente. Las celdas fotovoltaicas basadas en telurio de cadmio y diselenuro de cobre, indio y galio son dos de los sistemas más prometedores, los cuales han alcanzado eficiencias récord de 22.1 y 23.4%, respectivamente (NREL, s. f.). Es importante mencionar que la eficiencia teórica máxima para una celda solar de película delgada es de 30 por ciento.

Existen otros semiconductores con características atractivas para las aplicaciones fotovoltaicas de segunda generación, como el selenuro de cadmio (CdSe), diselenuro de cobre y antimonio (CuSbSe₂), nitruro de galio (GaN), arsenuro de galio (GaAs), sulfuro de germanio (GeS), trióxido de molibdeno (MoO₃), dióxido de titanio (TiO₂), entre

otros. A pesar de la exhaustiva investigación en el desarrollo de nuevos materiales, lo que resulta fundamental hoy es aumentar la eficiencia mediante la combinación de diferentes materiales, así como reducir el costo y la complejidad para la fabricación de las celdas. Siendo así, los semiconductores en forma de películas delgadas son la alternativa perfecta para lograr un bajo empleo de materiales y tener procesos de producción menos costosos.

Son múltiples los métodos que existen para la elaboración de películas delgadas semiconductoras, y pueden clasificarse en métodos físicos y químicos. Los primeros son aquellos que necesitan llevarse a cabo en vacío (sin presencia de presión), lo cual se traduce a equipos de mayor costo. Por su parte, los métodos químicos son más económicos, debido a que no requieren del uso de bombas generadoras de vacío. Los métodos más convencionales son la evaporación al vacío, erosión catódica (*sputtering*), evaporación por haz de electrones y depósito de vapor químico; también están las técnicas de electrodeposición y la de baño químico. Es importante mencionar que el método empleado para la generación de una película delgada definirá muchas de sus características, como el espesor, la homogeneidad y su conductividad eléctrica.

Las particularidades mencionadas de los semiconductores y los métodos para su síntesis son de gran relevancia para el desarrollo y la fabricación de dispositivos solares eficientes. En México existen diversos centros de investigación e instituciones de educación superior enfocados en el estudio y desarrollo de materiales semiconductores, así como en el diseño de diferentes estructuras y configuraciones de celdas solares. Entre ellos se incluyen el Laboratorio de Materiales Avanzados de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro; el Centro de Investigación y Estudios Avanzados (Cinvestav) de la Unidad Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional; el Departamento de Física Avanzada de la Escuela Superior de Física y Matemáticas del Instituto Politécnico Nacional; el Departamento de Física del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad de Guadalajara, entre otros.



■ **Perspectivas**

El aprovechamiento de la energía solar mediante el empleo de semiconductores para su transformación a energía eléctrica es una excelente alternativa para disminuir el impacto de los gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera. Por ello, el desarrollo de celdas fotovoltaicas es un tema prioritario de investigación en todo el mundo. A pesar de que la tecnología y los métodos de fabricación de semiconductores y celdas solares han experimentado grandes e importantes avances en los últimos años, para que esta tecnología sea realmente viable y competitivamente económica aún se requiere un aumento en la eficiencia y una reducción global del costo de los módulos fotovoltaicos. Con el propósito de alcanzar estas dos metas, las líneas de investigación se han concentrado principalmente en dos grandes áreas:

1. La reducción del costo de las celdas, mediante el uso de materias y técnicas de fabricación sencillas y eficientes en cuanto al consumo energético, lo cual se traduce en bajos costos de producción.
2. El aumento en el rendimiento de las celdas, mediante el desarrollo y la optimización de las estructuras fotovoltaicas con alta eficiencia de conversión.

■ **Conclusiones**

Los semiconductores desempeñan una función importante en el cambio radical de las tecnologías clásicas a las renovables; además, tienen una multitud de aplicaciones en el campo de la electrónica y en el aprovechamiento de la energía solar, mediante su implementación en celdas solares. La investigación y el desarrollo de materiales semiconductores y dispositivos solares fotovoltaicos representa una gran área de oportunidad a nivel tanto nacional como internacional, por lo que resulta ser una alternativa atractiva para cubrir los requerimientos energéticos de la sociedad y, al mismo tiempo, aminorar los efectos del cambio climático. Sin embargo, para que la tecnología fotovoltaica sea costeable y competitiva, es fundamental reducir el costo y la complejidad en la síntesis de los materiales y en la fabricación de

los dispositivos fotovoltaicos. Otro aspecto primordial es elevar la eficiencia de las celdas, mediante el desarrollo y la optimización de semiconductores, a partir del diseño de estructuras fotovoltaicas con alta eficiencia de conversión. Lo anterior hace necesario seguir trabajando e investigando en el campo de los semiconductores para incluir nuevos materiales, métodos de desarrollo y fabricación de dispositivos.

Karen Rodríguez Rosales

Facultad de Química, Materiales-Energía, Universidad Autónoma de Querétaro.
karen.uaq@outlook.com

Francisco Javier de Moure Flores

Facultad de Química, Materiales-Energía, Universidad Autónoma de Querétaro.
fcomoure@hotmail.com

José Guadalupe Quiñones Galván

Departamento de Física, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara.
jose.quinones@academicos.udg.mx

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Querétaro por medio de los fondos FOFI-UAQ 2018 y FOPES-UAQ 2019, así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca de manutención de Karen Rodríguez para la realización de este trabajo.

Lecturas recomendadas

- Estrada, C. y A. Arancibia (2010), "Las energías renovables: la energía solar y sus aplicaciones", *Revista Digital Universitaria*.
- Gurevich, Y. y G. M. Meléndez (2010), *Fenómenos de contacto y sus aplicaciones en celdas solares*, México, Fondo de Cultura Económica.
- NREL (s. f.), *The National Renewable Energy Laboratory*. Disponible en <<https://www.nrel.gov/index.html>>, consultado el 5 de diciembre de 2019.
- Tonda, J. (2003), *El oro solar y otras fuentes de energía*, México, Fondo de Cultura Económica.