

Diseño óptimo y realización de celdas solares de silicio para producción industrial. Estado del arte de la investigación en México

A. Morales-Acevedo

CINVESTAV, IPN Departamento de Ingeniería Eléctrica

Avenida IPN No. 2508, 07360, México, D.F., Mex.

e-mail: amorales@gasparin.solar.cinvestav.mx

Recibido el 26 de febrero de 04; aceptado el 17 de mayo de 04

Mostramos aquí el trabajo que el autor y su grupo han desarrollado a lo largo de varios años para el diseño y realización de celdas solares de silicio con emisores selectivos factibles de fabricarse en ambientes industriales. La metodología de diseño de las celdas solares se basa en la solución de las ecuaciones de transporte de carga en dispositivos semiconductores, tomando en cuenta la variación de movilidades y tiempos de vida en regiones con impurificación no uniforme (perfil tipo Gaussiano como se obtiene a partir de procesos de difusión o de implantación iónica), y fenómenos tales como la recombinación Auger y la reducción de banda prohibida en silicio altamente impurificado. Igualmente, se desarrolló un programa de computadora para el diseño del enrejado colector de corriente, tomando en cuenta el flujo lateral de corriente en el emisor, así como las limitaciones debidas a la tecnología de fabricación de los dedos colectores de corriente. Además, se cuenta con un programa que permite optimizar el espesor de capas antirreflejantes múltiples, dado el índice de refracción respectivo, dependiendo del método de obtención de las mismas. También se describen los procesos que se requieren para hacer celdas solares de silicio, así como diversos experimentos que nos han permitido mejorar la eficiencia de conversión de este tipo de dispositivos. Por ejemplo, se han depositado capas de nitruro de silicio por la técnica de depósito en fase vapor ayudado por plasma (PECVD) a partir de SiH_4/NH_3 , y se han optimizado las condiciones de depósito para lograr la pasivación de estados de superficie en el emisor, al mismo tiempo que actúe como capa antirreflejante óptima. Igualmente, se muestra la realización de un nuevo proceso de aleación de aluminio en la parte posterior que causa un incremento de más del 20 % en la eficiencia de conversión respecto a celdas realizadas con técnicas convencionales, debido a efectos de *gettering* de impurezas metálicas. También se muestra el diseño y obtención de una doble capa antirreflejante óptima sobre celdas solares de silicio en base a $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$.

Descriptores: Cldas solares; silicio; energía fotovoltaica.

We present here the work that the author and his group have developed during several years for the design and fabrication of silicon solar cells with selective emitters with potential for industrial production. The solar cell design methodology is based on the solution of the carrier transport equations in semiconductor devices, taking into account the variation of mobility and lifetime in non-uniformly doped regions (Gaussian profiles as obtained from diffusion or ion implantation processes), and phenomena such as Auger recombination and bandgap shrinkage in highly doped silicon. A computer program was also developed for the design of the metal grid, taking into account the lateral flux of current in the emitter, and also the technological limitations for the fabrication of the grid fingers. In addition, another computer program was developed for optimizing the thickness of anti-reflection layers, given the index of refraction, in order to have a complete set of programs for the design of silicon solar cells. We describe the processes required for making the silicon solar cells, and several experiments that have allowed the improvement of the conversion efficiency of this kind of solar cells. For example, silicon nitride layers were deposited by Plasma Enhanced Vapor Deposition (PECVD) from SiH_4/NH_3 , and the deposition conditions were optimized for achieving surface state passivation at the emitter, and at the same time working as optimal anti-reflection layer. Similarly, a new process of aluminum alloying at the back of the cells was added to cell fabrication, leading to an increase in the efficiency by more than 20 % with respect to cells made by conventional processes, due to effects of metallic impurity *gettering*. Finally, the benefit due to an optimum double anti-reflection layer $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ is also shown.

Keywords: Solar cells; silicon; photovoltaic energy.

PACS: 84.60.Jt; 85.30.De; 89.30.Cc

1. Introducción

La energía generada por medio de la conversión fotovoltaica de la radiación solar ha encontrado una gran diversidad de aplicaciones, y tiene un gran potencial para sustituir —en el mediano plazo— a los combustibles fósiles como fuente de energía, de forma que no se contamine al medio ambiente. El crecimiento del mercado mundial, seguido del mercado en México, para los sistemas fotovoltaicos en aplicaciones tales como bombeo de agua, educación básica por televisión y radio-telefonía en zonas rurales, iluminación y sistemas de respaldo en casas habitación, etc. ha sido en promedio mayor

al 20 % anual en los últimos 10 años. Éste es un ritmo de crecimiento importante y mayor, incluso, que el observado para la industria microelectrónica.

Sin embargo, para mantener o incluso aumentar la velocidad de crecimiento de esta fuente de energía eléctrica limpia en el futuro, es fundamental la reducción de costos de fabricación de celdas solares y módulos fotovoltaicos. Este objetivo puede lograrse mejorando paulatinamente la relación eficiencia/costo de las celdas solares que constituyen los módulos fotovoltaicos, para lo cual existen diversas estrategias. Por ejemplo, la búsqueda de materiales alternativos que permitan fabricar celdas solares con eficiencias de conversión

comparables a las de silicio (mono y policristalino), que es el material más utilizado en la actualidad para celdas solares. Igualmente, se puede buscar la reducción de los costos de producción de las celdas solares de silicio que se hagan mediante procesos industriales y no en ambientes ultralimpios de los laboratorios, si es posible aumentando la eficiencia de conversión.

Las celdas solares de silicio cristalino han alcanzado eficiencias record de 24.7 % mediante una estructura sofisticada llamada “*Passivated Emmitter and Rear Locally diffused (PERL)*”, ilustrada en la Fig. 1. Esta estructura, desarrollada por Martin Green y su grupo en Australia [1], es importante porque ha mostrado que es posible alcanzar eficiencias de conversión cercanas a la máxima eficiencia teórica (29 - 31 %) de fotoceldas de silicio bajo luz solar (espectro AM1.5 global normalizado a 1 kW/m²), pero requieren procesos tales como foto-litografía de múltiples niveles, oxidación y difusión de impurezas en laboratorios ultra-limpios (clase micro-electrónica para fabricar circuitos integrados) y obleas de silicio de extrema calidad, de forma que no pueden industrializarse a costos de producción apropiados para su aplicación terrestre.

Por otro lado, la industria de celdas solares de silicio fabrica estos dispositivos con tecnología de bajo costo (dedos colectores y contacto posterior obtenidos por serigrafía, texturización superficial por ataque químico, etc.), pero sin incluir conceptos de diseño desarrollados para las celdas de alta eficiencia obtenidas en los laboratorios de investigación. La estructura para las celdas solares de silicio “serigráficas” típicas de la industria moderna de celdas solares se ilustra en la Fig. 2. A diferencia de las estructuras PERL, no incluyen emisor selectivo optimizado, ni la pasivación de estados de superficie, particularmente en el emisor, además de que la tecnología serigráfica utilizada impone límites para la reducción de las pérdidas, tanto por resistencia serie como por sombreado, debidas a los dedos colectores en el enrejado de las celdas solares. Por ello, la máxima eficiencia en estas celdas “industriales” es de sólo 13 % a 15 %.

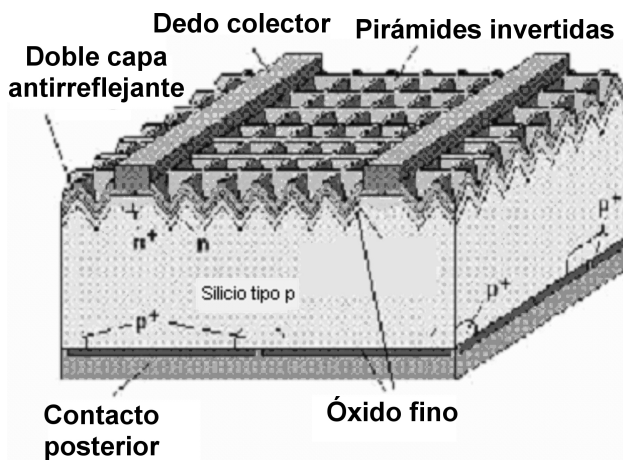


FIGURA 1. Estructura de una celda solar de silicio de alta eficiencia.

Mostramos aquí el trabajo que el autor y su grupo han desarrollado a lo largo de varios años [2–21] para el diseño y realización de celdas solares de silicio con emisores selectivos factibles de fabricarse en ambientes industriales. La metodología de diseño de las celdas solares se basa en la solución de las ecuaciones de transporte de carga en dispositivos semiconductores, tomando en cuenta la variación de movilidades y tiempos de vida en regiones con impurificación no uniforme (perfil tipo gaussiano como se obtiene a partir de procesos de difusión o de implantación iónica), y fenómenos tales como la recombinación Auger y la reducción de banda prohibida en silicio altamente impurificado. Igualmente, se desarrolló un programa de computadora para el diseño del enrejado, tomando en cuenta el flujo lateral de corriente en el emisor, así como las limitaciones debidas a la tecnología de fabricación de los dedos colectores de corriente. Además, se cuenta con un programa que permite optimizar el espesor de capas antirreflejantes múltiples, dado el índice de refracción respectivo, dependiendo del método de obtención de las mismas.

También se describen los procesos que se requieren para hacer celdas solares de silicio, así como diversos experimentos que nos han permitido mejorar la eficiencia de conversión de estos dispositivos. Por ejemplo, se han depositado capas de nitruro de silicio por la técnica de depósito en fase vapor ayudado por plasma (PECVD) a partir de SiH₄/NH₃, y se han optimizado las condiciones de depósito para lograr la pasivación de estados de superficie en el emisor, al mismo tiempo que actúe como capa antirreflejante óptima. Igualmente, se muestra la realización de un nuevo proceso de aleación de aluminio en la parte posterior que causa un incremento de más del 20 % en la eficiencia de conversión respecto a celdas realizadas con técnicas convencionales, debido a efectos de *gettering* de impurezas metálicas. También se presenta el diseño y obtención de una doble capa antirreflejante óptima sobre celdas solares de silicio en base a TiO₂/SiO₂.

Al final se propone la integración de todos los procesos estudiados, así como la metodología de diseño, de forma que podamos realizar celdas solares de mayor eficiencia que las serigráficas, con procesos susceptibles de industrializarse (partiendo de obleas tipo p), y con un solo paso de difusión de fósforo (en vez de dos, como se requiere actualmente) pa-

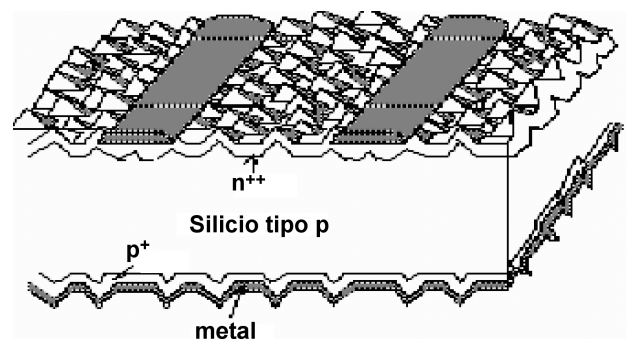


FIGURA 2. Estructura de una celda solar de silicio tipo “industrial”.

ra fabricar celdas solares de silicio con emisor selectivo, con alta eficiencia de conversión y bajo costo. Este trabajo aún está en proceso en los laboratorios del CINVESTAV del IPN.

Debe notarse que la importancia de este desarrollo está en que, siendo México un país con altos niveles de insolación anual (entre los más altos en el mundo) y con gran necesidad de energía eléctrica en zonas rurales aisladas, el presente trabajo puede ser la base para contar con tecnología propia que permita el surgimiento de una industria nacional competitiva para la fabricación de celdas solares y módulos fotovoltaicos.

2. Diseño de celdas solares de silicio

Para poder diseñar una celda solar en cualquier material es necesario tener gran conocimiento sobre los factores que pueden limitar su eficiencia. Es esto lo que ha tomado un buen número de años de investigación en silicio, y es por esto que tomará tiempo para que celdas solares basadas en materiales como el CdTe y CuInSe₂ puedan optimizarse, aunque tienen gran potencial para reemplazar al silicio en el futuro.

En la Fig. 3 se ilustran algunos de los fenómenos que limitan la eficiencia de las celdas solares. Puede notarse que hay fenómenos intrínsecos a la naturaleza del efecto fotovoltaico bajo radiación solar. Por ejemplo, la mayor parte de los fotones provenientes del espectro solar y que pueden ser absorbidos por un material determinado tendrán mayor energía que el ancho de banda prohibida del material en cuestión, y por lo tanto el exceso de energía de los portadores (huecos y electrones) generados tendrá que perderse en forma de calor, mediante la “termalización” de los portadores. Igualmente, la recombinación, que es el fenómeno inverso a la generación de pares electrón-hueco, ocurrirá después de un tiempo característico llamado “tiempo de vida”. Hay varios mecanismos para la recombinación de portadores, pero habrá una razón de recombinación mínima que estará determinada por las transiciones radiativas desde la banda de conducción hacia la banda de valencia del semiconductor mismo.

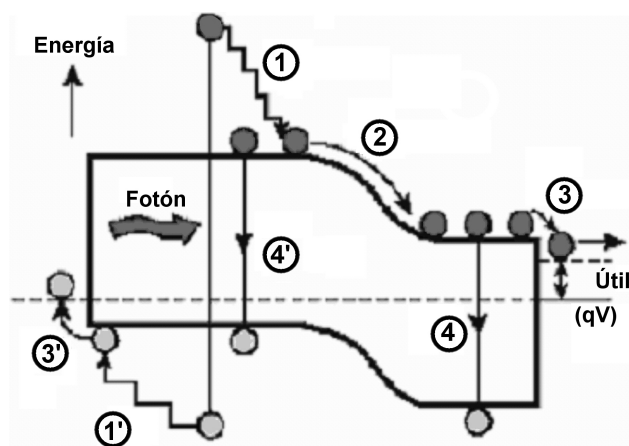


FIGURA 3. Fenómenos de pérdida de energía en una celda solar. (1) Termalización de portadores por la red, (2) y (3) pérdida de voltaje en la unión y los contactos, (4) recombinación de huecos y electrones.

Estos mecanismos de pérdida inherentes al fenómeno fotovoltaico son los que limitan la eficiencia que puede esperarse de celdas solares fabricadas con un material determinado. Para silicio, la eficiencia máxima está entre 29 % y 31 % cuando se ilumina con radiación solar con espectro AM 1.5, que es aproximadamente el que habría en condiciones de máxima insolación sobre la superficie terrestre [13]. Es interesante notar que la falta de comprensión de los factores que limitan la eficiencia ha causado reportes por algunos investigadores de eficiencias hasta de 35 % para celdas solares de silicio cristalino, lo cual el autor ha demostrado que son incorrectos [10].

Además de los mecanismos de pérdida mencionados tenemos otros que existen en la práctica y que pueden reducirse mediante el diseño y los procesos de fabricación adecuados. Entre éstos podemos mencionar: la recombinación superficial debida a la presencia de defectos en la superficie de cualquier material y la reflexión de la radiación solar en la superficie de la celda solar. El primero puede reducirse mediante lo que se llama pasivación superficial. En el caso de silicio, esto se realiza depositando capas finas de un óxido o nitruro que eliminan los enlaces sueltos en la superficie [18]. En el segundo caso, la reflectancia se reduce depositando una o dos capas de materiales con espesor e índice de refracción adecuados sobre la cara en que incide la luz [20]. De esta manera habrá un mayor acoplamiento óptico entre el aire y el silicio. Otra manera de lograr esto último es texturizando la superficie con arreglos piramidales (como se ve en las Figs. 1 y 2), de manera que la luz es “atrapada” induciendo la reflexión múltiple hacia la foto-celda.

La calidad del material utilizado en la fabricación de las celdas solares también es causa de una mayor o menor eficiencia. Una menor calidad estará asociada a un menor tiempo de vida y a una menor movilidad de los portadores de carga. El tiempo de vida de los electrones y huecos en materiales reales está determinado por la presencia de trampas que son causadas por impurezas indeseables (metales como cobre, hierro, oro, etc.) y defectos originados en esfuerzos térmicos durante los procesos de fabricación, o incluso por la introducción controlada de impurezas para hacer tipo p (boro) o n (fósforo) al silicio. Así, el tiempo de vida limitado por centros de recombinación profundos (llamado también tiempo de vida Shockley-Read-Hall) y la movilidad dependen fuertemente de la concentración de boro y fósforo. Es decir, en una región donde varía la concentración de impurezas tales como boro y fósforo también varía el tiempo de vida y la movilidad de huecos y electrones. Para fabricar las celdas solares de silicio más eficientes reportadas a la fecha [1] se usó silicio cristalino crecido por la técnica de zona flotante. Este material es tal que contienen muy pocas impurezas metálicas e igualmente una muy baja concentración de defectos, por lo que pueden esperarse muy altas movilidades y tiempos de vida de electrones y huecos.

En regiones en donde se tengan altas concentraciones de impurezas también habrá altas concentraciones de portadores mayoritarios (electrones en silicio tipo n, y huecos en silicio

tipo p), lo que causará que sea importante un fenómeno llamado recombinación Auger. Debido a este mecanismo de recombinación, la energía perdida por un par electrón-hueco al recombinarse se transfiere a un portador mayoritario, por lo que es más probable en cuanto sea mayor la cantidad de este tipo de portadores de carga. Este mecanismo de recombinación puede reducirse mediante la disminución de la concentración de impurezas en el semiconductor, aunque esto puede ocasionar otros problemas, por ejemplo al tratar de hacer un buen contacto óhmico (de baja resistencia) a este semiconductor. Es decir, habrá compromisos a resolver y deberá optimizarse la concentración de impurezas y su distribución (perfil) dentro del silicio.

Ha sido precisamente este tipo de problemas o compromisos los que han determinado el desarrollo de nuevas estructuras para celdas solares de silicio. Así, la estructura de celda solar mostrada en la Fig. 4 tiene dos regiones para la capa difundida (emisor), en la parte superior de la celda, por lo que también se le llama “celda solar con emisor selectivo”. En una porción del emisor que actúa para coleccionar a los portadores fotogenerados se tiene baja concentración de átomos de fósforo, mientras que en la región debajo de los contactos (dedos) se tiene una porción del emisor fuertemente impurificada –también con fósforo– para lograr baja resistencia de contacto entre el metal de los dedos y el silicio. Así, al mismo tiempo se reducirá la recombinación en la región activa del emisor y se tendrá resistencia en serie pequeña asociada a la celda solar.

El emisor de una celda solar se logra típicamente mediante la difusión de impurezas del tipo opuesto a las que se tienen en el sustrato (base). Esto se realiza poniendo la oblea de silicio en un horno a temperaturas entre 850 y 1150 °C. Por otro lado, para hacer un buen contacto óhmico a la base (es decir, al sustrato), en la parte posterior, es necesario impurificarlo mas fuertemente con el mismo tipo de impurezas que haya en la base misma. Esto también puede hacerse por difusión de impurezas a alta temperatura, o bien por la aleación de un metal con el silicio de forma que genere una región altamente impurificada.

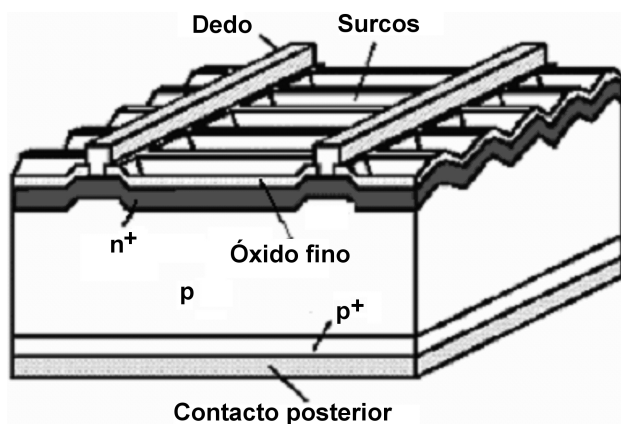


FIGURA 4. Estructura de celda solar con emisor selectivo.

Para facilitar la fabricación de celdas solares de silicio actualmente se usan sustratos de silicio tipo p (impurificados con boro) con resistividad típica entre 0.1 y 10 ohm-cm, pues en este caso puede evaporarse y alearse aluminio a temperaturas alrededor de 600°C en la parte posterior. El aluminio impurifica y hace al silicio tipo p+, ayudando a reducir la recombinación en el contacto posterior debido al campo eléctrico que aparece entre las regiones p y p+ y que refleja a los electrones fotogenerados hacia la unión. Al mismo tiempo, esto permite formar un buen contacto óhmico con otros metales tales como níquel, plata, etc. Por eso, a partir de este punto hablaremos sólo de estructuras como la ilustrada en la Fig. 4. En este tipo de estructura el emisor es tipo n+, la base es tipo p y la región posterior es tipo p+ (o sea una celda solar de silicio n+ – p – p+).

Nótese que debajo del dedo metálico del enrejado se tendrá una región n++ para formar un buen contacto óhmico. También debe notarse que se incluye una capa de óxido o nitruro de silicio para lograr la pasivación de la superficie del emisor. Éste es el tipo de estructura que hemos llamado “celda solar con emisor selectivo”, y que pretenderemos diseñar en lo que sigue. Nuestra intención será obtener este tipo de estructura de manera que se pueda realizar con procesos industriales. Esto limita algunos parámetros de fabricación, por lo cual es necesario contar con programas de computadora que ayuden a optimizar las celdas de silicio. En otras palabras, el primer paso es realizar los programas de computadora mencionados.

2.1. Simulación de celdas solares de silicio n+ - p - p+

Para simular el comportamiento de una celda solar de silicio es necesario resolver un sistema de ecuaciones diferenciales no lineal, incluyendo modelos para la variación de la movilidad y el tiempo de vida de los portadores en función de la concentración de impurezas [9]. Además debe tomarse en cuenta que típicamente en el emisor se obtiene una distribución de tipo gaussiano, como se ilustra en la Fig. 5, después de realizar los procesos de difusión de fósforo a altas temperaturas.

Previamente, el autor había estudiado el efecto de reducción de banda prohibida así como la degeneración de Fermi y la recombinación Auger sobre el comportamiento de las celdas solares [3–5,7,8], y luego estos efectos se incorporaron en un programa de computadora desarrollado en lenguaje Pascal, cuya pantalla de entrada de datos se ilustra en la Fig. 6. En la Ref. [9] se da una explicación cuantitativa sobre los modelos y el método de solución de las ecuaciones de transporte que permitió desarrollar el programa mencionado.

En este programa se dan como datos de entrada la concentración de boro en la base (N_b), la concentración superficial de fósforo (N_s), la profundidad de unión (x_j), el espesor del sustrato (W) y las velocidades de recombinación en las superficies del emisor (S_e) y de la base (S_b) respectivamente. Todos estos parámetros pueden modificarse variando los procesos tecnológicos de fabricación.

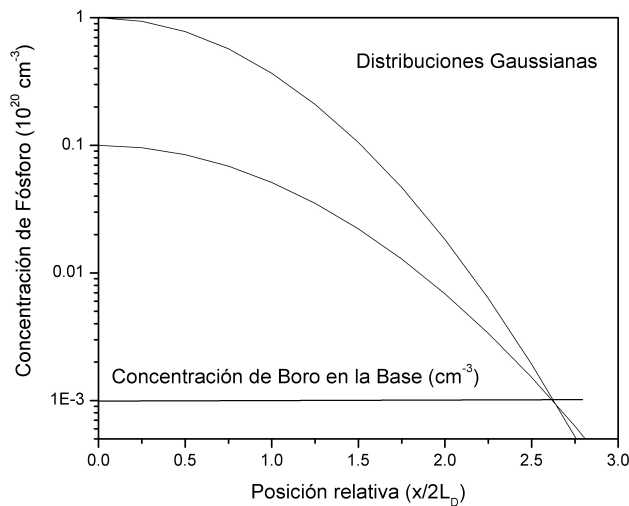


FIGURA 5. Distribuciones Gaussianas que aproximadamente se obtienen después de procesos de difusión típicos en silicio. La concentración en $x = 0$ es lo que llamamos la concentración superficial de fósforo en el emisor (N_s). La profundidad del emisor (x_j) corresponde al punto donde las concentraciones de fósforo y de boro en la base (N_b) son iguales.



FIGURA 6. Pantalla de entrada de datos del programa de simulación de celdas solares de silicio que permite el diseño de la estructura y los procesos óptimos.

En la Fig. 7 se muestran algunos resultados del programa de simulación, variando uno de los parámetros y fijando los demás. Se puede ver claramente que, en celdas solares con superficies pasivadas, hay una concentración de boro óptima en la base alrededor de 2.5×10^{17} átomos/cm³ que corresponde a una resistividad para obleas de silicio tipo p de aproximadamente 0.1 ohm-cm. También puede verse que para concentraciones superficiales de fósforo arriba de 2×10^{19} átomos/cm³ la eficiencia de conversión se reduce significativamente. Sin embargo, disminuir aun más este valor puede traer como consecuencia un fuerte incremento de la resistividad de hoja en el emisor, la cual determina a la resistencia serie asociada con la celda solar, y por ello consideraremos que un valor óptimo está entre 1×10^{19} y 3×10^{19} átomos/cm³. Este valor óptimo también dependerá de la profundidad de unión elegida, pues la resistividad de hoja esperada es función de este parámetro. Puede verse que al aumentar la profundidad de unión tiende a reducirse la eficiencia de la celda,

pero hacer una unión muy delgada (menor a $0.3 \mu\text{m}$) puede causar que haya problemas de uniones en cortocircuito, y por eso no es conveniente realizar celdas con emisores poco profundos en un ambiente industrial. Esto puede hacerse a nivel de laboratorio, pero no en celdas que se pretendan realizar en un ambiente de producción. Por eso, la pasivación superficial es muy importante, pues en este caso la dependencia de la eficiencia al aumentar el espesor del emisor es mucho menor respecto a lo que puede tenerse cuando hay una alta velocidad de recombinación superficial en el emisor de la celda.

Los resultados mostrados justifican la llamada estructura de emisor selectivo. Para hacer eficiente a una celda de silicio debemos tener en el emisor concentraciones superficiales de fósforo muy bajas (1 a $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$). Estas concentraciones de impurezas causarían resistividades específicas de contacto muy altas al depositar los dedos metálicos [3]. Es decir, debajo de los contactos se requieren concentraciones superficiales de fósforo arriba de $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, de forma que esta resistividad de contacto no sea tan alta y no determine el valor de las pérdidas por resistencia. Es por ello que en la porción activa del emisor debemos tener bajas concentraciones superficiales, mientras que debajo de los contactos debemos lograr altas concentraciones superficiales de fósforo. Desafortunadamente esto implica 2 procesos de difusión y un proceso de enmascaramiento para definir las diferentes regiones sobre el emisor.

Con base en todo lo anterior podemos concluir que el diseño de nuestra celda solar quedaría con los siguientes parámetros de fabricación: resistividad de sustrato de 0.1 a 0.3 ohm-cm tipo p, espesor del sustrato entre 250 y 300 μm ; concentración superficial de fósforo activo en el emisor de $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, con una profundidad de unión de 0.5 μm ; superficie del emisor pasivada, de manera que tengamos velocidad de recombinación en el emisor menor a 1000 cm/s. Debajo de los contactos, la concentración superficial de fósforo será de $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ para tener resistividades específicas de contacto, con metales tales como níquel que se utilizarán para los dedos del enrejado colector de la fotocorriente, menores a 10^{-4} ohm-cm^2 . El campo eléctrico posterior se hará aleando aluminio al silicio, de forma que se alcancen concentraciones de átomos de aluminio mayores a 10^{19} cm^{-3} en la parte posterior. De esta manera, la velocidad de recombinación efectiva en la parte posterior de la base también será menor a 1000 cm/s.

Nótese la importancia de contar con un programa de simulación como el que se ha descrito, ya que en caso de que en condiciones de producción no puedan ocurrir algunos de los parámetros deseados, se podrá calcular lo que podríamos esperar al poner valores más realistas. Igualmente, en los modelos usados (tiempo de vida y movilidad) podemos tomar en consideración la calidad de las obleas de silicio, ya que normalmente éstas no son crecidas por la técnica de zona flotante (alta calidad) con el objeto de reducir costos de producción. Todo esto podría implicar una nueva resistividad óptima para el sustrato, diferente a la que hemos obtenido anteriormente.

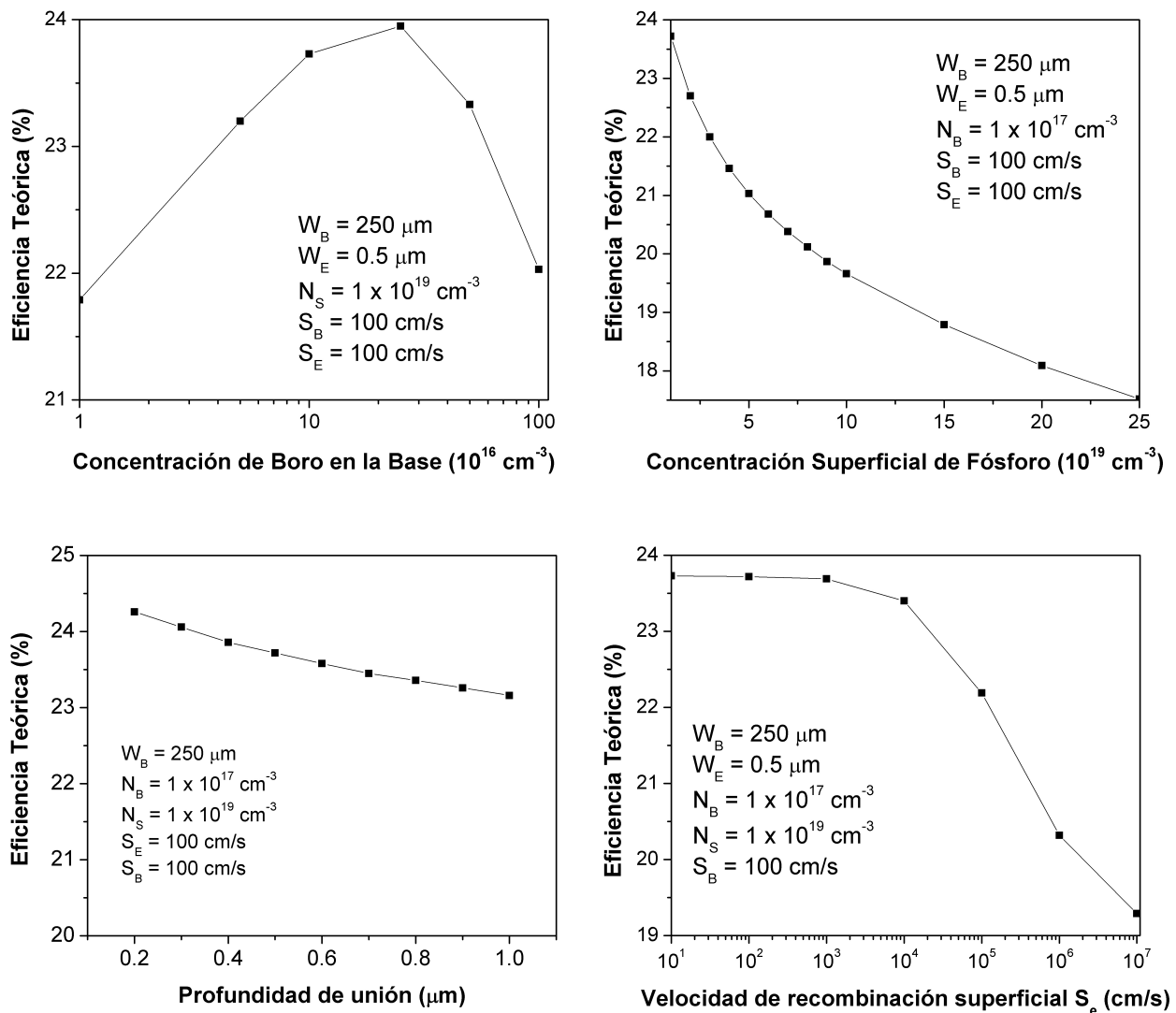


FIGURA 7. Eficiencia de conversión de celdas solares de silicio con diferentes valores para los parámetros de fabricación, en función de (A) N_b , (B) N_s , (C) x_j , y (D) S_e .

Para finalizar esta sección, debe mencionarse que el programa descrito predice muy bien las eficiencias reportadas por M. Green [1], cuando se usan los parámetros de fabricación utilizados por él para hacer celdas solares tipo PERL de alta eficiencia (Fig. 1). Así, nuestro programa predice alrededor de 25 % de eficiencia usando profundidades de unión de emisor de $0.2 \mu\text{m}$, como él utilizó para hacer sus celdas solares de laboratorio sobre substratos óptimos. Este valor puede compararse con lo obtenido en la práctica por Green y su grupo (24.7 %).

2.2. Diseño del enrejado colector de corriente y de la capa antirreflejante.

Para tener completo el diseño de una celda solar es necesario optimizar las dimensiones del enrejado así como la capa antirreflejante (sencilla o doble). Lo que se busca en este caso es minimizar las pérdidas por resistencia serie, así como las

pérdidas ópticas asociadas al sombreado por el enrejado y las debidas al desacople óptico del silicio con el aire.

Sobre el emisor, es necesario un enrejado que permita coleccionar la foto-corriente y al mismo tiempo el flujo de la radiación solar hacia el silicio, donde ocurrirá el fenómeno fotovoltaico en sí. Es decir, el contacto de colección de corriente no puede ser sobre toda la superficie porque entonces no podría fluir la radiación hacia el silicio y no ocurriría el efecto fotovoltaico, a menos que la capa de metal fuese muy delgada. Así, el enrejado causará una pérdida óptica porque, en donde haya metal, la radiación incidente se reflejará totalmente. Por lo tanto, uno desearía que el área cubierta por el enrejado fuese mínima. Sin embargo, reducir el área de los dedos del enrejado causará que la potencia disipada por efecto Joule en la resistencia de contacto asociada se incremente. Por otro lado, la corriente generada por la luz tendrá que circular lateralmente a través de una sección transversal muy pequeña, hacia los dedos en el emisor, causando también una al-

ta resistencia serie y las pérdidas correspondientes, por lo que aumentar la separación entre dedos del enrejado haría más grave este problema aunque ayudaría a reducir la pérdida por sombreado (pues habría un menor número de dedos en una cierta distancia). Es decir, hay que tomar en cuenta que existen compromisos relacionados con las dimensiones (ancho y espesor) de los dedos y su separación. Incluso, la profundidad de unión también juega un papel importante en relación a las pérdidas por resistencia serie, ya que a menor profundidad de unión mayor será la resistencia de hoja en el emisor y mayor será la pérdida resistiva asociada al flujo lateral de corriente en la región difundida. Pero vimos anteriormente que reducir la profundidad de unión ayudaría a aumentar la eficiencia de la celda al aumentarse la fotocorriente generada bajo iluminación. En otras palabras, hay que optimizar todos los parámetros mencionados, con el objeto de que satisfaciendo estos compromisos se logre el mínimo de pérdidas.

Precisamente esto es lo que logramos mediante otro programa de computadora, a partir del cual obtenemos las dimensiones óptimas de los dedos y su separación, dados varios parámetros tecnológicos, tales como resistividad de hoja en el emisor, resistividad de contacto y resistividad del metal a utilizar para los dedos, la razón de aspecto (relación de ancho a espesor) de los dedos, así como la dimensión de la celda (entre mayor sea el área, mayores serán las pérdidas por resistencia serie). Igualmente es necesario establecer la corriente y el voltaje de operación (en el punto de máxima potencia) de la celda. En lo que sigue asumiremos celdas solares cuadradas de lado $L_c = 2$ cm, es decir área de 4 cm^2 , y un enrejado con dedos rectangulares.

El programa desarrollado por el autor, que se describe en la referencia [2], se basa en establecer las ecuaciones para las pérdidas asociadas al flujo lateral de corriente hacia los dedos, a la resistencia de contacto entre el silicio y los dedos metálicos, al flujo de corriente en los dedos y al sombreado de la luz por los dedos mismos, en función de los parámetros tecnológicos antes mencionados. Se obtiene así una expresión para la pérdida total en función de 2 variables (ancho de los dedos y separación entre ellos), a partir de la cual, al derivar parcialmente e igualar a cero para obtener el mínimo, se obtiene una ecuación no lineal que puede resolverse numéricamente (usando el método de Newton-Raphson). Por limitaciones de espacio, los detalles pueden verse en [2] y en las referencias allí citadas.

De esta manera, como ejemplo, podemos tener los siguientes parámetros típicos de una celda solar de alta eficiencia, como la diseñada previamente:

$$\begin{aligned} J_m &= 0.035 \text{ A/cm}^2 & V_m &= 0.6 \text{ V} \\ \rho_{he} &= 300 \text{ ohm-cm} & \rho_m &= 1 \times 10^{-5} \text{ ohm-cm} \\ \rho_c &= 1 \times 10^{-4} \text{ ohm-cm}^2 & N &= 20, \end{aligned}$$

en donde J_m es la densidad de corriente esperada en el punto de máxima potencia, V_m es el voltaje en el punto de máxima potencia, ρ_{he} es la resistividad de hoja en el emisor, ρ_m es la resistividad del metal de los dedos, ρ_c es la resistividad específica de contacto y N es la razón de aspecto (relación de

ancho a espesor) de los dedos determinada por la tecnología a usar para su obtención. En este caso, los valores óptimos para las dimensiones de los dedos y su separación son:

$$\text{Ancho} = 39 \mu\text{m},$$

$$\text{Espesor} = 2 \mu\text{m},$$

$$\text{Separación} = 875 \mu\text{m},$$

con lo cual se tiene diseñada tanto la estructura de la celda como las dimensiones del enrejado colector de corriente. Estas dimensiones son realizables en ambientes industriales con tecnologías apropiadas.

Nos resta diseñar la capa antirreflejante, la cual puede ser simple, o mejor aún una doble capa. Para ello, también recurrimos a desarrollar un programa de computadora general que es útil para calcular la reflectancia en el caso de N capas sobre un sustrato de silicio. Para cada capa se asume transmitancia de 100 % y un índice de refracción constante en el rango de longitudes de onda del espectro solar, pero se toman en cuenta las reflexiones múltiples asociadas al desacople óptico entre capas para las diferentes longitudes de onda. A partir de los datos de índice de refracción y el espesor de $N-1$ capas, se calcula la reflectancia, y se promedia tomando en cuenta la distribución fotónica sobre todo el espectro solar (AM 1.5), en función del espesor de la capa restante. De esta manera, se puede desplegar en pantalla cómo varía la reflectancia promedio en función del espesor de la capa en cuestión y rápidamente se determina qué espesor es el que nos dará la mínima reflectancia promedio. Se puede obtener así el espesor óptimo para todas las capas. Por supuesto, más de 2 capas serían demasiadas debido al mayor costo que estas implicarían.

Por ejemplo, en el caso de una sola capa sobre silicio ya es conocido que el material apropiado es aquel que tenga un índice de refracción de $n = 1.9$ cuando la celda esté bajo aire y de $n = 2.4$ cuando esté bajo vidrio. Los espesores óptimos respectivos, tomando en cuenta todo el espectro solar, son aproximadamente de 84 a 87 nm y de 67 a 69 nm, respectivamente. Dos materiales con los índices apropiados serían nitruro de silicio ($n = 1.9$) y óxido de titanio ($n = 2.4$).

Sobre las capas simples anteriores podríamos colocar una segunda capa, por ejemplo de óxido de silicio (SiO_2), cuyo índice de refracción es de 1.45. Los espesores óptimos de nitruro de silicio y de óxido de titanio cambian en este caso. Así, suponiendo celdas solares operando bajo aire, los espesores óptimos para la doble capa de nitruro de silicio - óxido de silicio serían de 69 a 72 nm de nitruro de silicio y de 57 a 59 nm de óxido de silicio. En el caso de una doble capa de óxido de titanio - óxido de silicio, los espesores óptimos serían de 63 a 65 nm de óxido de titanio y aproximadamente 99 a 102 nm de óxido de silicio [20].

Así, finalmente el diseño de las celdas solares esta completo y ahora podemos pasar a explicar el trabajo experimental realizado tratando de lograr procesos de bajo costo que

permitan obtener celdas solares de alta eficiencia, como hemos diseñado con las herramientas computacionales descritas anteriormente.

3. Realización experimental de las celdas solares de silicio

Típicamente las obleas de silicio disponibles en la industria son fabricadas por la técnica Czochralski, de manera que los tiempos de vida y movilidad de los electrones y huecos son mucho menores que los que se tienen en obleas de alta calidad (crecidas por la técnica de zonafloatante). Igualmente, el rango de resistividades de menor costo depende de la demanda y por ello serán mas baratas las obleas de 2-5 ohm-cm que las de 0.1-0.3 ohm-cm como desearíamos. Por ello, el diseño óptimo tendrá que cambiarse tomando en cuenta estos aspectos. Es aquí donde se vuelve importante contar con los programas de diseño mencionados anteriormente, pues los parámetros óptimos cambiarán en función de las características de las obleas y de las restricciones impuestas por las condiciones industriales de fabricación o la tecnología utilizada para fabricar las celdas solares.

Independientemente de lo anterior, es importante lograr lo siguiente: Emisor con baja concentración superficial de fósforo ($1-3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$), baja velocidad de recombinación superficial en el emisor (100 cm/s o menos) y un campo eléctrico posterior efectivo (sin efectos degradantes debidos a las altas concentraciones de aluminio). Igualmente, debe reducirse al mínimo la reflectancia mediante una capa antirreflejante simple o doble.

En lo que sigue mostraremos los estudios que hemos realizado en este sentido, sin pretender todavía la mayor eficiencia, tomando en cuenta que el ambiente de nuestros laboratorios son equivalentes a los que habría en una planta industrial. Mostraremos que algunos procesos, como la aleación de aluminio podrían aprovecharse para recuperar la calidad de las obleas al extraer impurezas metálicas del volumen activo de la celda hacia una región de la misma en que son inactivas (superficie posterior). A este tipo de procesos se les llama *gettering* de impurezas metálicas. Igualmente, al depositar una doble capa antirreflejante (óxido de titanio - óxido de silicio) usamos una tecnología simple que no requiere de sistemas de vacío u hornos de alta temperatura, como describiremos más adelante. Todos estos procesos los pretendemos integrar completamente en el futuro cercano, rediseñando y tomando en cuenta condiciones reales de fabricación, para así obtener celdas solares de silicio con emisor selectivo de nivel industrial.

3.1. Pasivación del emisor de celdas solares mediante capas de nitruro de silicio obtenidas por medio de un plasma (PECVD) de $\text{SiH}_4\text{-NH}_3$ a baja temperatura.

La pasivación del emisor, es decir, la reducción de la velocidad de recombinación superficial en el emisor es de vital importancia. Por un lado, ayuda a incrementar la eficiencia

de conversión, y por otro permite aumentar la profundidad de unión a valores que mejoren la eficiencia de producción (*yield*) en un ambiente industrial, ya que no se degradará tan rápidamente la eficiencia de conversión misma. Esto puede lograrse depositando una capa de alta calidad dieléctrica en la superficie del emisor de silicio. Usualmente se ha utilizado óxido de silicio crecido en oxígeno seco a altas temperaturas. Sin embargo, las altas temperaturas pueden causar degradación de la oblea de silicio tanto por esfuerzo térmico como por la posible difusión rápida de impurezas metálicas en el ambiente. Por ello, lograr la pasivación superficial a bajas temperaturas es importante. Es esto lo que se propuso al depositar capas de nitruro de silicio (SiN:H) en fase vapor ayudado por plasma (PECVD) a partir de la mezcla de $\text{SiH}_4\text{-NH}_3$ [15,16,18].

El depósito de la capa de SiN:H se hizo en un sistema convencional de PECVD (placas paralelas a una frecuencia de 13.56 MHz) a una temperatura de 250 °C en el sustrato, tanto sobre obleas de silicio como sobre estructura de celdas solares $n^+ - p - p^+$, como las discutidas anteriormente. Además, también fue necesario preparar estructuras MIS (metal aislante semiconductor) para determinar la densidad de estados a la mitad de la banda prohibida en la superficie del silicio [15,18]. El estudio se complementó con mediciones de recombinación superficial mediante la técnica de fotoacústica como se describe en la Ref. [16]. El parámetro que se varió fue la relación R de presiones parciales de SiH_4/NH_3 . Algunos de los resultados pueden verse en la Fig. 8.

Puede verse ahí la concentración de enlaces Si-H y N-H (haciendo mediciones con un espectrofotómetro FT-IR), y cómo se correlaciona con el índice de refracción de la capa (medido con un elipsómetro a una sola longitud de onda), el ancho de la banda prohibida (determinado a partir de mediciones de reflectancia y transmitancia con un espectrofotómetro en el rango visible) y con la densidad de estados a la mitad de la banda prohibida (medido por capacitancia-voltaje a alta frecuencia), todo en función de la relación de presiones parciales de SiH_4/NH_3 .

A partir de los espectros de reflectancia y transmitancia se obtuvo la reflectancia promedio (R_{av}) y la transmitancia promedio T_{av} en todo el espectro solar AM 1.5, de forma que pudimos definir una figura de mérito F como

$$F(R) = \frac{T_{av}(R)[1 - R_{av}(R)]}{N_{ss}(R)}, \quad (1)$$

en donde N_{ss} es la densidad de estados a la mitad de la banda prohibida en la superficie del silicio. La figura de mérito $F(R)$ se muestra en la Fig. 9. Así pudimos establecer las condiciones óptimas de depósito para el valor de R en el cual se obtiene el máximo para la figura de mérito F . Esto ocurre para la razón $R = 0.32$, aproximadamente.

Para confirmar este resultado también se realizaron celdas solares con capas de SiN:H depositadas con diversos valores de R , y se midió la eficiencia cuántica interna (IQE) de las celdas solares (usando un monocromador) como se muestra en la Fig. 10. En esta figura puede verse que para $R = 1$ se

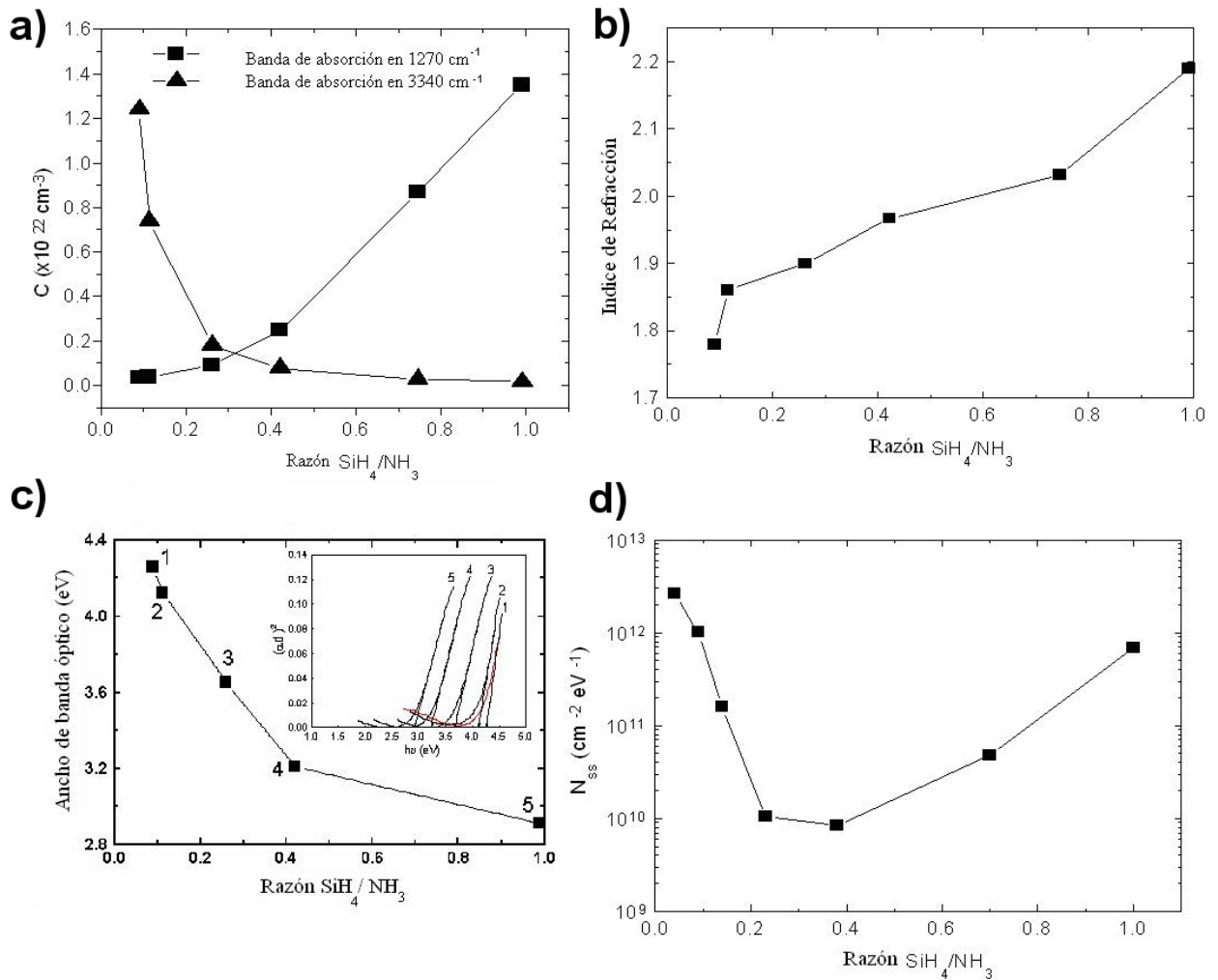


FIGURA 8. Diversas propiedades de las capas de SiN:H obtenidas por PECVD en función de la relación de presiones parciales de SiH_4/NH_3 . (A) Concentración de enlaces Si-H y N-H; (B) Índice de refracción; (C) Ancho de banda prohibida y (D) densidad de estados a la mitad de banda prohibida en la superficie del silicio.

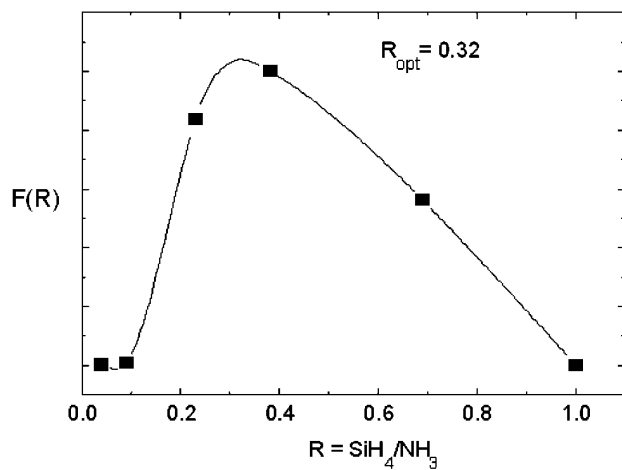


FIGURA 9. Figura de mérito de las capas de SiN en función de R.

tiene la menor respuesta en el rango de longitud de onda corta, seguido del valor $R = 6/65$. Para los valores intermedios

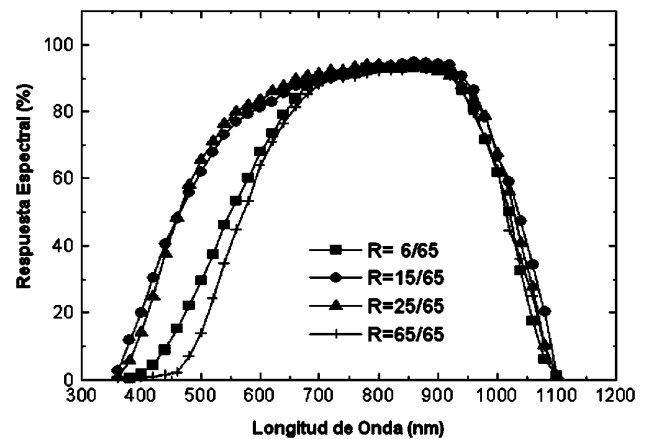


FIGURA 10. Respuesta espectral relativa de las celdas solares con capa de SiN en función de R.

de R (15/65 y 25/65) se obtiene la mayor eficiencia cuántica en este rango de longitud de onda, lo cual indica claramente una menor velocidad de recombinación superficial en el emi-

sor que en los casos anteriores. Es decir, el óptimo de R esta entre 15/65 y 25/65, de forma que $R = 0.32$ es posiblemente el óptimo, como habíamos obtenido a partir de la definición de la figura de mérito mostrada en la Fig. 9.

Nótese que la tecnología de depósito en fase vapor ayudado por plasma es ampliamente utilizada en la industria y permite obtener dichas capas a 250°C , como se pretende para evitar los esfuerzos térmicos y la difusión de átomos de metales, por lo que es una tecnología adecuada para lograr emisores pasivados a bajas temperaturas y compatible con otros procesos industriales para fabricar celdas solares de silicio.

3.2. Formación del campo eléctrico posterior y *gettering* de impurezas metálicas por medio del recocido apropiado de aluminio en la región p+ de celdas solares de silicio.

La evaporación de aluminio y su aleación al silicio a temperaturas mayores que la temperatura eutéctica del Al-Si (570°C) es un proceso muy importante, porque causa la formación de una región p+ en la parte posterior de la celda, con lo cual se resuelve el problema para formar un buen contacto óhmico (por ejemplo, con níquel), y al mismo tiempo se genera un campo eléctrico que refleja a los portadores minoritarios hacia la unión. Es decir, la velocidad de recombinación efectiva en la superficie posterior es mucho menor que si no hubiese la región p+ mencionada. Por eso, este proceso es muy importante, y normalmente se realiza a temperaturas alrededor de 600°C .

La región donde hay alta concentración de aluminio está muy esforzada debido a que los átomos de aluminio perturban fuertemente a la red cristalina de silicio. Esto puede ayudar a que sea una región de sumidero para otras impurezas metálicas, por lo que se aprovecha esta característica para atraer impurezas indeseables desde el volumen de la celda hacia la región superficial, donde aquellas se vuelven inactivas eléctricamente. A este fenómeno se le llama *gettering* de impurezas metálicas. Con la hipótesis de que los átomos de impurezas metálicas tienen que transportarse desde la región de la unión hasta la superficie posterior, se decidió intentar el proceso de recocido del aluminio a mayores temperaturas (800°C) que las tradicionales, como veremos a continuación.

Para probar lo anterior [17,19] se fabricaron 3 grupos de celdas solares con emisor pasivado (con capa pasivante de SiN como se describió en la Sec. 3.1). A las celdas del grupo llamado 07N no se les evaporó aluminio, y no requirió ningún tratamiento térmico. Este grupo fue el de referencia. A aquellas del grupo 05N se les evaporó $1\ \mu\text{m}$ de aluminio, y luego se recoció a 600°C durante 10 minutos en gas *forming* (H_2/N_2). A las celdas del grupo 03N se les evaporó $1\ \mu\text{m}$ de espesor de aluminio y luego se recoció a 800°C durante 40 minutos en gas *forming*. A todas las obleas se les midió la curva corriente-voltaje bajo iluminación (mediante un sistema de adquisición de datos desarrollado en nuestro laboratorio, conjuntamente con un programa para extraer los

parámetros, descritos en [6, 11]). Los resultados se dan en la Tabla I.

Además, usando un monocromador, a las celdas solares se les midió la respuesta espectral relativa como se ilustra en la Fig. 11. Posteriormente, se amplió el estudio para determinar el efecto del tiempo de tratamiento y se varió desde 0 hasta 120 minutos, obteniendo los resultados que se muestran en la Fig. 12 para el incremento de densidad de corriente de corto circuito e incremento del voltaje de circuito abierto en función del tiempo de tratamiento.

El conjunto de resultados de la Tabla I, y las Figs. 11 y 12 son bastante significativos, pues ilustran claramente el beneficio del tratamiento térmico a 800°C después de haber eva-

TABLA I. Resultados obtenidos para los diferentes grupos de celdas solares fabricadas.

Celdas	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (mV)	F. F. (%)	η (%)
03N	29.65	620	69.3	12.7
05N	25.67	600	68.7	10.5
07N	23.70	578	62.0	8.5

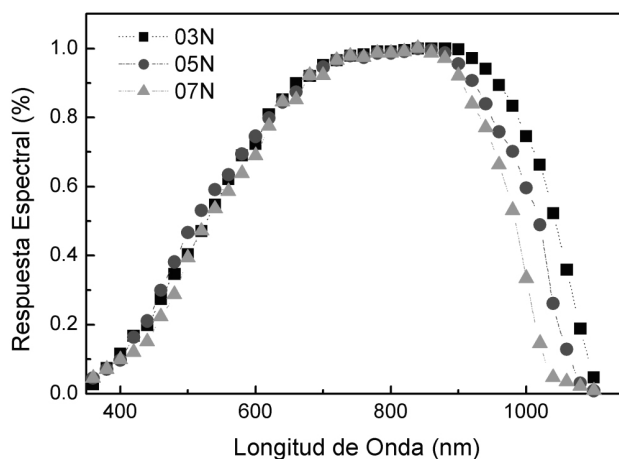


FIGURA 11. Respuesta espectral relativa de las celdas solares para los diversos grupos fabricados.

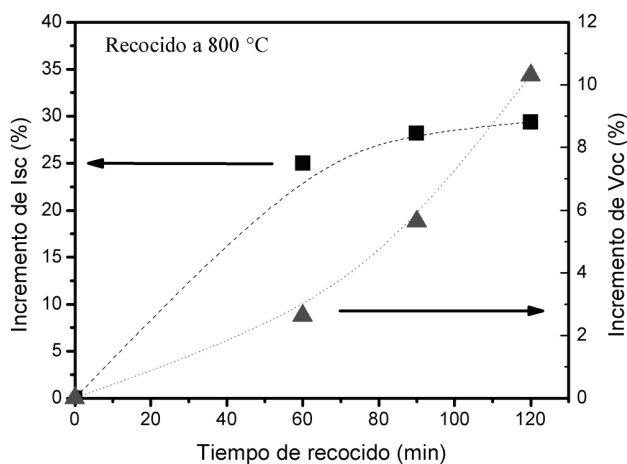


FIGURA 12. Incrementos relativos de J_{sc} y V_{oc} en función del recocido a 800°C en gas *forming*.

porado el aluminio. La eficiencia se incrementa desde 8.5 % hasta 12.7 % al comparar celdas solares sin y con 40 minutos de tratamiento en gas *forming* a 800°C. Es decir, una ganancia de casi 50 % en eficiencia de conversión. En la Fig. 11 puede verse que esto se debe en parte al incremento de la longitud de difusión de los portadores minoritarios en la base de las celdas solares, ya que la respuesta espectral en el rango de longitudes de onda largas se mejora para las celdas tratadas a 800°C.

Algo muy interesante es que al variar el tiempo de tratamiento, la densidad de corriente se incrementa hasta saturarse para tiempos mayores a una hora, mientras que el voltaje de circuito abierto podría seguir creciendo para tiempos mayores que 2 horas. Sin embargo, consideramos que un tiempo de recocido mayor sería impráctico en condiciones industriales y por ello no se exploraron tiempos de recocido mayores. De esta manera, hemos mostrado que hacer el recocido del aluminio evaporado para la región p+ de las celdas solares es benéfico y causa incrementos apreciables de la eficiencia de conversión.

3.3. Depósito de capas antirreflejantes dobles $\text{TiO}_x/\text{SiO}_x$ mediante *spin-on* de soluciones polimerizadas

Para finalizar el conjunto de procesos a realizar para fabricar celdas solares de silicio industriales, se hizo un estudio para depositar una doble capa antirreflejante sobre silicio cristalino, usando una técnica de bajo costo que no requirió de sistemas de vacío. Se decidió utilizar óxido de titanio / óxido de silicio como la doble capa. Inicialmente se prepararon soluciones poliméricas (sol-gel) de $(\text{C}_4\text{H}_9\text{O})_4\text{Ti}$ y TetraEtilOrtoSilicato (TEOS), respectivamente. Estas capas se depositaron por *spin-on*, es decir, depositando la solución polimerizada sobre la superficie del silicio y girando por un tiempo controlado a cierta velocidad. Los detalles pueden verse en la Ref. [20]. El índice de refracción del óxido de ti-

tanio fue de 2.2, mientras que el del óxido de silicio fue de 1.43, por lo que mediante el programa descrito anteriormente se determinó que los espesores óptimos en este caso eran de cerca de 65 nm para óxido de titanio y de 100 nm para óxido de silicio. Para comprobar esto se decidió crecer 2 espesores de óxido de titanio (64.7 nm y 74 nm) y sobre estas capas se varió el espesor del óxido de silicio. Los resultados para el espectro de reflectancia pueden verse en la Fig. 13. Nótese que en este caso no se fabricaron celdas solares sino sólo se depositaron las capas sobre obleas de silicio.

Los valores de reflectancia espectral se promediaron tomando en cuenta el espectro solar AM 1.5 y se determinó lo que llamamos la reflectancia remanente promedio $\langle 1-R \rangle$. El resultado fue que se obtuvo una mayor reflectancia remanente promedio en el caso en que el óxido de titanio tenía un espesor de 64.7 nm y el óxido de silicio de 108.4 nm, comparado con el caso en que el óxido de titanio tenía 74 nm y el óxido de silicio era de 96.3 nm, los cuales correspondían a los máximos de $\langle 1-R \rangle$ en cada caso. La reflectancia remanente para el primer conjunto de espesores fue mayor a 96 %, es decir, una pérdida por reflectancia, en el rango de longitudes de onda del espectro solar, de menos de 4 % [20].

Mejorando el control de los espesores y el índice de refracción de la capa de óxido de titanio podrán obtenerse aun mejores resultados, con una pérdida menor a 3 %, de acuerdo a los cálculos realizados por medio del programa de diseño de la capa antirreflejante. Lo importante es que estos resultados se han obtenido depositando ambas capas mediante una tecnología de preparación simple y sin requerir algún equipo de vacío.

Para finalizar, y como ejemplo, en la Fig. 14 se muestra la fotografía de una celda solar fabricada, con tecnología de bajo costo, en los laboratorios de lo que fue la planta piloto de celdas solares del CINVESTAV-IPN. La coloración azul oscuro que presenta la celda solar bajo luz solar se debe a la capa antirreflejante en la superficie de la fotocelda.

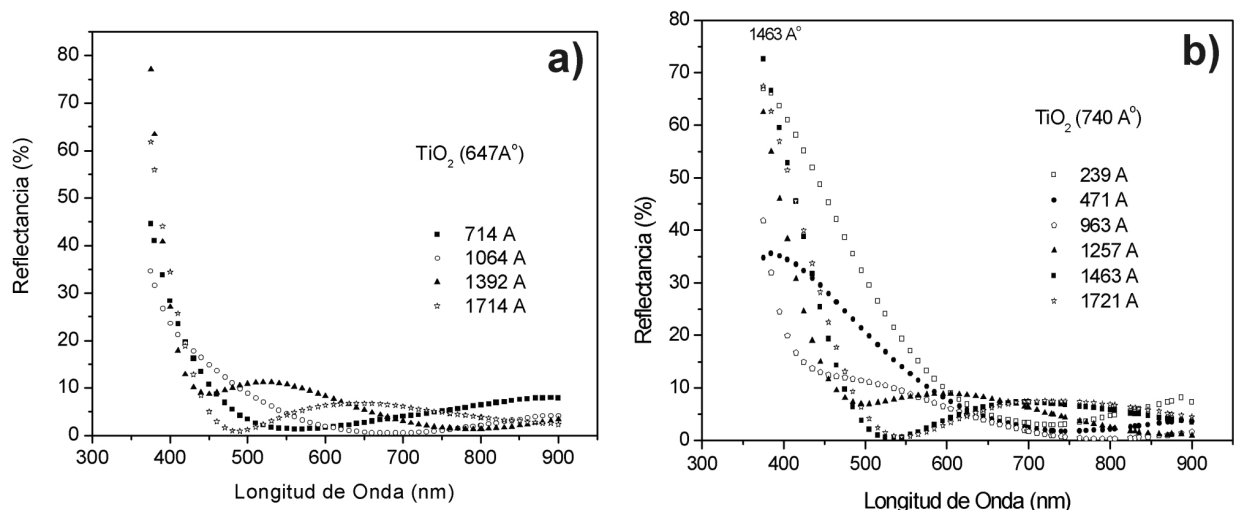


FIGURA 13. Espectro de Reflectancia para las bi-capas antirreflejantes fabricadas en este trabajo como una función del espesor de SiO_2 . (A) 64.7 nm de TiO_2 , y (B) 74 nm de TiO_2 .

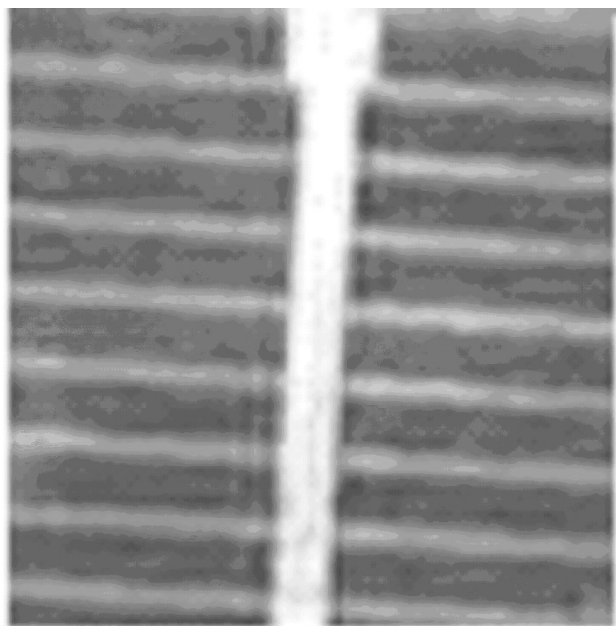


FIGURA 14. Fotografía de celda solar de silicio típica fabricada en el CINVESTAV-IPN.

4. Conclusión

Se ha mostrado un trabajo completo que integra el diseño de celdas solares de silicio cristalino (con emisores pasivados), con diversos procesos tecnológicos para su fabricación en un ambiente industrial. Se ha mostrado que para lograr esto se requiere de gran conocimiento de la física y tecnología de los semiconductores, así como de las celdas solares mismas.

Se ha trabajado así en la teoría de efectos tales como la recombinación Auger, la reducción de banda prohibida y la

degeneración de Fermi sobre la eficiencia de este tipo de celdas solares [3–5,7, 8,10,12,13]; se han generado herramientas de medición y extracción de los parámetros de una celda solar bajo iluminación [6,11]; se han desarrollado los programas de computadora para diseñar los dispositivos [2,9,20]; se han realizado y caracterizado las celdas solares con emisor pasivado mediante una capa de SiN obtenida por PECVD a baja temperatura [15,16,18]; se han estudiado los efectos de recocido de aluminio aleado en la parte posterior de las celdas sobre la eficiencia de conversión de las celdas solares [17,19] y se han fabricado capas antirreflejantes dobles depositadas por *spin-on* [20], obteniendo pérdidas por reflectancia menores al 4 % en todo el espectro solar.

Sin duda, debe continuarse con el trabajo descrito para la fabricación de celdas solares de silicio de alta eficiencia. Entre los desarrollos, a corto plazo, se contempla la realización de emisores selectivos con un solo paso de difusión de fósforo, para lo cual ya estamos simulando los procesos que permitirán lograrlo, de forma que se reduzcan los costos de producción industrial.

Agradecimientos

El autor agradece la colaboración de varios estudiantes y auxiliares de investigación que participaron directamente en el desarrollo de este trabajo y que han sido coautores de varias de las publicaciones referidas, así como de todo el personal de la Sección de Electrónica del Estado Sólido del Departamento de Ingeniería Eléctrica del CINVESTAV del IPN. Igualmente, se agradece el financiamiento parcial por parte del CONACyT y de COSNET-SEP, en diversas etapas del proyecto.

1. J. Zhao J, A. Wang, M. Green y F. Ferrazza, *Appl. Phys. Lett.* **73** (1998) 1991.
2. A. Morales-Acevedo, *Solar Cells* **14** (1985) 43.
3. A. Morales-Acevedo, *J. Appl. Phys.* **60** (1986) 815.
4. A. Morales-Acevedo, *Solar Cells* **22** (1987) 319.
5. A. Morales-Acevedo, *J. Appl. Phys.* **65** (1989) 2121.
6. A. Morales-Acevedo, *Computers in Physics* **3** (1989) 46.
7. A. Morales-Acevedo, *Solar Cells* **28** (1990) 293.
8. A. Morales-Acevedo, *J. Appl. Phys.* **70** (1991) 3345.
9. A. Morales-Acevedo y H. Arizpe, *Computers in Physics* **7** (1993) 343.
10. A. Morales-Acevedo, *Appl. Phys. Lett.* **63** (1993) 850.
11. G. Casados-Cruz y A. Morales-Acevedo, *Computers in Physics* **8** (4), 451 (1994).
12. A. Morales-Acevedo, *Solid-State Electron* **38** (1995) 2081.
13. A. Morales-Acevedo, *Rev. Mex. Fís.* **42** (1996) 449.
14. A. Morales-Acevedo y G. Santana, *25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Washington, D.C. (IEEE New York, 1996), p. 553.
15. G. Santana and A. Morales-Acevedo, *2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, Vienna, Austria (WIP, European Commission, Munich, 1998), p. 2422.
16. I. Riech et al., *Semiconductor Science and Technology* **14** (1999) 543.
17. A. Morales-Acevedo, G. Santana, A. Martel y L. Hernández, *Solid-State Electronics* **43** (1999) 2075.
18. G. Santana y A. Morales-Acevedo, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **60** (2000) 135.
19. G. Santana y A. Morales-Acevedo, *Modern Physics Letters B* **15** (2001) 601.
20. A. Morales-Acevedo, E. Luna-Arredondo y G. Santana, *29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, New Orleans, LA (IEEE, New York, 2002), p. 293.
21. A. Morales-Acevedo, *LA ELECTRICIDAD QUE VIENE DEL SOL: UNA FUENTE DE ENERGIA LIMPIA*, (Grupo Editorial Iberoamérica, México, D. F. 1996).