

CONVERSION FOTOVOLTAICA DE LA ENERGIA SOLAR

por

Gerardo Gordillo G*

Resumen

Gordillo G. Gerardo: Conversión fotovoltaica de la energía solar. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **22(83):** 203-211, 1998. ISSN: 0370-3908.

En este trabajo se hace una breve descripción de los aspectos básicos del funcionamiento de una celda solar tipo homojuntura y de los aspectos tecnológicos de la fabricación de celdas solares de bajo costo fabricadas con tecnología de capa delgada. Especial énfasis se hace en aspectos históricos de la evolución de la eficiencia de conversión de dispositivos fotovoltaicos basados en Si- cristalino, Si-amorfo, CdTe y CuInSe₂. El estado actual de la tecnología de dichos dispositivos y de módulos fotovoltaicos, también se presenta en este trabajo.

Se destacan igualmente, las contribuciones en el desarrollo de celdas y módulos solares de alta eficiencia, de Institutos de Investigación de Universidades tales como: Universidad de Stuttgart (Alemania), Universidad de Stockolmo (Suecia), Universidad del Sur de la Florida (USA), Universidad del Sur de Gales (Australia), del "National Renewable Energy Laboratory (NREL) de USA y de Centros de Investigación y Desarrollo de Industrias tales como: BP-Solar (Inglaterra), Boeing (USA), Arco Solar (USA), Matsushita (Japón), Siemens (Alemania) etc.

Adicionalmente se incluye una sección sobre aspectos económicos de la generación fotovoltaica de energía eléctrica, donde se presenta una visión general de la evolución de los precios de producción de módulos fotovoltaicos y del incremento en la demanda mundial.

Abstract

In this work, a short description of the basic aspect of the performance of homojunction solar cells and of the technological aspects of the fabrication of low cost thin film solar cells is made. Special emphasis on the historical aspects of the evolution of the conversion efficiency of photovoltaic devices based on crystalline silicon, amorphous silicon, CdTe and CuInSe₂ is also made. The state of art of the technology of photovoltaic devices and modules is additionally presented.

* Laboratorio de Celdas Solares. Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá,
e-mail: ggordill@ciencias.ciencias.unal.edu.co

The contribution to the development of high efficiency solar cells and modules, carried out by research Centers of Universities such us: Stuttgart University (Germany), Stocholm University (Sweden), University of South Florida (USA), University of South Gales (Australia), by the National Renewable Energy Laboratory of USA and by research Centers of Companies such us: Matsushita (Japan), BP-Solar (England), Boeing (USA), Arco Solar (USA), Siemens (germany) etc. are specially emphasized.

Additionally, a section concerning economical aspects of the photovoltaic generation of electric energy is enclosed. In this section an overview of the evolution of price and world market of photovoltaic system is presented.

1) Introducción

La radiación solar total que en promedio recibe la superficie terrestre es del orden de 10^{17} vatios, que distribuida en todo el globo terrestre corresponde a unos 170 W/m² por día; por consiguiente 1 m² de superficie terrestre recibe aproximadamente 4 KW-h diariamente. Esta radiación puede ser transformada en energía eléctrica a través de procesos de conversión directa utilizando dispositivos fotovoltaicos (más comúnmente llamados **celdas solares**) o a través de procesos indirectos que incluyen una etapa previa de conversión térmica o fenómenos naturales tales como el viento, mareas etc. De todos los procesos de conversión de la energía solar en energía eléctrica, la conversión directa a través de celdas solares es la más eficiente y la que ha recibido la mayor atención por parte de centros de investigación y desarrollos especializados en el área en el mundo.

La generación de potencia eléctrica a través de la conversión fotovoltaica de la radiación solar, basa su importancia en las siguientes propiedades:

- La fuente básica de energía es ilimitada y disponible en todos los sitios de la tierra.
- No genera contaminación ambiental, ni ruidos y es libre de mantenimiento.
- Capacidad de convertir radiación difusa en energía eléctrica con la misma eficiencia que la conversión de radiación directa.
- Su modularidad permite construir sistemas de generación de potencia desde unos pocos mW hasta plantas de varios MW con aproximadamente la misma tecnología

Las características arriba descritas han hecho que la conversión fotovoltaica de la energía solar junto con la generación de energía a través de procesos nucleares se hayan convertido en las fuentes alternativas de generación de energía más importantes en la actualidad.

El efecto fotovoltaico fue observado por primera vez en 1839 por **E. Becquerel** utilizando un dispositivo electrolítico y en 1977 **G. Adams** y **R.E. Day** reportaron la primera celda solar de estado sólido. Sin embargo, el inicio del desarrollo de dispositivos fotovoltaicos modernos se dio en 1954 con la publicación "A new silicon p-n junction solar cell for converting solar radiation into electrical power", por **D.H. Chaplin**, **C.S. Fuller** and **G.L. Pearson** de los laboratorios Bell Telephone.

Estos nuevos dispositivos fueron considerados inicialmente para aplicaciones terrestres en sistemas de telecomunicaciones en áreas remotas, para aplicaciones militares y en pequeños radios de transistores que aparecieron por aquella época, sin embargo el mercado no aceptó la nueva tecnología para generar energía eléctrica y el uso terrestre de esta permaneció marginal durante los siguientes años.

A partir de 1956 se inicio en USA un progresivo plan de desarrollo de generadores fotovoltaicos de potencia para uso en satélites espaciales. El primer satélite que utilizó energía fotovoltaica fue el Vanguard 1 en 1958, un año después con el Sputnik 1 se consolidó definitivamente la utilización de la energía fotovoltaica en los programas espaciales.

En los años posteriores la eficiencia de conversión de celdas de silicio cristalino fue incrementada muy rápidamente como consecuencia del boom general de la tecnología de dispositivos electrónicos semiconductores y del rápido desarrollo de las bases teóricas. Sin embargo, el silicio cristalino por ser un material semiconductor "indirecto" que presenta muy bajo coeficiente de absorción, exige que los espesores de los dispositivos sean muy grandes. Este hecho junto con el gran número de etapas tecnológicas que hay que realizar para fabricar una celda de silicio cristalino, incrementan fuertemente su costo de producción, de tal forma que el costo de generación de energía eléctrica a través de celdas de Si-cristalino difícilmente puede llegar a ser económicamente competitivo con la generación convencional de energía eléctrica, por lo menos a corto plazo.

Con el propósito de reducir costos de fabricación, otros materiales semiconductores con gap directo y otras tecnologías fueron investigados para fabricar celdas solares para uso terrestre. En 1954 **D.C. Reynolds** y colaboradores observaron por primera vez el efecto fotovoltaico en dispositivos de CdS fabricados con una nueva tecnología, denominada de capa delgada (por que el espesor de las celdas era del orden de unos pocos mm). Las eficiencias de las celdas basadas en capas delgadas de CdS fueron considerablemente mas bajas que las de Si - cristalino, pero estas fueron muy fáciles de fabricar a muy bajo costo y presentaron propiedades interesantes. En 1963 entró en la escena fotovoltaica el CdTe, a través de un trabajo citado por **D.A. Cusano** sobre celdas solares basadas en capas delgadas de CdTe con eficiencias del 6 %. La celdas de CdS y CdTe dominaron el sector de celdas solares de capa delgada hasta la mitad de la década del 70.

En 1970 el precio de la energía fotovoltaica era de alrededor de US \$ 300 el vatio pico, sin embargo, a pesar del alto costo de la energía fotovoltaica, por dicha época hubo un enorme interés por este tipo de tecnología para aplicaciones terrestres, motivados principalmente por la expectativa de reducir costos a través de un incremento en la capacidad de producción de sistemas fotovoltaicos de silicio y de la introducción de nuevos materiales y la tecnología de capas delgadas. Finalmente, con motivo del embargo petrolero de la OPEC en 1973, se crearon en un considerable número de países grandes fondos para financiar proyectos de investigación y desarrollo de sistemas fotovoltaicos para uso terrestre. Por aquellos días la UNESCO organizó un congreso mundial con invitados especiales de todo el mundo para discutir el estado actual de la generación fotovoltaica de energía y en octubre de 1973 la "National Science Foundation"(NSF) de USA realizó un workshop en Cherry Hill, New Jersey sobre conversión fotovoltaica de la energía solar para uso terrestre, donde se decidió sobre la estrategia a seguir en este tema en los siguientes 20 años. Dicha estrategia consistía básicamente en:

- Aumento de la relación eficiencia/costo en sistemas fotovoltaicos basados en Si-cristalino y Si-policristalino
- desarrollo de celdas solares basadas en capas delgadas de CdS
- Investigación de nuevos materiales con buenas propiedades para fabricar celdas solares con tecnología de capa delgada

- Diseño y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos

El desarrollo de celdas solares con tecnología de capa delgada se inició masivamente en 1975 . Un considerable número de materiales fueron investigados en los años siguientes, sin embargo solo tres de ellos; el CdTe el CuInSe₂ (CIS) y el silicio amorfo (a-Si) presentaron características adecuadas para ser considerados como candidatos potencialmente importantes para la fabricación de celdas solares de bajo costo y alta eficiencia, para uso terrestre. En 1976 **Kazmerski** y sus colaboradores anunciaron la primera celdas solar basada en CuInSe₂, y la primera celda de a-Si fue reportada por **C.R. Wronski** y **D.E. Carlson** en 1976. Después de tener dificultades en la primera fase de desarrollo, celdas basadas en películas delgadas de CdTe fueron fabricadas con éxito a finales de la década del 70.

El desarrollo de celdas solares basadas en estos tres materiales ha tenido un enorme éxito, sin embargo solo la tecnología del a-Si se transfirió a nivel industrial, pero debido a problemas de eficiencia y estabilidad su campo de aplicación se limitó principalmente al sector electrónico con una producción anual de algunos M-vatios. En cuanto al CIS y al CdTe solo recientemente algunas firmas en USA y en Europa iniciaron el proceso de montaje de plantas para producir a nivel industrial sistemas fotovoltaicos con tecnología de capa delgada. En la actualidad todo el mercado de sistemas fotovoltaicos lo cubre la tecnología de Si- mono y policristalino.

2. Bases teóricas del funcionamiento de una celda solar:

En principio el efecto fotovoltaico es basado en la transferencia de la energía de los cuantos de luz absorbidos en un semiconductor al sistema electrónico de este, para dar lugar a la generación de pares electrón-hueco (efecto fotovoltaico interno) y la colección de estos portadores dentro de un intervalo corto de tiempo. Para la colección de estos portadores se requiere la existencia de un campo eléctrico interno, el cual puede ser creado a través de la formación de junturas P/N, junturas PIN o barreras Schottky tipo MS o MIS.

La fig. 1a se muestra la estructura básica de una celda tipo homojuntura P/N y en la fig. 1b se observa la forma como varía el campo eléctrico creado en la zona de carga espacial (ZCE) de la homojuntura, el cual es usado para producir la separación de carga de los portadores fotogenerados y posterior arrastre de estos hacia los electrodos.

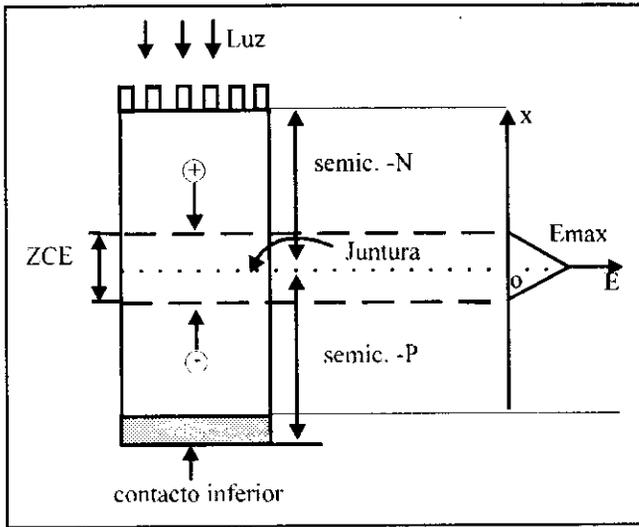


Figura 1. a) Estructura típica de una celda solar tipo homojuntura P/N
 b) Variación del campo eléctrico generado en la ZCE de la homojuntura P/N

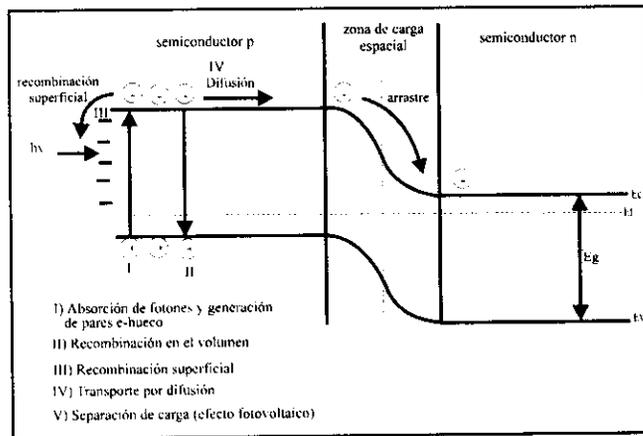


Figura 2. Diagrama de bandas de energía de una celda solar tipo homojuntura p/n

En la figura 2 se muestra el diagrama de bandas de energía de la homojuntura de la fig. 1.

El funcionamiento del dispositivo se puede resumir de la siguiente forma:

- Fotones con energía mayores que la energía del gap de energía del semiconductor (E_g), son absorbidos y esta energía es utilizada para excitar electrones de la banda de valencia a la banda de conducción, generando pares electrón - hueco (proceso I) que quedan libres para participar en los procesos de transporte eléctrico.

- Los portadores fotogenerados son transportados inicialmente por mecanismos de difusión (proceso IV) hasta el borde de la ZCE y posteriormente son separados y arrastrados hasta la juntura por el campo eléctrico (proceso V), donde se convierten en portadores mayoritarios que son extraídos a través de los contactos eléctricos óhmicos hacia el circuito exterior, generando de esta manera la llamada fotocorriente.
- Los procesos de generación de fotocorriente van acompañados por mecanismos de pérdida de fotocorriente, que en el caso de una homojuntura los más importantes son los procesos de recombinación en la superficie (proceso III) y en el volumen (proceso II).

La relación entre la corriente y el voltaje (característica I - V) a la salida de la celda solar, está dada por la siguiente relación:

$$I = I_0 \left\{ \exp\left(\frac{qV}{AKT}\right) - 1 \right\} - I_{ph} \quad (1)$$

Donde I_0 es la corriente inversa de saturación, A el factor de identidad de diodo e I_{ph} la fotocorriente. En principio esta ecuación es válida para todos los tipos de celdas solares; ellas difieren solamente en el valor y en el origen físico de I_0 y A (Cutts & Meaking 1985).

La fig.3 muestra la curva característica de una celda solar correspondiente a la relación de I-V de la Ec. 1.

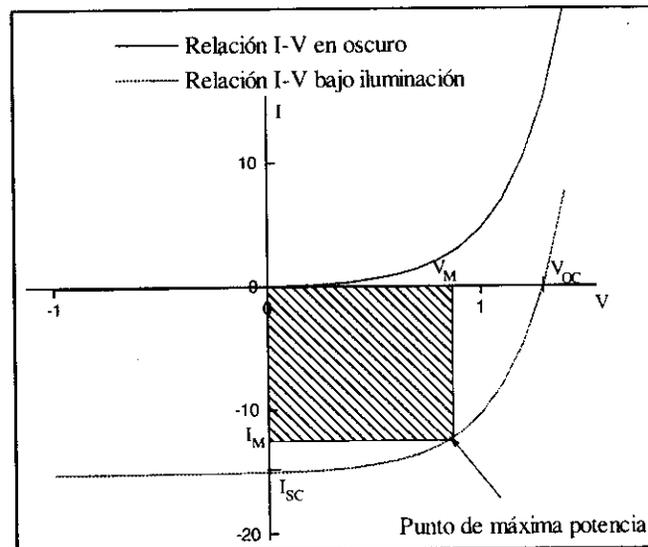


Figura 3. Característica I-V de una celda solar en oscuro y bajo iluminación; indicando los parámetros que la caracterizan (V_{oc} , I_{sc} , I_m , V_m)

Los parámetros que caracterizan el funcionamiento de una celda solar son:

- Corriente de corto circuito I_{sc} , que se determina de la curva I-V cuando $V = 0$; entonces

$$I_{sc} = I/v_{-0} = - I_{ph} \quad (2)$$

- Voltaje de circuito abierto V_{oc} , que se determina cuando $I = 0$. Entonces

$$V_{oc} = v / I_{-0} = \frac{AKT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (3)$$

De acuerdo con la teoría de difusión de **Schottkley** (1950), I_0 está dado por:

$$I_0 = qN_cN_v \left\{ \exp(-E_g / KT) \right\} \left(\frac{L_n}{n_n} + \frac{L_p}{P_p \tau_p} \right) \quad (4)$$

Donde N_v y N_c son las densidades de estados en la banda de valencia y conducción respectivamente, L_n , L_p , n_n , p_p , τ_n , τ_p , son, la longitud de difusión, las densidades y los tiempos de vida de los electrones y huecos respectivamente.

- Factor de llenado, FF , definido a través de la relación

$$FF = \frac{V_M I_M}{V_{oc} I_{sc}} \quad (5)$$

- Eficiencia de conversión η , definida como:

$$\eta = \frac{\text{Potencia de salida de la celda}}{\text{Potencia de la radiación incidente}} = \frac{V_M I_M}{P}$$

Entonces:

$$\eta = V_{oc} \times I_{sc} \times FF / P \quad (6)$$

3. Evolución de la eficiencia de dispositivos fotovoltaicos

Las metas fijadas en conferencia de Cherry Hill para el período 1973 - 1993 fueron cumplidas con éxito; en la fig 4 se muestran la evolución que dicho en periodo de tiempo tuvo la eficiencia de conversión de celdas solares de Si y de capa delgada.

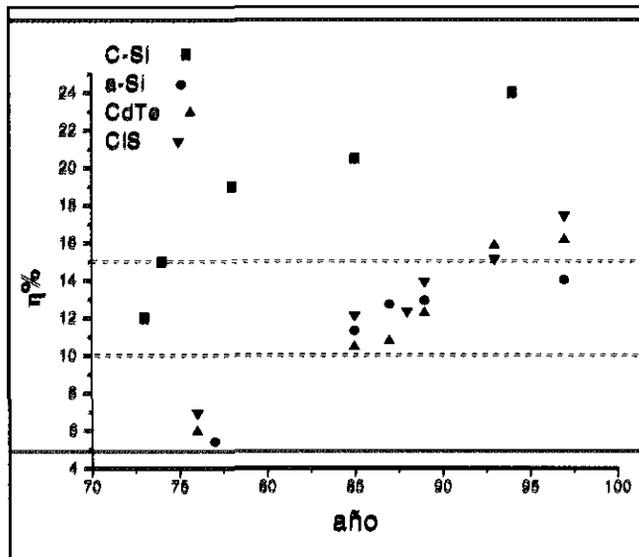


Figura 4. Evolución de la eficiencia de conversión de celdas solares basadas en Si-cristalino, Si-amorfo, CdTe y $CuInSe_2$

Los resultados de la figura 4 muestran que en los últimos 25 años se han logrado avances significativos en el incremento de la eficiencia de conversión, tanto en celdas basadas en Si-cristalino como en celdas de capa delgada.

El aumento en la eficiencia de las celdas se logró mediante introducción de nuevos conceptos en la estructura de los dispositivos y en el desarrollo de métodos modernos de preparación de materiales. A continuación se describe brevemente algunos hechos importantes que incidieron en el incremento de la eficiencia de dichas celdas solares.

a) En celdas solares de Si-cristalino

- Mediante reducción de la profundidad de la juntura P/N y del nivel de dopado, se lograron eficiencias del 15 % (Lindmayer & Allison 1993).
- Mediante la realización de texturas de forma triangular en la superficie, se logró incrementar la eficiencia al 17 %.
- Mediante la incorporación de los conceptos BSF (Back Surface Field), BSR (Back Surface Reflector) y HLE (High Low Emitter), la eficiencia se incrementó a un 19 %.
- La implementación del concepto PESC (Passivated Emitter Solar Cell) permitió incrementar la eficiencia al 20.5 % (Green et al. 1985).

- Finalmente en 1990, **M. Green** de la Universidad del Sur de Gales (Australia), logró el récord mundial del 24 % para celdas de Si-cristalino (el cual aun persiste), mediante la introducción del concepto PERL (Passivated Emitter Rear Locally Diffused). (**Wang, Zhao & Green 1990**)

b) En celdas solares basadas en películas delgadas de CuInSe_2 y Cu(InGa)Se_2

Los primeros dispositivos basados en CuInSe_2 con eficiencia mayor del 5 % fueron fabricados a mediados de la década del 70 por coevaporación de Cu, In y Se sobre un sustrato de Mo. Estas se realizaron con una estructura tipo heterojuntura de $\text{CdS/CuInSe}_2/\text{Mo}$. El límite del 10 % en eficiencia fue superado por las firmas Boeing y Arco Solar a comienzos de la década del 80; para esto incorporaron una ventana óptica constituida por una doble capa de (ZnO/CdS) en la estructura de la celda e introdujeron una novedad en la preparación de CIS, consistente en un proceso basado en selenización de las películas metálicas (**Wang, Zhao & Green 1990**). Estas celdas tenían una estructura $\text{ZnO/CdS/CuInSe}_2/\text{Mo}$. La barrera del 15 % en eficiencia fue superado hacia 1993 por el grupo EUROCIS constituido por centros de investigación de las Universidades de Stuttgart (Alemania) y de Stockolmo (Suecia) y por el Laboratorio de Energías Renovables de USA (NREL). Para tal fin se cambió el CIS por el compuesto cuaternario Cu(InGa)Se_2 (CIGS) y se hicieron importantes innovaciones tanto en la preparación del CdS como en la estructura del dispositivo, especialmente en lo relacionado con la incorporación de una capa de acople mecánico denominada capa "buffer", a través de la cual la red del material P se acopla con la del material N sin producir tensiones mecánicas; con esto se reduce fuertemente la densidad de trampas en la interfase y con ello las pérdidas de fotocorriente, que normalmente se producen en heterojunturas P/N convencionales. Como capa buffer se utilizó una película ultradelgada (50 - 80 nm de espesor) de

CdS, depositadas por un nuevo método denominado CBD (Chemical Bath Deposition) (**Lincotetal 1995**). Esta celda solar presenta una estructura novedosa como la mostrada en la figura 5, donde tanto la capa conductora del ZnO, como la capa buffer del CdS son altamente transparentes y por lo tanto no contribuyen a la fotocorriente; solo la capa del compuesto cuaternario Cu(InGa)Se_2 (denominada capa absorbidora) es activa en el dispositivo. La incorporación de la capa de CIGS da una gran flexibilidad para escoger el gap y afinidad electrónicas óptimas del material absorbedor (**Hedstrom et al. 1993**), ya

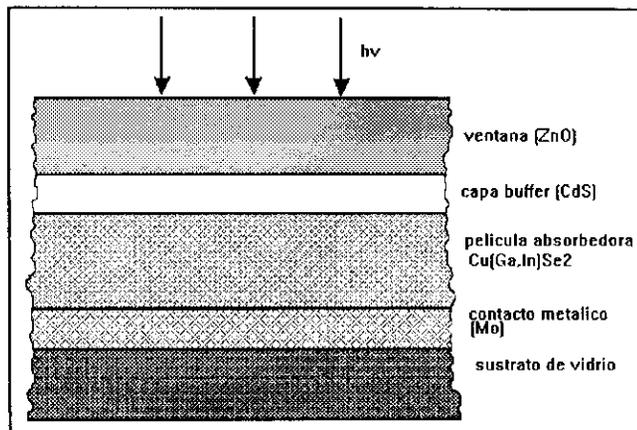


Figura 5. Estructura típica de celdas solares basadas en compuestos cuaternarios tipo Chalcopirita, con la cual se obtuvieron eficiencias mayores del 15 %.

que estas dos propiedades se pueden cambiar arbitrariamente cambiando la relación de In/Ga en la capa de CIGS.

El récord mundial en eficiencia, en celdas solares basadas en CIGS está en 17.7 % [15] y fue logrado por NREL.

En la tabla 1 se resumen los resultados más significativos obtenidos con celdas basadas en CIS y en CIGS, por grupos de investigación de universidades y de la industria.

Una limitante en la fabricación de dispositivos fotovoltaicos basados en CIGS es la necesidad de utilizar sistemas sofisticados y costosos de control del proceso de deposición del CIGS, basados en espectrometría de masas de cuadrupolo y en espectroscopia de emisión por impacto con electrones, para obtener buena calidad de los materiales y reproducibilidad de los procesos.

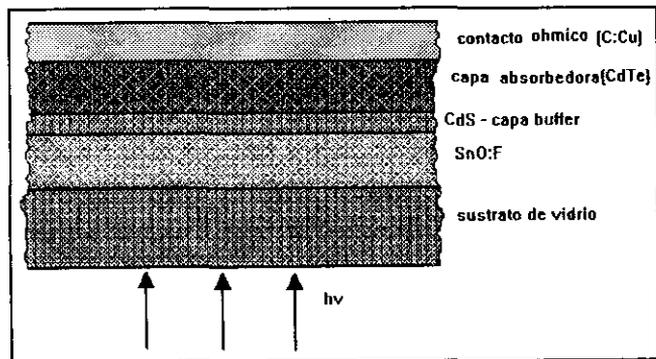
c) Celdas solares basadas en CdTe

Las actividades de investigación en celdas solares basadas en CdTe se iniciaron hace más de 30 años; sin embargo, dispositivos con eficiencias mayores del 5 % fueron registradas a finales de la década del 70 y la barrera del 10 % en eficiencia fue superada a finales de la década del 80 por la firma Kodak. Después de un receso de 10 años donde no se señalaron incrementos significativos en la eficiencia de estos dispositivos, la Universidad del Sur de la Florida (USF) logró superar la barrera del 15 % en eficiencia con celdas de CdTe, utilizando una técnica novedosa basada en el método CSS (Close Spaced Sublimation) para depositar el CdTe e incorporando una capa buffer ultradelgada (~ 50 - 80 nm) de

Tabla 1. Parámetros de celdas solares basados en compuestos tipo chalcopirita (CIS, CIGS)

Estructura de la celda	Gap (ev)	η (%)	Area (cm ²)	Laboratorio
MgF ₂ /ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se ₂	1.17	16.9	0.83	IPE/Univ.Stuttgart IM/RIT/univ.Stockolmo
ZnO/CdS/Cu(In,Ga)(Se,S) ₂	variable	15.1	3.5	Siemens
MgF ₂ /ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se ₂	1.1	13.7	0.99	Boeing
MgF ₂ /ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se ₂	1.2	17.7	0.41	NREL
MgF ₂ /ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se ₂	1.22	15.5	0.41	Solarex
ZnO/CdS/CuInSe ₂	1.02	13.9	0.72	IPE/univ.Stuttgart

CdS en la estructura de la celda para reducir las pérdidas ópticas en el CdS e incrementar la fotocorriente. Con este tipo de dispositivo la USF obtuvo a comienzos de 1993 una eficiencia del 15.8 % resultado que se mantuvo como récord mundial hasta finales de 1997, cuando el centro

**Figura 6.** Vista transversal de la estructura de una celda basada en CdTe.

de desarrollo e investigación fotovoltaica de la firma Matsushita (Japón) logro incrementarlo al 16 %.

La figura 6 muestra un diagrama esquemático de la estructura de celdas de alta eficiencia basadas en CdTe.

Una de las ventajas de las celdas de CdTe es que puede ser fácilmente fabricadas, sin utilizar equipo costoso para el control de los procesos de deposición de las diferentes capas que la constituyen. Una segunda ventaja de este tipo de celdas es que existen varios métodos de deposición de las diferentes capas que han dado buenos resultados (ver tabla 2); entre estos hay varios que no requieren plantas costosas de deposición en condiciones de alto vacío, lo cual reduce significativamente los costos de producción.

En la tabla 3 se dan datos de eficiencia de módulos de área grande fabricados con tecnología de capa delgada.

Con módulos basados en Si-cristalino se obtienen eficiencias del 15-17 %.

Tabla 2. Estado actual del desarrollo de celdas solares basadas en CdTe (escala de laboratorios)

Estructura	Método de deposición (Capa absorbidora)	η (%)	Area (cm ²)	Laboratorio
SnO ₂ /CdS/CdTe	CSS	15.8	0.02	USF
ITO/CdS/CdTe	CSS	16.0	10.02	Matsushita
SnO ₂ /CdS/CdTe	SPL	12.3	0.31	Photon Energy
SnO ₂ /CdS/CdTe	DE	14.2	0.02	BP Solar
SnO ₂ /CdS/CdTe	ALE	14	0.12	Microchemistry
(Zn,Cd)S/CdTe	SP	12.5	0.3	Korea Adv. Inst.

Tabla 3. Eficiencia obtenida con módulos fotovoltaicos de área grande.

compañía	material	Área (cm ²)	η (%)	potencia (watts)
BP solar	CdTe	706	10.1	7.1
SCI	CdTe	6728	9.1	61
SSI	CIS	3830	11.2	43.1
Matsushita	a-Si	1220	10	11

IV. Aspectos económicos

En esta sección se describirá brevemente como ha sido la evolución de precios de módulos fotovoltaicos y se mencionarán aspectos relacionados con el desarrollo de plantas fotovoltaicas del alta capacidad de generación y con proyectos pilotos de generación fotovoltaica.

En la figura 7 se indica como ha sido la evolución de precios de módulos fotovoltaicos (Maycock, sd. Barnet 1996). Se observa que durante el primer periodo, los precios cayeron drásticamente debido principalmente a reducción del costo del material precursor (silicio cristalino, grado semiconductor y Si-policristalino), a reducción del costo de fabricación de los dispositivos fotovoltaicos e incremento de la eficiencia de conversión de las celdas. Posteriormente el precio de producción de módulos decrece más suavemente lo cual es principalmente atribuido a un incremento en la demanda mundial. El precio de sistemas fotovoltaicos ha decrecido en los últimos diez años de US\$ 7/Wp a US\$ 3.5 /Wp como consecuencia entre otras cosas a un incremento significativo en la demanda mundial, que ha significado un in-

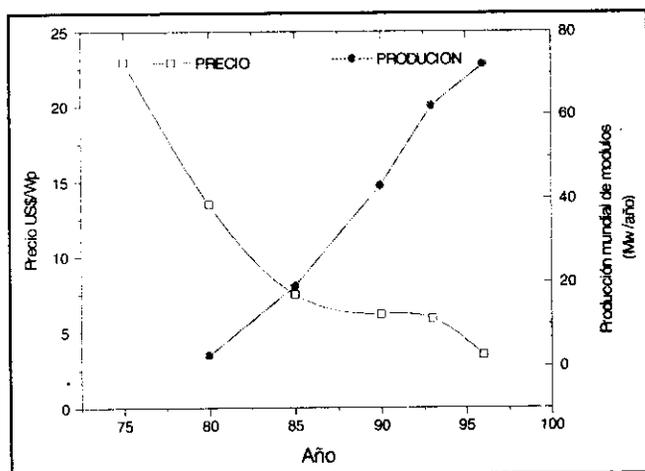
cremento en ventas de US\$ 800 millones a US \$ 10 billones /año; se piensa que el precio del vatio pico podría reducirse a US\$ 2.5 / Wp incrementando la demanda a US\$ 100 billones/año

Parte de la demanda de sistemas fotovoltaicos ha sido a través de proyectos de demostración financiados por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) y por la Comisión de Comunidades Europeas (CEC); sin embargo la mayor inversión en sistemas fotovoltaicos ha sido hecha por la industria privada; en USA, por compañías petroleras (Shell, Arcon, Exxon, Mobil, Amoco, etc.) y en otros países por compañías fabricantes de dispositivos eléctricos y electrónicos (Siemens, Sanyo, Sharp, Fuji, Matsushita, Mitsubishi).

Se estima que el precio de generación de energía fotovoltaica usando celdas de Si-cristalino, podría reducirse hasta un valor limite de US\$ 2/Wp. Por consiguiente para reducir este valor por debajo de US\$ 1/Wp que sería necesario para competir económicamente con la forma tradicional de generación de energía, habría que cambiar la tecnología tradicional de fabricación de celdas a partir de obleas de Si por la denominada tecnología ribbon/shet o a través de fabricación a gran escala de dispositivos fotovoltaicos usando materiales tales como CdTe, CIS y CIGS y tecnología de capa delgada. En la actualidad varias compañías están en proceso de expansión de sus líneas piloto y ampliando sus facilidades de manufactura de sistemas fotovoltaicos basados en tecnología de capa delgada. Golden Photon, Inc. (GPI), en Golden Col, instaló una línea de manufactura de 2 MW de sistemas PV basados en CdTe y la firma Solar Cells Incorporated (SCI) está terminando de instalar una planta con una capacidad de producción de 2 MW/año de sistemas fotovoltaicos basados en CdTe en Toledo OH.

Plantas de producción de sistemas fotovoltaicos basados en películas delgadas de CIS también fueron iniciadas recientemente. La firma Energy Photovoltaic Inc. instaló una línea de producción de 200 KW en Lawrenceville USA y la firma ISET una de 50 KW en

Figura 7. Evolución de precios y de producción mundial de módulos fotovoltaicos.



Inglewood CA. En Europa, el Centro para Energía Solar, de la Universidad de Stuttgart (Alemania) conjuntamente con Phototronics Sorlartechnik/Pustzbrunn, Alemania, están desarrollando un prototipo para producir módulos basados en CIGS de 900 cm² de área.

V. Conclusiones

Debido a que las principales fuentes primarias de generación de energía eléctrica en el mundo (hidrocarburos y fuentes nucleares) son fuentes no renovables y que el potencial hidroeléctrico tiende rápidamente a la saturación, a comienzos de la década del 70 especialistas en el tema llegaron a la conclusión de que la generación de energía eléctrica a través de la conversión fotovoltaica era una imprescindible fuente renovable de generación de energía eléctrica. Como respuesta a la decisión de estos especialistas muchos gobiernos y empresas privadas alrededor del mundo hicieron grandes inversiones para financiar investigaciones en materiales con propiedades adecuadas para fabricar dispositivos fotovoltaicos para aplicaciones terrestres.

Entre la gran variedad de materiales investigados para aplicaciones fotovoltaicas, el silicio cristalino fue el que logró un mayor y más rápido desarrollo tecnológico. A pesar de la fuerte reducción del costo de producción de sistemas fotovoltaicos y del importante incremento en el mercado mundial de sistemas fotovoltaicos, el costo de generación de energía eléctrica fotovoltaica continua siendo significativamente mayor que el costo de generación convencional. Se espera sin embargo una mejora en el nivel de competitividad cuando se presente un incremento significativo de la demanda mundial de energía fotovoltaica a medida que los precios de generación convencional se incrementen como consecuencia de la reducción de reservas de las fuentes convencionales de energía. Por otro lado se cree que la manera más expedita de conseguir un nivel de precios competitivos con el de generación convencional de energía, es mediante el desarrollo de sistemas fotovoltaicos basados en celdas solares de bajo costo fabricados con tecnología de capa del-

gada, con los cuales se espera llegar a precios del orden de US\$ 0.3 /Wp.

En la actualidad no hay una oferta en el mercado a gran escala de sistemas fotovoltaicos fabricados con tecnología de capa delgada, sin embargo varias firmas en USA y en Europa, recientemente ampliaron la capacidad de sus plantas de producción de sistemas basados en CdTe y en CIS a niveles que van de 50 KW/año a 2 MW/año.

Bibliografía

- Adams G. & R.E. Day. 1977. Proc. Royal Soc. A 25: 131.
- Barnet, A.M. 1996. 25th IEEE Photov. Spec. Conf. Washintong D.C. 1.
- Becquerel, E. 1839. Comptes Rendues 9: 561.
- Carlson, D. E. & C.R. Wronsky. 1976. Appl. Phys. Lett., 28: 671.
- Cusano, D.A. 1963. Solid State Electron 6: 217.
- Cutts T.J. & J.D. Meakings (eds). 1985. "Current topics in photovoltaics", Academic Press, Orlando.
- Chaplin, D.H., C.S. Fuller & G.L. Pearson. 1945. J. Appl. Phys. 25: 676.
- Ferekides, C. et al. 1993. Proc. 26 IEEE Photov. Spec. Conf., pp. 389.
- Green, M.A. et al. 1985. Conf. Rec. 18th IEEE Photov. Spec. Conf., Las Vegas (USA) pp. 61.
- Hedstrom J. et al. 1993. 23 rd. IEEE Photov. Spec. Conf., Louisville, (USA).
- Kazmerski, L., F.R. White & G.K. Morgan. 1976. Appl. Phys. Lett., 29: 268.
- Lincotetal, D. 1995. 13th Photovoltaic Solar Energy Conf., Nice pp. 178.
- Lindmayer J. & Allison. 1993. COMSAT Tech. Rev. 3: 1.
- Maycock, P.D. S.d. PV News, Yearly Febr.-Issues; PV Energy Systems, Inc., Casanova (VA, USA).
- Ohyama, H. et al. 1997. Proc. 26 th. IEEE Photov. Spec. Conf. pp. 389.
- Reynolds D.C. et al. 1954. Phys. Rev. 96: 533.
- Schottkley, W. 1950. "Electron and holes in semiconductors," Van Nostrand, New York.
- Wang, A., J. Zhao & M.A. Green. 1990. Appl. Phys. Lett. 57: 602-604.
- Zweibel, K., H.S. Ullal, & B. Von Roeden. 1997. 26th IEEE Photov. Spec. Conf. Anaheim (USA). In press.