

DESARROLLO DE CELDAS SOLARES DE SILICIO CRISTALINO CON JUNTURA DIFUNDIDA

C.G. BOLZI, G.L. VENIER, J.C. PLÁ, C.J. BRUNO, A. LAMAGNA y J.C. DURÁN

COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
DEPARTAMENTO FUENTES RENOVABLES Y USO RACIONAL DE LA ENERGÍA
AVDA. LIBERTADOR 8250 - 1429 BUENOS AIRES
E-mail: duan@cnea.edu.ar

Se presenta el estado actual del desarrollo de celdas solares de silicio monocristalino con juntura difundida en la División Energía Solar (DES) de la CNEA. Se describe el proceso de fabricación utilizado y las características eléctricas de los dispositivos fotovoltaicos obtenidos. Se obtuvieron celdas con eficiencias máximas de alrededor del 11%, tensión de circuito abierto de $580mV$ y corriente de cortocircuito de hasta $32mA/cm^2$.

The state of the art of monocrystalline silicon solar cells with diffused junctions in the Solar Energy Division of the National Atomic Energy Commission (CNEA) is presented. The elaborating process as well as the electrical characteristics of the photovoltaic devices obtained are described. Cells with maximum efficiencies of about 11%, open circuit voltages of $580mV$ and short circuit currents of $32mA/cm^2$ were obtained.

Introducción

La División Energía Solar (DES) del Departamento Fuentes Renovables y Uso Racional de la Energía de la CNEA está llevando a cabo un proyecto de investigación y desarrollo de la tecnología de elaboración de celdas solares a partir de obleas de silicio monocristalino. Este proyecto está orientado a lograr en el país la puesta a punto del proceso correspondiente a celdas convencionales, y a realizar tareas de investigación y desarrollo en celdas solares de silicio de alta eficiencia.

Las celdas solares convencionales están constituidas básicamente por un semiconductor extrínseco (típicamente, *Si* tipo *p*) con emisores frontal (*Si* n^+) y posterior (*Si* p^+) fuertemente dopados. El proceso de elaboración utilizado consta esencialmente de tres etapas: generación de las junturas pn^+ y pp^+ en horno de difusión, depósito de los contactos frontal (tipo grilla) y posterior por evaporación en cámara de vacío, y aplicación de un tratamiento superficial antirreflectante (texturado superficial de la oblea y depósito de capas

dieléctricas).

La caracterización eléctrica (corriente de cortocircuito, tensión de circuito abierto, eficiencia, etc.) de las celdas solares elaboradas se realiza mediante lámpara de tungsteno, utilizando una carga electrónica. Se presentan los resultados obtenidos y se los compara con simulaciones teóricas.

Elaboración de las junturas

La elaboración de las junturas frontal y posterior se puede realizar mediante dos procesos alternativos: difusión o implantación iónica. En este trabajo se presentan las experiencias realizadas con el primero.

Existen diversas técnicas de difusión y distintos tipos de fuentes.¹ La difusión en dos pasos es una de las técnicas más empleadas en la fabricación de dispositivos fotovoltaicos para la elaboración de la juntura pn^+ .^{2,3} Se inicia con una predeposición que consiste en una difusión por burbujeo a través de una fuente líquida de $POCl_3$ por un período relativamente corto. A continuación, la muestra de *Si* es so-

metida a un recocido a alta temperatura (redistribución o "drive-in") en ambiente inerte u oxidante durante un tiempo apropiado.

Se utilizaron obleas tipo *p*, dopadas con boro, de dos procedencias: (i) cortadas de un lingote crecido en la DES mediante la técnica Czochralski, con resistividades entre 5 y 10 Ωcm , y (ii) comerciales, con resistividades en tres intervalos diferentes (0,72–1,08 Ωcm ; 4,5–6,0 Ωcm ; 6,8–9,2 Ωcm). Previo a la generación de las juntas, se someten las muestras a una rigurosa limpieza basada en solventes, pulido químico mediante una solución de ácidos y limpieza MOS (empleada en la elaboración de dispositivos metal-óxido-semiconductor).⁴

El proceso completo utilizado es el descrito en Ref. 2. El mismo consta esencialmente de tres etapas. La primera (predeposición) se realiza a aproximadamente 850 C y puede subdividirse, a su vez, en tres pasos: aporte de dopante por burbujeo durante 10 min, oxidación y, finalmente, un corto recocido en ambiente de nitrógeno. Posteriormente, se realiza la evaporación en cámara de vacío de una capa de *Al* de alrededor de 1 μm de espesor en la cara posterior de la muestra. La tercer etapa consiste en un recocido ("drive-in"), típicamente de 3 horas a 1050 C, que produce una redistribución de dopantes. Dado que el *Al* posee un coeficiente de difusión en *Si* mucho mayor que el *P*, la última etapa elimina la junta *pn*⁺ de la cara posterior, generando una *pp*⁺ y dando lugar, finalmente, a un dispositivo *n*⁺*pp*⁺.

Se realizaron numerosas experiencias a fin de chequear la repetibilidad del proceso de difusión en horno y de analizar la correlación entre los parámetros del mismo y las características de la zona *n*⁺ obtenida.⁵

Depósito de contactos

El depósito de los contactos se realizó por evaporación en cámara de vacío, por ser ésta la técnica más apropiada a nivel de laboratorio. Se trabajó en ambas caras del dispositivo con una multicapa de titanio-paladio-plata (*Ti* – *Pd* – *Ag*), con un espesor total entre 0,5 y 1,5 μm .

La elaboración de la grilla de contacto frontal se realiza por evaporación sucesiva de las capas mencionadas a través de máscaras metálicas o máscaras de fotorresina impresas por fotolitografía. Los anchos típicos de líneas de contacto depositadas al presente mediante esta última técnica son de aproximadamente 100 μm . Se ha demostrado la factibilidad de trabajar, con las condiciones actuales del laboratorio, hasta dimensiones del orden de 30–40 μm , aunque aún no en forma repetitiva y confiable.

Tratamientos antirreflectantes

Se utilizan alternativamente dos tipos de tratamientos antirreflectantes: texturado superficial^{6,7} o capa dieléctrica.

El texturado aleatorio de la superficie se realiza mediante un ataque químico básico anisótropo con una solución diluida de *KOH* que contiene alcohol isopropílico.⁷ Las muestras se caracterizaron mediante métodos ópticos (medición de la reflectividad global en función de la longitud de onda) y con microscopio electrónico de barrido. En particular, se observaron pirámides con dimensiones típicas entre 3 y 10 μm , coincidentemente con lo citado en la bibliografía.

Se realizaron depósitos de capas dieléctricas antirreflectantes (en particular, *SiO*) por evaporación, sobre obleas con la junta difundida y sin texturado superficial. Se hicieron también algunas pruebas combinando ambas técnicas (capa antirreflectante sobre superficie texturada).

Actualmente, se está realizando la puesta a punto de un equipo de vacío apto para el depósito de multicapas con control óptico de espesores, el cual permitirá el depósito de multicapas complejas.

En colaboración con el Depto. de Física de la CNEA se realizaron las primeras pruebas de celdas solares con capa antirreflectante de material símil diamante ("diamond-like").

Resultados y conclusiones

La caracterización eléctrica de las celdas solares elaboradas se realiza mediante iluminación con radiación solar y con lámpara de filamento de tungsteno de 250W con reflector dicróico. La curva corriente-tensión ($I - V$) del dispositivo se obtiene mediante la carga electrónica y el sistema de adquisición de datos desarrollado en la DES.⁸

Se ha logrado una razonable repetibilidad en las características de las celdas, con valores de tensión de circuito abierto (V_{ca}) entre 540 y 580mV, densidad de corriente de cortocircuito (J_{cc}) entre 22 y 32mA/cm², factor de llenado (FF , "fill factor") entre 0,60 y 0,76, y eficiencias (η) con valores máximos entre 10 y 11%.

Las celdas elaboradas a partir de obleas comerciales en los tres rangos de resistividad ρ_b utilizados muestran buena correlación entre la tensión de circuito abierto V_{ca} y ρ_b , según lo esperado teóricamente. En cambio no se observa aún una clara dependencia de la densidad de corriente de cortocircuito J_{cc} con la resistividad. En la Tabla 1 se dan algunos valores típicos de V_{ca} para los tres rangos de resistividades y se los compara con valores teóricos obtenidos con el programa de simulación unidimensional PC-1D.⁹ Esta comparación debe considerarse como preliminar dado que diversos parámetros utilizados en la misma (en particular, velocidades de recombinación superficial y longitud de difusión de portadores minoritarios) aún no han sido medidos, por lo cual fue necesario utilizar valores estimados.

TABLA 1: VALORES EXPERIMENTALES MÁXIMOS Y TEÓRICOS DE LA TENSIÓN DE CIRCUITO ABIERTO, V_{ca} , PARA TRES RANGOS DE RESISTIVIDADES DE LA BASE.

ρ_b (Ωcm)	V_{ca} mV	V_{ca} teór. mV
0,72-1,08	580	606
4,50-6,00	550	560
6,80-9,20	530	549

Cabe destacar que con los niveles de repetibilidad y confiabilidad de los procesos alcanzados hasta el presente, la optimización teórica de la profundidad de juntura y de la grilla de contacto no resultan aún demasiado importantes, debido a que su variación introduce efectos poco apreciables frente a las dispersiones producidas por otros parámetros todavía no totalmente controlados. De todas maneras, se está trabajando en simulación teórica y diseño de dispositivos y contactos, ya que ello permite sacar conclusiones y evaluar parámetros característicos de los dispositivos fabricados.

La Fig. 1 muestra, a modo de ejemplo, las curvas $J - V$ de tres celdas, elaboradas por difusión, con capa antirreflectante (curvas a y b) y texturada (curva c). La curva (a) corresponde a una de las celdas con mejor eficiencia, mientras que las (b) y (c) corresponden a las de mejor factor de llenado.

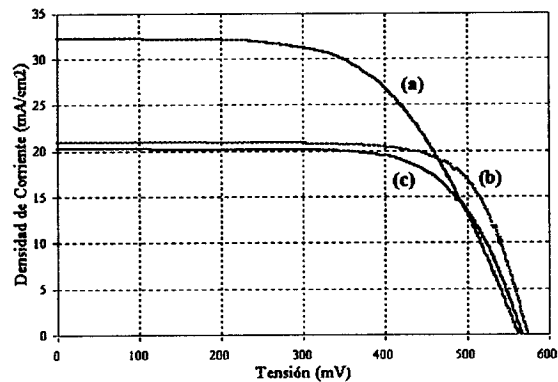


Figura 1: Curvas $J - V$ de tres celdas elaboradas por difusión: (a) y (b) con capa antirreflectante, y (c) texturada.

Los parámetros característicos de las curvas $J - V$ graficadas en la Fig. 1 se dan en la Tabla 2.

TABLA 2: PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LAS CELDAS CORRESPONDIENTES A LA FIG. 1.

Celda	V_{ca} (mV)	J_{cc} (mA/cm ²)	FF	η
(a)	563	32	0,60	10,8
(b)	579	21	0,74	8,9
(c)	568	20	0,70	8,0

Si bien las eficiencias alcanzadas son aún relativamente bajas, los avances logrados en poco más de dos años (desde que se completó el equipamiento mediante la instalación del horno de difusión) resultan alentadores, especialmente teniendo en cuenta las fuertes limitaciones presupuestarias y las condiciones aún no apropiadas de los laboratorios en los que se están llevando a cabo las actividades.

Agradecimientos

Los autores agradecen a A. Boselli, L.M. Merino, G. Azzaroni, A. Frigerio, E.M. Godfrin, E. Campitelli, H. Rojo, E. Mezzabolta, F. Alvarez y N. Di Lalla por su participación en diferentes etapas del proyecto, a J.A. Moraes por el apoyo brindado durante el desarrollo del mismo, y a H. Huck y J. Orecchia por el depósito de las capas antirreflectante del tipo "diamond-like".

Asimismo, desean mencionar la colaboración brindada en los comienzos del proyecto por profesionales y técnicos, en particular su Director, I. Chambouleyron, F. Marques y M.I. Romeiro, del Laboratorio de Investigación Fotovoltaica de la Universidad del Estado de Campinas, Brasil, concretada mediante una estadía de formación de uno de los autores (C.G.B.) en dicho laboratorio. Finalmente, los autores agradecen muy especialmente la continua colaboración "a distancia" de A. Cuevas.

REFERENCES

1. S. Ghandhi, "VLSI Fabrication Principles Silicon and Gallium Arsenide", J. Wiley & Sons (1983).
2. A. Cuevas, Proc. 6th. International Photovoltaic Science and Engineering Conf. (PVSEC-6), Nueva Delhi, India, pág. 267 (1992).
3. J.M. Gee et al., DOE/Sandia Crystalline PV Technology Project Review Meeting, SAND12-1454, pág. 74 (1992).
4. J. Ruzyllo, R. Novak, "Semiconductor Cleaning Technology/ 1989", The Electrochemical Society (1990).
5. M.G. Martínez Bogado et al., "Elaboración y caracterización de juntas para celdas solares de silicio cristalino", Anales AFA 6 (1994).
6. C.R.R. Baranoa y H.W. Brandhorst, Proc. 11th. IEEE Specialists' Conf. EE.UU. de A., pág. 44 (1975).
7. D.L. King y M.E. Buck, Proc. 22nd. IEEE Photovoltaic Specialists' Conf., EE.UU. de A., pág. 303 (1991).
8. Azzaroni et al., Actas de la 15a. Reunión Nacional de Energía Solar y Fuentes Alternativas (ASADES), Catamarca, Argentina, pág. 527 (1992).
9. D.T. Rover, P.A. Basore y G.M. Thorson, Proc. 17th. IEEE Photovoltaic Specialists' Conf., EE.UU. de A., pág. 703 (1985).

CEILAP
CITEFA - CONICET
ZUFRIATEGUI Y VARELA
1603 VILLA MARTELLI
REPUBLICA ARGENTINA