

Estudio de la capa p de una celda solar de silicio amorfo: efecto del espesor

Pablo F. J. de León, R. H. Buitrago, R. D. Arce, R. R. Koropecski
Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química
(UNL-CONICET)

Güemes 3450, 3000 Santa Fe

TE: (42)-559190 – FAX: (42)-550944 – e-mail:rbuitre@intec.unl.edu.ar

Departamento de Física, Facultad de Ingeniería Química, UNL,
Santiago del Estero 2829, 3000 Santa Fe.

TE: (42)-527670

Resumen

En celdas solares tipo *pin* fabricadas con espesores variables en sus capas p , pero con idénticas condiciones de deposición en las capas restantes y en la junta $p-i$, se estudió el comportamiento de parámetros tales como eficiencia, factor de llenado, voltaje a circuito abierto, corriente de cortocircuito y respuesta espectral, obtenidos de medir las curvas corriente-tensión (a oscuras y bajo iluminación) y fotocorriente en función de la longitud de onda. Se encontró que al aumentar el espesor de la capa p disminuyen la corriente de cortocircuito (aumento de la resistencia serie de la celda), la eficiencia y el factor de llenado. El voltaje a circuito abierto presenta un máximo para un espesor entre 150 y 200 Å, mientras que el comportamiento de la respuesta espectral corrobora lo anterior y da a la vez una idea de la calidad del material activo (silicio amorfo hidrogenado)

1 Introducción

La estructura convencional de una celda solar que usa como material semiconductor de base al silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H) es la siguiente[1]:

$$\text{vidrio}|\text{TCO}|a - \text{SiC} : \text{H}(B)|a - \text{Si} : \text{H}|a - \text{Si} : \text{H}(P)|\text{metal}$$

en la que vemos que sobre un vidrio que sirve de soporte y ventana frontal, se depositan cinco capas sucesivas de materiales en forma de láminas delgadas. La primera es un óxido transparente conductor (TCO), luego un carburo de silicio amorfo dopado con boro (a-SiC:H(B)), sigue una lámina de silicio amorfo intrínseco (a-Si:H), una de silicio amorfo dopado con fósforo (a-Si:H(P)) y finalmente una metálica. Esta estructura se identifica con la sigla "pin". Entre las cinco capas la que presenta mayores dificultades en su deposición y optimización es la "p", en este caso el carburo de silicio dopado con boro.

Es una capa crítica por su incidencia en la eficiencia global de la celda, debe acoplar sin generar barreras dos interfases muy diferentes: primero con el TCO y luego con el a-Si:H. Debe ser ópticamente transparente, eléctricamente conductora y tener un nivel de Fermi lo suficientemente próximo a la banda de valencia.

La adopción de carburos como material de la capa p obedece al hecho de que controlando el contenido de carbono se controla el ancho de la banda prohibida y su índice de refracción[2, 3]. Mediante la incorporación de boro vía diferentes compuestos gaseosos se modifica su resistividad en varios órdenes de magnitud, teniéndose que buscar siempre un valor de compromiso entre el valor de la banda prohibida, la conductividad y la transparencia[4, 5].

En este proceso de optimización el espesor de la capa p juega un papel clave en el diseño del dispositivo solar; debe ser suficientemente grueso para presentar las propiedades de volumen y suficientemente fino para ofrecer baja resistencia serie y mínima absorción de luz.

El objetivo de este trabajo es estudiar el efecto del espesor de la capa p en el comportamiento electroóptico de una celda. Se realizan mediciones de las curvas características corriente-tensión I-V (a oscuras y bajo iluminación), de respuesta espectral, discutiendo qué mediciones son las más apropiadas para su caracterización.

2 Experimental

Sobre vidrio Corning 7059 recubierto de óxido de estaño dopado con flúor, provisto comercialmente por la firma Asahi Inc., se depositaron las tres capas semiconductoras en un reactor de descarga luminescente (glow discharge) construido en nuestros laboratorios. En la deposición de la capa p se utilizó como gases reactivos silano, metano y diborano. El plasma se excitó con radio frecuencia de 13 MHz, la presión total fue de 920 μbar y la temperatura de sustrato 180 $^{\circ}\text{C}$. La capa metálica se depositó en un equipo de alto vacío evaporando una lámina de plata de aproximadamente 1 μm de espesor. Las celdas se definen mediante una máscara con agujeros de 2 mm de diámetro uniformemente distribuidos.

A los efectos de estudiar la influencia del espesor de la capa p en el comportamiento de las celdas, se diseñó un obturador especial para que en una misma experiencia sea posible depositar varias celdas que tengan todas su capas iguales y sólo difieran en el espesor de la capa p . Este obturador permitió depositar en una sola experiencia cuatro grupos de celdas, regulando sus espesores mediante la medición del tiempo de deposición.

Las mediciones de curvas I-V y de respuesta espectral se realizaron con una lámpara de tungsteno, colocando la muestra sobre un portamuestra especialmente diseñado, utilizando contactos de cobre-berilio de punta cónica. Las curvas I-V se relevaron a oscuras y bajo iluminación ($100 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$), polarizando la celda con tensiones de -0,1 V a 1,0 V y midiendo la fotocorriente obtenida en cada caso. Para la respuesta espectral se utilizó luz monocromática ($\Delta\lambda < 9 \text{ nm}$) proveniente de un monocromador, con una potencia lumínica entre 10^{-4} a $10^{-1} \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$, barriendo el rango entre 440 y 800 nm con la celda en cortocircuito.

3 Resultados

Se prepararon dos series de celdas variando el espesor de la capa p y manteniendo exactamente igual el resto de la celda. En la serie a los espesores fueron 100, 150, 200 y 300 Å; en la b , 400, 800 y 1600 Å.

En la figura 1 se muestran las curvas (I-V) para cada serie de celdas a oscuras. Estas curvas son el promedio de 12 celdas de aproximadamente $3,14 \text{ mm}^2$ de área por espesor de la capa p .

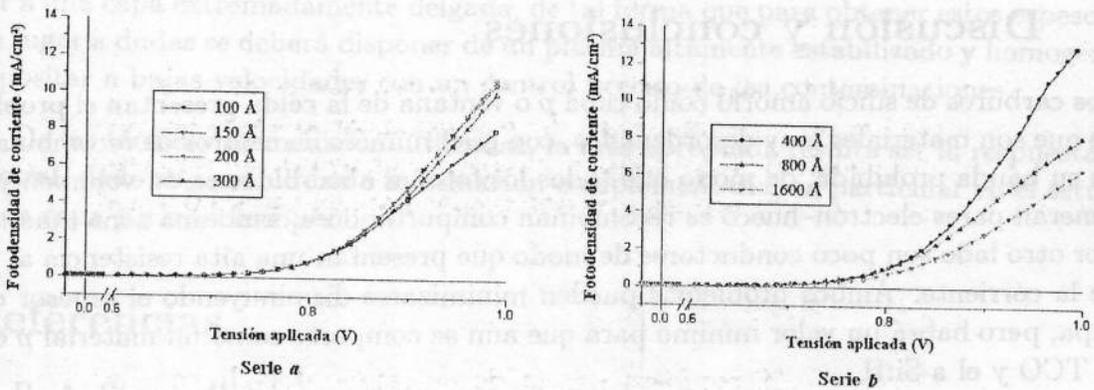


Figura 1: Curvas I-V de las celdas a oscuras

En la figura 2 se presentan las curvas corriente-tensión bajo iluminación de una lámpara de tungsteno con intensidad de $100 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$. En estas curvas también se puede apreciar la variación del factor de llenado (FF) [1, 6] con el cambio de espesor: la cuadratura de la curva I-V iluminada es menor para las celdas de mayor espesor.

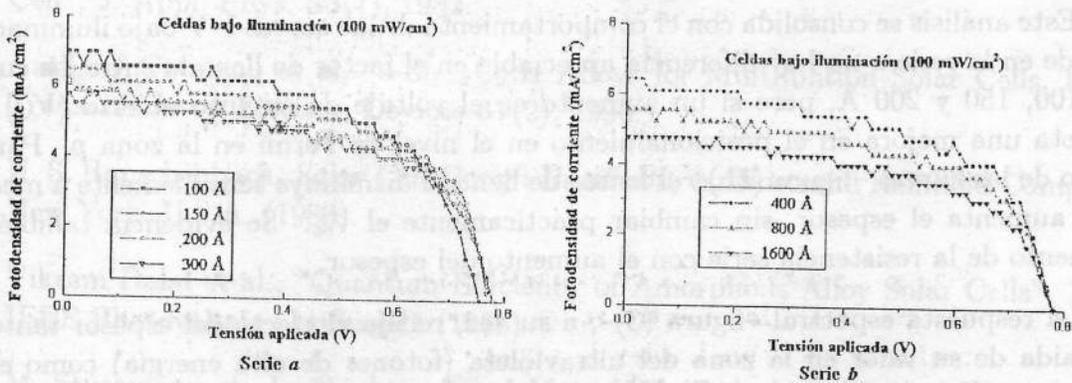


Figura 2: Curvas I-V para las dos serie bajo iluminación

Para completar el estudio se midió la respuesta espectral de las celdas [7], iluminando las mismas con luz monocromática por la cara frontal (lado del TCO). Los resultados obtenidos se muestran en la figura 3 para ambas series.

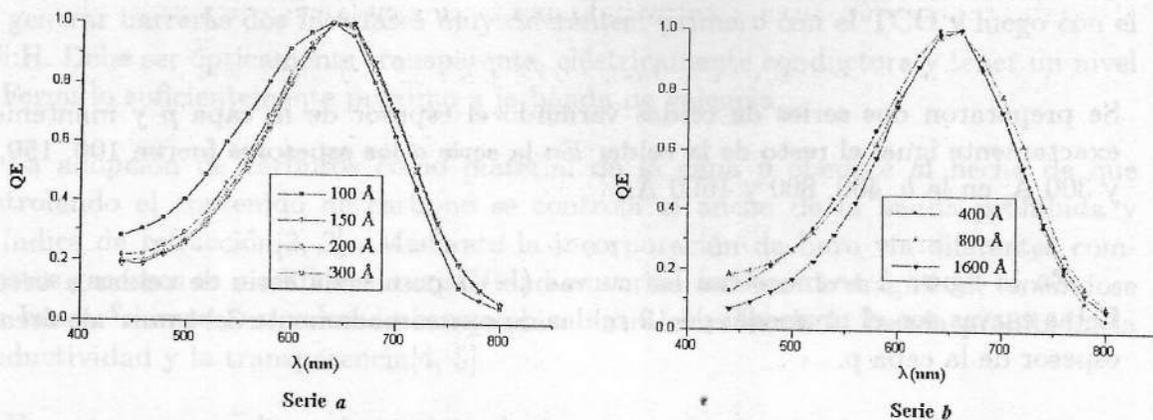


Figura 3: Respuestas espectrales de las dos series de celdas

4 Discusión y conclusiones

Los carburos de silicio amorfo como capa p o ventana de la celda presentan el problema de que son materiales muy desordenados, con gran número de centros de recombinación en su banda prohibida, de modo que todos los fotones absorbidos en su volumen y que generan pares electrón-hueco se recombinan comportándose como una zona muerta[8]. Por otro lado son poco conductores de modo que presentan una alta resistencia al paso de la corriente. Ambos problemas pueden minimizarse disminuyendo el espesor de la capa, pero habrá un valor mínimo para que aún se comporte como un material p entre el TCO y el a-Si:H.

En la figura (1) podemos observar esto último. Para un espesor de 100 Å, la capa p no muestra aún propiedades de volumen; sus propiedades están controladas por los estados superficiales de ambas caras. Entre 150 y 200 Å, al dar valores coincidentes, el comportamiento eléctrico indica que el nivel de Fermi se ha localizado en la capa p . Se puede apreciar luego una tendencia neta de las curvas a separarse en la zona de altos voltajes, tanto en la celda de 300 Å de la serie a como en todas las de la serie b . Esta apertura indica un aumento gradual de la resistencia en serie de la celda, proporcional al espesor de la capa p .

Este análisis se consolida con el comportamiento de las curvas I-V bajo iluminación, donde en la serie a no hay diferencia apreciable en el factor de llenado entre las curvas de 100, 150 y 200 Å, pero sí un aumento en el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) que denota una mejora en el posicionamiento en el nivel de Fermi en la zona p . Para el resto de las curvas –figura (1b)– el factor de llenado disminuye sensiblemente a medida que aumenta el espesor, sin cambiar prácticamente el V_{oc} . Se evidencia también el aumento de la resistencia serie con el aumento del espesor.

La respuesta espectral –figura (3)–, a su vez, refleja el efecto del espesor tanto en la caída de su valor en la zona del ultravioleta (fotones de alta energía) como en el infrarrojo (fotones de baja energía). Es consistente con que una capa de 100 Å aún las propiedades intrínsecas del carburo no controlan el transporte eléctrico, sino recién después de 150 Å de espesor. A partir de los 200 Å, tanto la absorción de fotones energéticos como la resistencia serie, crecen disminuyendo netamente la eficiencia cuántica en la zona de ultravioleta hasta el visible. Se puede ver, además, una disminución del

área abarcada por la curva, confirmando una merma en la eficiencia global de la celda.

La respuesta espectral con su máximo después de 600 nm y con mínimos antes de 400 nm indica que el material ópticamente activo (a-Si:H) de la celda *pin* no es de buena calidad[9], hecho que también se ve en que la mejor eficiencia de conversión de estas celdas en condiciones AM1 fue de 3,2 %.

Este resultado fue verificado comprobándose a posteriori que la degradación de las propiedades del a-Si:H se debían a la presencia del obturador en medio del plasma de RF. Éste produce una alteración en las características del mismo, dando un material con gran número de defectos.

Podemos resumir diciendo que este trabajo comprobó lo sensible que es el comportamiento eléctrico de una celda solar al espesor de su capa *p*. El valor óptimo para el caso de carburos de silicio amorfo dopados con diborano está entre 150-200 Å, dando lugar a una capa extremadamente delgada, de tal forma que para obtener estos espesores, sin lugar a dudas se deberá disponer de un plasma altamente estabilizado y homogéneo, depositar a bajas velocidades con un control preciso de las contaminaciones.

De las técnicas de medición utilizadas, la más apropiada resulta ser la respuesta espectral, dado su sensibilidad e información complementaria, en particular en el estudio de la capa *p* e interfase *p-i*.

Referencias

- [1] R. A. Street, *Hydrogenated Amorphous Silicon*, Cambridge University Press, U.K. 1991.
- [2] Y. Catherine et al, "Reactive Plasma Deposited $\text{Si}_x\text{C}_y\text{H}_z$ films", *Thin Solid Films* **60**, 1979.
- [3] Mark A. Petrich et al, "Structure and Properties of Amorphous Hydrogenated Silicon Carbide", *Phys. Rev. B* **36**(18), 1987.
- [4] Y. Tawada et al, "Properties and Structure of a-SiC:H for High-efficiency a-Si Solar Cell", *J. Appl. Phys.* **53**(7), 1982.
- [5] Anthony Catalano et al, "a-Si_{1-x}C_x:H Alloys for Multijunction Solar Cells, *IEEE Transactions on Electron Devices* **37**(2), 1990.
- [6] H. S. Rauschenbach, *Solar Cell Design Handbook*, vanNostrand Reinhold Company, New York, U.S.A. (1980).
- [7] Vikram Dalal et al., "Quantum Efficiency of Amorphous Alloy Solar Cells", 18th. *IEEE Photovoltaic Conference* (1985)
- [8] M. Stutzmann et al., "Light-induced Metastable Defects in Hydrogenated Amorphous Silicon: A Systematic Study", *Phys. Rev. B* **32**(1), 1985.
- [9] E. S. Sabinsky, "Status fo Research on the Light-induced Effect in a-Si Materials and a-Si Solar Cells", *J. Non-Cryst. Solids* **87**, 1986.