DEGRADACION POR PULSOS DE CORRIENTE DEL CONTACTO METAL-SEMICONDUCTOR DE CELDAS SOLARES DE SILICIO

I. Perez-Quintana, A. Martel y L. Hernández, Facultad de Física, Universidad de La Habana, Cuba

RESUMEN

Este trabajo reporta un estudio comparativo de la degradación del contacto metal-semiconductor en dos diferentes tipos de contactos de celdas solares de silicio: contactos de Ti/Pd/Ag depositados por evaporación térmica al vacío y contactos serigráficos de Al/Ag. Con el objetivo de acelerar la degradación, se emplearon ciclos térmicos de calentamiento-enfriamiento, los cuales se simularon experimentalmente por inyección de pulsos de corriente. Se midió a intervalos de tiempo regulares la característica volt-ampérica de cada celda y utilizando el modelo de doble exponencial, se calcularon los parámetros fundamentales de ambos tipos de celdas. Se demuestra con la aplicación de pulsos de corriente en el tiempo examinado, que excepto el V_{oc} todos los parámetros de la celda con contactos evaporados, se degradan en el tiempo examinado. Especial énfasis se hace en el estudio de los contactos: la celda con contactos serigráficos prácticamente no sufre degradación de sus parámetros.

ABSTRACT

This work accomplishes a comparative study of metal-semiconductor contact degradation on two different types of silicon solar cells contacts. One of them was a thermally vacuum-evaporated Ti/Pd/Ag contact, and the other one was a screen-printed contact of Al/Ag. An experimental and theoretical methodology was applied in order to study the degradation due to periodic hot/cool switching and knowledge about all fundamental parameters from I-V characteristics of both types of solar cells was obtained. The periodic hot/cool process was carried out by current pulses and the double exponential model of I-V characteristic was used to acquire all fundamental parameters of the solar cells. We found that except the V_{oc} all fundamental parameters of Ti/Pd/Ag contact cell, were degraded with the application of current pulses in the time studied. The screen-printed contacts were degraded more smoothly than the thermally vacuum-evaporated front contacts of Ti/Pd/Ag.

1. INTRODUCCION

En este trabajo, se aplica una metodología teórico-experimental que permite estudiar los mecanismos de falla que la degradación de los contactos metal/semiconductor provocan en celdas solares sometidas a procesos cíclicos de calentamiento-enfriamiento, que podrían ser en la práctica consecuencia de un día nublado. Debido a las diferencias entre los coeficientes de dilatación térmica del semiconductor y del metal, estos ciclos térmicos provocan la pérdida de la calidad de los contactos en el dispositivo, limitando con ello la potencia de salida del mismo y la eficiencia de la conversión fotovoltáica.

Una descripción bastante completa de la característica I-V se puede representar mediante el modelo de dos diodos. En este modelo, la corriente de difusión y la corriente de recombinación en la región de carga espacial, se representan por medio de dos diodos con comportamientos exponenciales diferentes y resulta estar más estrechamente relacionado con los fenómenos físicos internos de las celdas solares. También se incluyen las resistencias series y paralelo más la corriente inducida por la luz. El modelo expresa la relación I-V, para una temperatura e intensidad luminosa dadas, mediante la ecuación implícita:

$$I(V) = I_L - I_d\left[\exp\frac{q(V+I.R_s)}{n_d kT} - 1\right] - I_r\left[\exp\frac{q(V+I.R_s)}{n_r kT} - 1\right] - \frac{V+I.R_s}{R_{sh}} \qquad (1)$$

La fotocorriente I_L es generada por una fuente de corriente y fluye a través de los diodos, de la resistencia paralelo R_p, de la resistencia serie R_s y de la carga. En este modelo, I_d es la corriente de difusión de Shockley que incluye la recombinación y arrastre de portadores en las regiones casi-neutrales de la juntura y la corriente I_r corresponde a la recombinación de portadores vía niveles profundos en la zona de carga espacial de la juntura y en la superficie del dispositivo. Los otros parámetros clásicos, n_d y n_r, son los factores de idealidad de los diodos para la corriente de difusión y la corriente de recombinación, respectivamente.

Se ha demostrado que los valores de los parámetros de la celda solar calculados mediante un modelo de doble exponencial, se corresponden bien con los medidos [1-3].

En trabajo precedente [4,5], nosotros desarrollamos una metodología para degradar los contactos metal-semiconductor por medio de pulsos de corriente y buscar la influencia de las resistencias serie y paralelo en el marco de diferentes modelos analíticos. En particular, aplicamos el modelo de doble exponencial junto con la técnica para la determinación de la resistencia serie sugerida por Rajkanan y Schewchum [6]. Esta técnica, emplea los resultados de las mediciones en condiciones de oscuridad e iluminación, para obtener el valor de la resistencia serie. La determinación de la resistencia paralelo, se hace empleando las expresiones reportadas en la referencia [7].

2. DETALLES EXPERIMENTALES

Se procesaron dos tipos de celdas solares de silicio monocristalino con las siguientes características en los contactos:

- celda solar con contactos depositados por evaporación térmica al vacío (Celda1).
- celda solar con contactos serigráficos de Al/Ag (Celda 2).

La celda solar con contactos depositados por evaporación térmica al vacío, fue una celda tipo n^+ - p, a partir de una oblea típica de silicio monocristalino de tres pulgadas de diámetro, con resistividad de 1.5 Ω-cm.

La celda solar con contactos serigráficos, también fue una celda tipo n^+-p, elaborada a partir de una oblea típica de silicio de 10 cm x 10 cm de área, con resistividad de 1 Ω-cm.

Para evitar los efectos de los factores ambientales sobre las corrientes de fuga, se hizo un aislamiento eléctrico de la celda solar, sellando las celdas con etil-vinil-acetato luego de fijarla sobre fibra de vidrio como soporte, donde se colocaron también los bornes para los contactos frontal y posterior de la celda. Ambos tipos de celdas fueron así encapsuladas de modo tal que, para monitorear la temperatura, se colocó un termopar de cromel-alumel en buen contacto térmico con la superficie posterior de cada una de las celdas.

Para aplicar los pulsos de corriente a las celdas, se hizo circular con polarización en directa, una corriente equivalente a 10 veces la corriente de corto circuito a 100 mW/cm^2, condición que se mantuvo todo el tiempo de estudio. Estos pulsos se obtuvieron aplicando corriente al circuito durante 5 minutos, seguidos de otros 5 minutos sin corriente. Para esto se utilizó un dispositivo **On/Off** o **Timer** con periodo de 5 minutos. En este régimen de pulsos, la temperatura estacionaria se incrementaba en 30°C/3°C por encima de la temperatura ambiente en condición de on/off, respectivamente.

De manera sistemática, se midieron las dependencias funcionales entre la corriente y el voltaje (características I-V) en la celda bajo condiciones de iluminación.

Una medición completa se alcanzaba dentro del rango de tiempo de un minuto y la temperatura de la celda se mantuvo constante en un rango de ± 0.5 °C. Las características I-V en oscuridad, se obtuvieron polarizando la celda en directa con una fuente reguladora de potencia. Se realizaron mediciones sistemáticas de la eficiencia cuántica interna espectral de cada celda, usando una lámpara GS0895 a 100 mW/cm^2, un amplificador lock-in y filtros interferenciales para longitudes de onda desde 350 nm hasta 1100 nm.

Se empleó un método iterativo para resolver la ecuación 1 con el objetivo de estudiar la correspondencia entre los valores que se obtienen ajustando esta ecuación a los parámetros experimentales. Los valores medidos del voltaje a circuito abierto (V_{ca}), la corriente de cortocircuito (I_{cc}) y las condiciones de potencia óptima (P_o), fueron utilizados en la solución iterativa. Además, se supuso n_d = const. y n_r = const., por lo que fueron necesarias sólo cinco ecuaciones iterativas para resolver la ecuación 1. Cuatro de ellas son las expresiones explícitas para I_L, I_d, R_p y R_s y la quinta ecuación a partir de:

$$I(I_r, V_o) - I_o = 0 \qquad (2)$$

Donde V_o, I_o son los valores experimentales de voltaje y corriente en el punto de máxima potencia (P_o). Se simuló una curva I-V con el propósito de reproducir los valores experimentales. Se extrajeron los parámetros I_r, I_d, n_r y n_d, los que se usaron para generar el conjunto de curvas I-V que permitió encontrar los valores ajustados para cada parámetro. En todos los casos, los valores de los parámetros medidos de R_s, V_{ca}, I_{cc} y el factor de llenado FF no discrepan más del 1 % de aquellos obtenidos por el ajuste de la curva.

En la evaluación de estos parámetros ajustados, I_L se mantuvo constante dado que la eficiencia cuántica interna espectral de ambas celdas, no varió con la aplicación de los pulsos en todo el tiempo examinado.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

De la Figura 1 vemos que la característica I-V de la celda1 no se modificó por la acción de los pulsos de corriente. La celda 2 hasta los 7000 pulsos aplicados no cambia su característica I-V, pero cuando los pulsos superan este valor, se reduce: la pendiente de la curva a altos valores de voltaje (incremento de R_s), el área bajo la curva (decrece el FF) y la I_{cc}.

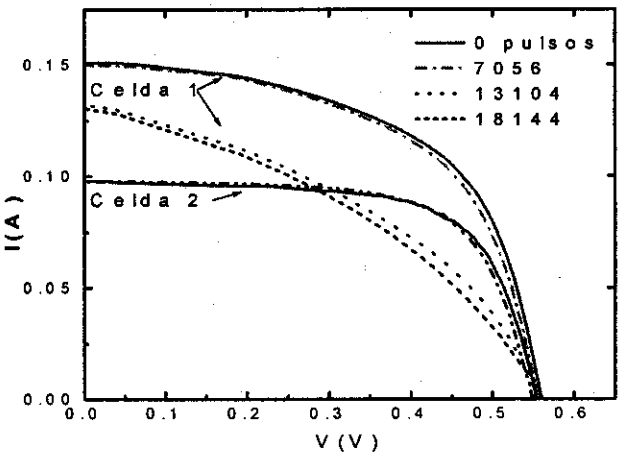

Figura 1. Variación de las características I-V como función del número de pulsos de corriente aplicados a ambas celdas solares: Celda1 con contacto de Ti/Pd/Ag y Celda2 con contactos serigráficos de Al/Ag.

De la Figura 2 vemos que la máxima diferencia en el V_{ca}, antes y después de los pulsos, en ambas celdas no supera el 1%, es decir, los pulsos de corriente no afectan las propiedades físicas del volumen, lo que está apoyado en que la eficiencia cuántica interna espectral de ambas celdas, no varió con la aplicación de los pulsos en todo el tiempo examinado. La I_{cc} de la celda2 no se modificó por la acción de los pulsos de corriente: Para la celda1, por encima de los 7000 pulsos aplicados el valor de I_{cc} se reduce en un 15% y arriba de los 13000 pulsos la disminución es menos fuerte, tendiente a una saturación. El incremento de la resistencia serie asociado a la pérdida de adherencia de los contactos, provoca la reducción de la I_{cc}.

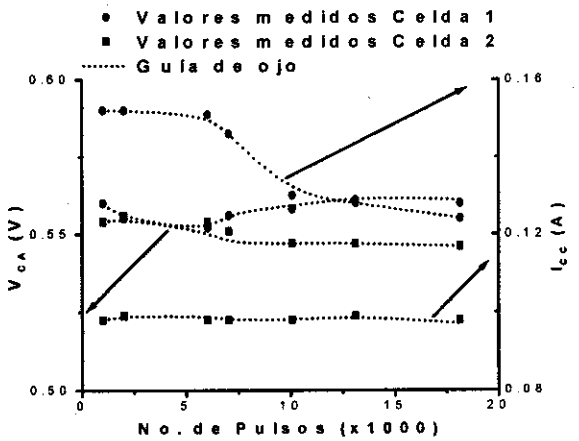

Figura 2. Variación del V_{ca} y la I_{cc} como función del número de pulsos de corriente aplicados a ambas celdas solares: Celda1 con contacto de Ti/Pd/Ag y Celda2 con contactos serigráficos de Al/Ag.

De la Figura 3 vemos que la máxima diferencia en el FF y por ende en la eficiencia de conversión de la celda2, no supera el 1%, es decir, los pulsos de corriente no afectan las propiedades físicas del dispositivo a pesar de que se observa un ligero incremento de la R_s. La R_s de la celda1 crece continuamente hasta triplicar su valor inicial por la acción de los pulsos de corriente y por encima de los 7000 pulsos aplicados, el incremento de la resistencia de contacto es más fuerte. El aumento de la resistencia serie asociado a la pérdida de adherencia de los contactos, se hace evidente en la fuerte reducción del FF de la celda1. La disminución de los valores de I_{cc} y FF provocan una disminución notable de la eficiencia de conversión.

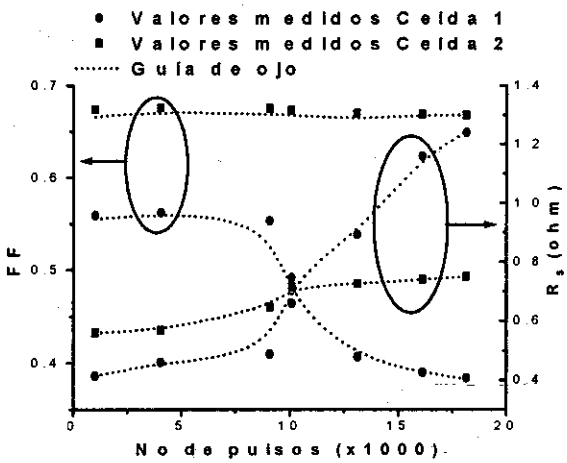

Figura 3. Variación del FF y la Rs como función del número de pulsos de corriente aplicados a ambas celdas solares: Celda1 con contacto de Ti/Pd/Ag y Celda2 con contactos serigráficos de Al/Ag.

4. CONCLUSIONES

Nosotros encontramos que excepto el V_{ca} todos los parámetros fundamentales de la celda con contactos de Ti/Pd/Ag depositados por evaporación térmica al vacío, se degradan con la aplicación de los pulsos de corriente en el tiempo examinado. En la celda con contactos serigráficos de Al/Ag, los pulsos de corriente no afectan las propiedades físicas del dispositivo a pesar de que se observa un ligero incremento de la R_s.

Debido a la diferencia de conductividad térmica entre los contactos metálicos y el silicio semiconductor, los ciclos térmicos causan la degradación de los contactos metal-semiconductor de la celda solar. La pérdida de la adherencia metal-semiconductor por los pulsos de corriente, incrementa la resistencia de contacto tanto frontal como posterior y provoca un crecimiento de la resistencia serie del dispositivo.

Se demostró que con la aplicación de pulsos de corriente, la degradación del contacto es el único factor que deteriora la eficiencia de la celda solar. Se comprobó que para reproducir los valores experimentales de los parámetros eléctricos por ajuste según doble exponencial, es válido suponer que los valores de corriente de difusión y recombinación no cambian con la degradación de los contactos, pues el método empleado no degrada a la unión, volumen, etc. En ambas celdas se mantiene la correspondencia entre los valores experimentales de las curvas I-V y los calculados por el modelo de doble exponencial.

REFERENCIAS

1. CHARLES, J.P.; G. BORDURE; A. KHOURY and P. MIALHE (1985): "Consistency of double exponential model with the physical mechanisms of conduction for solar cells under illumination", **J. Phys. D., Appl. Phys**.18:2261-2268.

2. CHARLES, J.P.; I. MEKKAQUI-ALAQUI; G. BORDURE and P. MIALHE (1985): "A critical study of the effectiveness of the single and double exponential models for I-V characterization of solar cells", **Solid-St Electronics** 28(8):807-820.

3. ENEBISH, N.; D. AGCHBAYAR; S. DORJKHAND; D. BAATAR and I. YLEMJ (1993): "Numerical analysis of solar cell current-voltage characteristics", **Sol. Energy Mater. & Solar Cells** 29:201-208.

4. HERNANDEZ, L.; I. PEREZ-QUINTANA and A. MARTEL (1996): "Modification of fundamental parameters in the silicon solar cells by current pulses", **Sol. Energy Mater. & Solar Cells** 44: 367-373.

5. PEREZ-QUINTANA, I.; L. HERNANDEZ and A. MARTEL (2001): "Comparative Study of Metal-Semiconductor Contact Degradation by Current Pulses on Silicon Solar Cells with Two Contact Types", **Solid State Electronics** 45(12):2017-2021.

6. RAJKANAN, K. and J. SHEWCHUN (1979): "A better approach to the evaluation of the series resistance of solar cells", **Solid-St Electron** 22(2-E):193- 197.

7. CHARLES, J-P.; M. ABDELKRIM; Y.H. MUOY and P. MIALHE (1981): "A practical method of analysis of the current-voltage characteristics of solar cells", **Solar Cells** 4:169-178.