Células solares orgánicas basadas en P3HT/PCBM

Organic solar cells based on P3HT/PCBM

G. Del Pozo^(*), B. Romero, B. Arredondo, A. Gutiérrez-Llorente

Departamento de Tecnología Electrónica, Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología, Universidad Rey Juan Carlos, C/ Tulipán s/n, 28933, Móstoles, Madrid, Spain.

^(*) Email: gonzalo.delpozo@urjc.es

Recibido / Received: 15/09/2011. Revisado / Revised: 21/10/2011. Aceptado / Accepted: 27/10/2011.

RESUMEN:

En este trabajo se presentan resultados preliminares sobre la fabricación y caracterización electro-óptica de células solares orgánicas basadas en mezcla (*blend*) de un polímero conjugado poly(3-hexylthiophene) (P3HT) y un derivado del fullereno 1-(3-methoxycarbonyl)-propyl-1-1-phenyl-(6,6)C61 (PCBM). La estructura fabricada es ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al. La capa activa de los dispositivos fabricados se ha depositado a partir de disoluciones en clorobenceno con dos concentraciones distintas (2% y 4% en peso) y secadas a diferentes temperaturas (25°C y 150°C). Todas las muestras se han fabricado con un ratio 1:1 entre los materiales P3HT:PCBM. Se han caracterizado los dispositivos tanto prístinos como después de haber sido sometidos a un tratamiento de recocido (*annealing*). De esta caracterización se han podido extraer parámetros como la corriente de cortocircuito, el voltaje de circuito abierto, el factor de forma y la eficiencia de los dispositivos.

Palabras clave: Células Solares Orgánicas, Annealing, P3HT, PCBM.

ABSTRACT:

In this work we present preliminary results about fabrication and electro-optic characterization of organic solar cells based on blend of the conjugated polymer poly(3-hexylthiophene) and the fullerene derivate 1-(3-methoxycarbonyl)-propyl-1-1-phenyl-(6,6)C61 (PCBM). Final layer structure is ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al. Active layer of the fabricated devices was deposited from solutions in chlorobenzene with two different concentrations (2% and 4% wt), and dried at various temperatures (25°C and 150°C). All the samples have been fabricated with a 1:1 ratio between P3HT:PCBM materials. Devices have been characterized as-cast and after an annealing treatment. Device parameters such as short circuit current, open circuit voltage, fill factor and efficiency have been extracted from these measures.

Key words: Organic Solar Cells, Annealing, P3HT, PCBM.

REFERENCIAS Y ENLACES / REFERENCES AND LINKS

- [1]. International Energy Agency IEA, World Energy Outlook, Paris (2010).
- [2]. A. Jäger-Waldau, *PV Status Report 2011*, European Commission, Scientific and Technical Research Series (2011).
- [3]. *Global Market Outlook for Photovoltaics until 2015*, A. Scheuermann Edt., EPIA, European Photovoltaic Industry Association (2011).
- [4]. M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, "Solar cell efficiency tables (version 37)", *Prog. Photovoltaics: Research and Applications* **19**, 84-92 (2011).
- [5]. <http://www.konarka.com/index.php/power-plastic/about-power-plastic/>. Access: October 2011.
- [6]. P. Waldauf, C. Brabec, C. J. Schilinsky, "Recombination and loss analysis in polythiophene based bulk heterojunction photodetectors", *Appl. Phys. Lett.* **81**, 3885-3887 (2002).

- [7]. M. S. Ryu, H. J. Cha, J. Jang, "Effects of thermal annealing of polymer: Fullerene photovoltaic solar cells for high efficiency", *Curr. Appl. Phys.* **10**, 206-209 (2009).
- [8]. R. S. Rittberger, N. S. Sariciftci, F. Padinger, "Effect of postproduction treatment on plastic solar cells", *Adv. Funct. Mater.* **13**, 85-88 (2003).
- [9]. Y. Kim, S. Cook, S. M. Tuladhar, S. A. Choulis, J. Nelson, J. R. Durrant, D. D. C. Bradley, M. Giles, I. McCulloch, C.-S. Ha, M. Ree, "A strong regioregularity effect in self-organizing conjugated polymer films and high-efficiency polythiophene:fullerene solar cells", *Nat. Mater.* **5**, 197-203 (2006).
- [10]. S.-H. Lee, J.-H. Kim, T.-H. Shim, J.-G. Park, "Effect of interface thickness on power conversion efficiency of polymer photovoltaic cells", *Electron. Mater. Lett.* **5**, 47-50 (2009).
- [11]. Konarka Technologies Inc., press release 29th November 2010.
- [12]. Heliateg GmbH., press release 26th August 2011.
- [13]. W.-H. Baek, T.-S. Yoon, H. H. Lee, Y.-S. Kim, "Composition-dependent phase separation of P3HT:PCBM composites for high performance organic solar cells", *Org. Electron.* **11**, 933-937 (2010).
- [14]. P. J. Brown, D. S. Thomas, A. Köhler, J. S. Wilson, J.-S. Kim, "Effect of interchain interactions on the absorption and emission of poly(3-hexylthiophene)", *Phys. Rev. B* **67**, 064203 (2003).
- [15]. T.-F. Guo, T.-C. Wen, G. L. Pakhomov, X.-G. Chin, S.-H. Liou, P.-H. Yeh, C.-H. Yang, "Effects of film treatment on the performance of poly(3-hexylthiophene)/soluble fullerene-based organic solar cells", *Thin Solid Films* **516**, 3138-3142 (2008).
- [16]. P. Vanlaeke, A. Swinnen, I. Haeldermans, G. Vanhoyland, T. Aernouts, D. Cheyns, C. Deibel, J. D'Haen, P. Heremans, J. Poortmans, J. V. Manca, "P3HT/PCBM bulk heterojunction solar cells: Relation between morphology and electro-optical characteristics", *Sol. Energ. Mat. Sol. C.* **90**, 2150-2158 (2006).
- [17]. D. Chirvase, J. Parisi, J. C. Hummelen, V. Dyakonov, "Influence of nanomorphology on the photovoltaic action of polymer-fullerene composites", *Nanotechnology* **15**, 1317-1323 (2004).
- [18]. C. Brabec, V. Dyakonov, J. Parisi, N. S. Sariciftci, *Organic Photovoltaics. Concepts and Realization*, Ed. Springer, pp 215 (2010).
- [19]. H. Jin, J. Olkkonen, M. Tuomikoski, P. Kopola, A. Maaninen, J. Hast "Thickness dependence and solution-degradation effect in poly (3-hexylthiophene):phenyl-C61-butyric acid methyl ester based solar cells", *Sol. Energ. Mater. Sol. C.* **94**, 465-470 (2010).
- [20]. S. Mukhopadhyaya, K. S. Narayan, D. Gupta, "Fill factor in organic solar cells", *Sol. Energ. Mater. Sol. C.* **94**, 1309-1313 (2010).

1. Introducción

En la actualidad las energías renovables están adquiriendo cada vez más importancia en la sociedad. Los combustibles fósiles son una fuente de energía limitada y contaminante, y la energía nuclear presenta cada vez más conflictos sociales debido a su potencial peligrosidad y al problema del almacenamiento de los residuos. Las energías renovables se presentan como firmes candidatas a sustituir las fuentes de energía tradicionales gracias a su carácter no contaminante y recursos ilimitados [1,2]. Dentro de estas energías, la solar fotovoltaica ha alcanzado gran popularidad gracias a su alto potencial de explotación, su bajo impacto ambiental y la fuente de recursos prácticamente inagotable que es el Sol. La cantidad de potencia fotovoltaica instalada a nivel mundial ha experimentado un aumento considerable en los últimos años, pasando de 6,98 GW instalados en

2006 a 39,53 GW en 2010. Las previsiones auguran un aumento continuado durante los próximos años, pudiendo llegar a alcanzar en 2015 entre 131,26 y 195,95 GW instalados [2,3].

Tradicionalmente la energía fotovoltaica ha estado basada, casi de forma exclusiva, en la tecnología inorgánica, con materiales de los grupos III-IV, como el GaAs o, sobre todo, el silicio, donde se han alcanzado eficiencias energéticas superiores al 25% [4]. Sin embargo, en la actualidad están emergiendo nuevas tecnologías basadas en materiales orgánicos que tratan de competir con las células solares clásicas. Estos nuevos materiales presentan una serie de ventajas frente a los inorgánicos como son: i) un gran abaratamiento de los costes de producción y ii) una mayor flexibilidad y ligereza, lo que puede llevar a la aparición de nuevas aplicaciones tecnológicas [5].

El inconveniente principal de esta tecnología es su baja eficiencia comparada con las células solares tradicionales. Un factor clave que influye en estas bajas eficiencias es la mala disociación del excitón formado tras la absorción de un fotón. Esto es debido a las altas fuerzas coulombianas que se ejercen en el interior de la capa activa. Una forma de mejorar esta disociación ha sido la fabricación de capas activas basadas en mezclas (*blends*) de dos materiales distintos. Uno de estos materiales, el donador, absorbe los fotones incidentes, promocionando un electrón a un nivel energético mayor y creando un excitón. Este excitón se separará en un electrón y un hueco al llegar a la frontera con el otro material, el aceptor.

Dos de los materiales más utilizados en las células solares basadas en mezcla, son el polímero conjugado poly(3-hexylthiophene) (P3HT) y el derivado del fullereno 1-(3-methoxycarbonyl)-propyl-1-phenyl-(6,6)C61 (PCBM) [6]. Gracias a la alineación de los niveles energéticos de estos materiales, la separación de excitones en pares electrón-huecos libres es muy efectiva en la intercara de ambos materiales.

Una técnica habitualmente empleada para aumentar la eficiencia de los dispositivos consiste en realizar un post-procesado térmico (*annealing*) [7-9]. Este *annealing* favorece la ordenación y segregación de los materiales. El tiempo y temperatura óptima del *annealing* dependen de características propias de la célula como pueden ser el espesor de la capa activa, las concentraciones de los materiales o el disolvente utilizados. Es por ello que no existe un consenso entre la comunidad científica acerca de cuáles son los parámetros más adecuados para realizar el post-procesado.

Optimizando tanto la estructura como los parámetros de fabricación de los dispositivos, se han conseguido alcanzar eficiencias de 6.8 % con dispositivos basados en P3HT/PCBM [10]. La máxima eficiencia alcanzada con células solares basadas en materiales orgánicos asciende a 8.3 %, alcanzada por la empresa *Konarka Technologies Inc.* con dispositivos de unión simple [11] y por la empresa *Heliatek GmbH* con dispositivos con estructura en *tándem* [12].

2. Técnicas experimentales

2.1. Fabricación

En este trabajo se han fabricado células solares orgánicas basadas en mezcla de los materiales P3HT/PCBM. Para los electrodos se ha utilizado óxido de estaño indio (*Indium Tin Oxide*, ITO) como ánodo y aluminio (Al) como cátodo. Una capa de Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) : poly(4-styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) se ha depositado sobre el ITO para favorecer la extracción de huecos. Todo el proceso de fabricación se ha llevado a cabo en una caja de guantes (*glovebox*) con atmósfera inerte (N₂) con niveles de O₂ y H₂O por debajo de 1 ppm.

Previo a la deposición de las capas, se procede a una limpieza del sustrato de vidrio cubierto con una capa de ITO, sobre la que se ha realizado la litografía del ánodo. La limpieza del sustrato consiste en sumergir las muestras en tres baños: agua con jabón, acetona e isopropanol. Cada uno de ellos se realiza durante 20 minutos en ultrasonidos con el fin de eliminar cualquier impureza. Después de cada baño se seca el sustrato con una pistola de N₂ y se coloca unos minutos en placa calefactora a 100°C para eliminar cualquier residuo líquido.

A continuación se deposita una capa de PEDOT:PSS mediante centrifugado (*spin coating*) a 5.000 rpm durante 30 segundos, obteniéndose un espesor aproximado de 50 nm. El secado de esta capa se realiza en horno a 110°C durante 30 minutos para eliminar restos de agua procedentes de la disolución.

La deposición de la capa activa se ha realizado a partir de dos disoluciones previamente preparadas de P3HT/PCBM disueltos en clorobenceno anhidro a concentraciones del 2% y el 4% en peso. El *ratio* entre los dos materiales, donador y aceptor, se ha mantenido fijo 1:1 para todas las muestras. La disolución se mantiene agitando en ultrasonidos alrededor de 9 horas antes de ser filtrada con un filtro de 0,45 µm. Posteriormente se deposita la capa activa mediante *spin coating* a 1000 rpm durante 30 segundos. El secado de esta capa se ha realizado a 150 °C en horno durante 30 minutos, o a temperatura ambiente (25°C) durante 12 horas con el fin de estudiar la

influencia del secado de la capa activa en las características del dispositivo.

Finalmente se deposita, dentro de una evaporadora por efecto Joule, una capa de Al en un vacío de 10^{-5} mbar obteniéndose un espesor de aproximadamente 150 nm.

El área del dispositivo final es de $0,07 \text{ cm}^2$. Antes extraer las muestras de la caja de guantes para realizar las medidas, se encapsulan los dispositivos en atmósfera de N_2 , con el fin de evitar la degradación. Finalmente, y para facilitar la caracterización eléctrica, se sueldan los contactos.

2.2. Caracterización

Para la caracterización eléctrica de las células solares se ha utilizado un analizador de parámetros de semiconductor Agilent 4155C y un generador de pulsos Agilent 41501 B SMU. Las medidas se realizan en régimen pulsado, con un ciclo de trabajo del 0,5%. Se han medido curvas corriente-voltaje tanto en oscuridad como bajo iluminación.

La zona de interés de la característica I-V es el cuarto cuadrante, donde el dispositivo funciona como célula solar. Una vez realizada la medida en iluminación se obtiene los siguientes parámetros: voltaje de circuito abierto (V_{OC}), la corriente de cortocircuito (I_{SC}), el factor de forma (FF) y la eficiencia del dispositivo (η). V_{OC} e I_{SC} se obtienen directamente de la curva I-V bajo iluminación a partir de los puntos donde la corriente es 0 (V_{OC}), o el voltaje aplicado es 0 (I_{SC}) (ver Fig. 1). Para hallar el valor de FF y de η es necesario otro punto de la curva, definido como punto de máxima potencia (P_{max}), donde el producto I por V es máximo (ver Fig. 1). La zona sombreada refleja la potencia del punto P_{max} .

El factor de forma y la eficiencia se definen como:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{SC}V_{OC}}, \quad (1)$$

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{FF I_{SC}V_{OC}}{P_{inc}}, \quad (2)$$

donde el valor de P_{inc} es la potencia de luz incidente sobre la célula. La fuente de luz

Fig. 1. Característica corriente-voltaje de una célula solar bajo iluminación. Se señalan los puntos característicos de la curva: V_{OC} , I_{SC} , y P_{max} .

utilizada ha sido una lámpara halógena de 50 W de potencia, situada a una distancia de la muestra $d=10 \text{ cm}$. Suponiendo que la iluminación es homogénea y con simetría esférica podemos calcular la densidad de energía incidente sobre la muestra y, teniendo en cuenta el área de los dispositivos, obtenemos la P_{inc} :

$$P_{inc} = \frac{P_{total}}{4\pi d^2} A, \quad (3)$$

donde A es el área del dispositivo. De este cálculo obtenemos un resultado para la densidad de potencia incidente de 400 W/m^2 y una potencia de luz incidente en el dispositivo de $2,8 \text{ mW}$.

El valor del FF , que puede variar entre 0 y 1, obtenido con la ecuación 1 nos da una idea de la cuadratura de la curva. La eficiencia viene definida por la ecuación 2 y es el parámetro más importante de una célula solar, ya que define su rendimiento.

Hay que señalar que las medidas de eficiencia que se presentan en este trabajo están subestimadas, ya que las medidas se han realizado con una lámpara halógena y no con un simulador solar, por carecer de él. Se han realizado algunas pruebas en un simulador solar calibrado con el fin de determinar la diferencia en eficiencia entre unas medidas y otras. Los resultados indican que con el simulador solar la eficiencia puede llegar a ser el doble que la medida con la lámpara halógena. A modo de comparación se presenta en la Fig. 2 dos curvas

corriente-voltaje. Una de las curvas se ha realizada bajo iluminación con nuestra lámpara halógena (densidad de potencia incidente 400 W/m^2), y la otra curva ha sido medida con simulador solar (1000 W/m^2). Se observa claramente como la corriente de cortocircuito en la medida con el simulador solar es ~ 6 veces mayor que la medida en nuestro laboratorio, a pesar de que la potencia incidente es solamente 2.5 veces mayor. Sin embargo la diferencia en la eficiencia no es tan grande (0,78% en el simulador solar, 0,51% con lámpara halógena), pues la forma de la curva no se conserva al aumentar la potencia incidente.

Es por ello que los resultados mostrados en este artículo sólo son válidos para analizar tendencias o comparaciones cualitativas entre unos dispositivos y otros y no para dar un valor exacto de la eficiencia de los dispositivos.

Después de una primera medida de las muestras prístinas se obtienen los cuatro parámetros característicos a partir de su curva bajo iluminación. A continuación las células son sometidas a un *annealing* de 2 o 3 minutos a 75°C en placa calefactora, tras lo cual se deja enfriar lentamente antes de realizar una nueva medida bajo iluminación. Tras esta medida se vuelven a realizar uno o varios *annealings* a la misma temperatura por un periodo de tiempo de entre 2 y 5 minutos dependiendo de la evolución de la eficiencia con el *annealing* de cada muestra.

La decisión de realizar varios *annealings* de corta duración, en lugar de uno más largo, viene motivada por el intento de detallar la evolución de los parámetros característicos de las células durante el proceso de *annealing*. Igualmente se ha intentado hallar el tiempo mínimo necesario para la optimización de la eficiencia de los dispositivos.

Para la caracterización del espesor y de la absorción de la capa activa se ha utilizado una muestra de control para cada dispositivo. Estas muestras han sido fabricadas en las mismas condiciones que cada célula solar pero depositando solamente la disolución de P3HT/PCBM sobre el sustrato de vidrio con ITO y secándolas en las mismas condiciones que el dispositivo completo.

Las medidas de absorción se han llevado a cabo con un espectrofotómetro Varian Cary 500 en el rango IR- visible entre 350-750 nm.

Las medidas de espesor se han realizado con un perfilómetro KLA Tencor 120.

Fig. 2. Curvas *I-V* del un dispositivo medido bajo iluminación con dos intensidades diferentes. En línea continua, medida realizada con una lámpara halógena, densidad de potencia 400 W/m^2 . En línea discontinua, medida realizada con simulador solar, densidad de potencia incidente 1000 W/m^2 .

3. Resultados

Se han fabricado un total de 4 muestras, cada una de ellas con 8 dispositivos circulares. Se han realizado dos disoluciones iniciales (2% y del 4% en peso), con el fin de obtener diferentes espesores de capa activa, y se ha usado dos temperaturas diferentes de secado de capa activa (25°C y 150°C), con el objetivo de observar las dependencias de las prestaciones del dispositivo con estos parámetros. En la tabla I se resumen los parámetros de fabricación de los dispositivos así como las medidas de espesores sobre las muestras de control correspondientes.

Tabla I
Parámetros de fabricación y espesores obtenidos para cada juego de muestras.

Parámetros\Muestra	A	B	C	D
Concentración (%)	2	2	4	4
Temperatura de secado ($^\circ\text{C}$)	25	150	25	150
Espesor (nm)	105	110	280	200

En la Fig. 3 se presentan las medidas de absorción de las muestras de control de los cuatro dispositivos fabricados. En el recuadro de esta figura se muestran las mismas medidas normalizadas al máximo de absorción del P3HT. Se puede apreciar un corrimiento hacia el rojo del máximo de absorción del P3HT en las muestras secadas a alta temperatura respecto de las secadas a temperatura ambiente. En las muestras secadas a temperatura ambiente éste se encuentra en torno a 490 nm mientras que para las muestras secadas a 150°C se desplaza hasta los 510 nm. Asimismo se observan picos vibrónicos más pronunciados (en torno a 550 nm y 600 nm) en estas muestras. Ambos fenómenos indican una mayor cristalización, y por tanto reorganización de las moléculas de P3HT en las capas secadas a 150°C [13,14]. Se ha comprobado que esta reordenación de la capa activa aumenta la cantidad de fotones incidentes absorbidos [15], aumentando la generación de excitones, y mejora la movilidad de huecos en el P3HT [16], disminuyendo las recombinaciones no deseadas. Ambas mejoras contribuyen a un aumento de la corriente de cortocircuito [17].

En la Fig. 4 se muestra un ejemplo del efecto del *annealing* sobre una curva corriente-voltaje de una de las muestras prístinas. Se ha realizado una medida sobre la muestra prístina y tras ser sometida a un post-procesado térmico a 75°C durante 3 y 6 minutos. A partir de estas curvas *I-V* se han obtenido los parámetros característicos de cada una de las muestras fabricadas. Podemos observar como los *annealings*, especialmente el primero, mejoran el comportamiento de los dispositivos. La mejora se observa especialmente en el cuarto cuadrante, principalmente en J_{sc} (donde $J_{sc} = I_{sc}/A$) y *FF*. También en el primer cuadrante (recuadro Fig. 4) se observa como la pendiente de la curva es mayor, lo cual refleja una disminución de la resistencia serie del dispositivo cuando éste es sometido al proceso de *annealing*.

En la Fig. 5(a) se muestra la evolución del V_{oc} con el tiempo de *annealing* en los cuatro tipos de muestras fabricadas. Este parámetro depende principalmente de los niveles energéticos de los materiales que forman la capa activa. Es por ello que no se observan diferencias sustanciales con

Fig. 3. Absorción de las capas depositadas correspondientes a los cuatro dispositivos fabricados. En rojo las secadas a 150°C y en azul las secadas a 25°C. Recuadro, gráficas normalizadas donde se aprecia el desplazamiento del máximo de absorción y la acentuación de hombros vibrónicos.

Fig. 4. Curvas *I-V* en la zona del cuarto cuadrante de la muestra fabricada al 2% y secada a 25°C, en su estado prístino y tras un tratamiento de *annealing*. Recuadro, curvas *I-V* en el rango (-0.5V, 2V).

los parámetros de fabricación, concentración y temperatura de secado. Del mismo modo no existe una clara tendencia con el *annealing*. Las pequeñas diferencias entre las muestras pueden ser debidas a diferencias en la resistencia paralelo de los dispositivos [18].

La corriente de cortocircuito, Fig. 5(b), es un parámetro más sensible a los parámetros de fabricación del dispositivo. Está influido principalmente por el espesor de la capa activa. Por un lado, este espesor debe ser suficientemente grande como para absorber la mayor cantidad de fotones posible. Por otro lado, espesores demasiado grandes afectan negativamente a la disociación de los excitones, ya que aumenta el camino que tienen que

recorrer éstos para alcanzar los electrodos, aumentando las recombinaciones entre electrones y huecos en la capa activa. En la Fig. 5(b) se observa una gran diferencia entre las muestras fabricadas al 2% y al 4%. Estas últimas tienen espesores entre 200 nm y 280 nm, mientras que las primeras tienen espesores alrededor de 100 nm. Estos resultados coinciden con los de otros autores que simulan el comportamiento de J_{sc} con el espesor de la capa activa. Para muestras con estructura similar a la nuestra se obtienen mejores resultados en los dispositivos de capa activa gruesa (alrededor de 250 nm) que en dispositivos de capa activa delgada (alrededor de 100 nm) [19]. En las medidas de absorción de la Fig. 3, se observa como la muestra con mayor espesor (280 nm) es la que presenta mayor absorción. Sin embargo la J_{sc} no es mayor que la de la muestra de 200 nm de espesor. Probablemente esto es debido a que el espesor es demasiado grande y empiezan a ser importantes los fenómenos de recombinación. Además, como se ha comentado, observando las curvas de absorción (Fig. 3) vemos que el pico de absorción del P3HT en la muestra secada al aire (280 nm) se encuentra en torno a 490 nm y los hombros vibrónicos están poco marcados. Esto nos indica que las moléculas del polímero se encuentran en un estado desorganizado, por lo que la movilidad de los portadores de carga es menor que la de la muestra de 200 nm. Para las muestras con menor espesor (105-110 nm) se observa claramente que la secada a 150°C presenta unos valores de J_{sc} , FF y η muy bajos. Esto es debido a algún problema en la fabricación del dispositivo, por lo que los resultados de J_{sc} no son válidos para realizar una comparación. Comparando los resultados entre las muestras secadas a temperatura ambiente observamos como la muestra con mayor espesor (280 nm) tiene mayor J_{sc} . El espesor de la muestra más fina (105 nm) no es suficiente para absorber la mayor parte de los fotones incidentes, con la consiguiente falta de excitones producidos.

Respecto al proceso de *annealing* del dispositivo se observan diferencias dependiendo de la temperatura de secado de la capa activa durante el proceso de fabricación del dispositivo. El secado de la capa activa a altas temperaturas influye en la organización del P3HT de manera

similar al proceso de *annealing* del dispositivo final. Es por ello que los valores de la corriente varían más con el tratamiento de *annealing* en las muestras que han sido secadas a temperatura ambiente (símbolos huecos), en comparación con las que han sido secadas a 150°C (símbolos llenos), debido a que las primeras se encuentran en un estado más desorganizado al comienzo de las medidas.

El factor de forma para las 4 muestras, así como su evolución con el *annealing* se puede observar en la Fig. 6(a). Un FF pequeño ($<0,5$) refleja una mala forma (forma en S) de la característica I-V. Algunos autores apuntan a que evaporaciones muy rápidas del cátodo influyen negativamente en la calidad de la intercara entre éste y la capa activa, lo que hace disminuir el factor de forma [20]. En algunos casos el *annealing* puede mejorar la forma de la característica corriente-voltaje, lo que provoca un aumento del FF . En nuestro caso las muestras que más han mejorado el FF con el *annealing* han

Fig. 5. (a) V_{oc} en función del tiempo de *annealing*. (b) Evolución de J_{sc} con el tiempo de *annealing*.

Fig. 6. (a) Evolución del FF en función del tiempo de *annealing*. (b) Evolución de la eficiencia de los dispositivos con el tiempo de *annealing*.

sido las fabricadas al 2%, independientemente de la temperatura de secado de la capa activa.

Las mayores eficiencias de los cuatro tipos de dispositivos fabricados se han obtenido con las células de 200 nm de espesor, que se corresponden con las que provienen de la disolución al 4% y secadas a 150°C, y que son las que tienen los mayores valores de J_{SC} y de FF simultáneamente. Las muestras de 280 nm tienen eficiencias menores, lo cual coincide con los resultados obtenidos por otros autores, que obtienen máximos de eficiencias para los dispositivos con espesores de capa activa entre 160 nm y 220 nm [19]. Estos dispositivos han alcanzando un valor de 0,6% tras ser sometidos a un proceso de *annealing* de 7 min a 75°C.

4. Conclusiones

Se han fabricado células solares orgánicas basadas en la mezcla P3HT/PCBM, con distintos espesores y diferentes temperaturas de secado de la capa activa. Los dispositivos han sido sometidos a una serie de post-procesados térmicos de corta duración (2-7 min) y a baja temperatura (75°C). Las mayores eficiencias que se han alcanzado son del 0,6 % tras un calentado de 7 min para las muestras fabricadas al 4% y secadas a 150°C, cuyo espesor es de 200 nm.

Se ha comprobado como la temperatura de secado de la capa activa influye en las características del dispositivo. Un secado a alta temperatura tiene un efecto similar a un post-procesado con temperatura. Las medidas de absorción realizadas muestran una mayor ordenación de la capa activa en las muestras secadas a 150°C, lo cual favorece la absorción de fotones incidentes y aumenta la movilidad de los huecos, lo cual se traduce en un aumento de la corriente de cortocircuito.

El tratamiento de *annealing* mejora el FF especialmente en las muestras que presentan una mala forma de las curvas en su estado prístino. Se cree que este aumento es debido a una mejora en la intercara entre la capa activa y el cátodo de Al.

Agradecimientos

Los autores agradecen a M. Clement y J. Olivares por las medidas de perfilometría. Este trabajo ha sido financiado por los proyectos S2009/ESP-1781 y URJC-CM-2010-CET-5173 financiados por la Comunidad Autónoma de Madrid y la Universidad Rey Juan Carlos.