

TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA DE SEMICONDUCTORES ORGÁNICOS: FABRICACIÓN DE DISPOSITIVOS EN AULAS DOCENTES

J. PUIGDOLLERS, C. VOZ, I. MARTIN, A. ORPELLA, M. VETTER Y R. ALCUBILLA
*Departamento de Ingeniería Electrónica. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de
Telecomunicación de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña*

Abstract. En este artículo se describe el proceso de fabricación y caracterización de diodos en capa delgada utilizando semiconductores orgánicos. Los procesos y equipos utilizados son lo suficientemente sencillos como para poder ser implementados en asignaturas docentes.

1. Introducción

Los trabajos de laboratorio en las asignaturas de dispositivos electrónicos consisten en general en la simulación o caracterización eléctrica de dispositivos comerciales. Difícilmente se aborda en dichas prácticas la fabricación real de dispositivos electrónicos activos. Como mucho se fabrican elementos pasivos, tales como resistencias o condensadores. Las razones son obvias, para la fabricación de dispositivos electrónicos, tales como diodos o transistores, se necesitan equipos de proceso que en la mayoría de los casos no existen ni en los propios grupos de investigación de las universidades.

En la actualidad, la mayoría de los dispositivos comerciales se fabrican utilizando semiconductores inorgánicos. No obstante, en los últimos años ha habido un gran interés en la obtención de dispositivos utilizando semiconductores orgánicos para su aplicación en equipos electrónicos flexibles. Existe una gran cantidad de semiconductores orgánicos que, con carácter general, pueden dividirse en dos grandes grupos atendiendo a su estructura química: polímeros, formados por cadenas de monómeros, y oligómeros, formados por una o unas pocas moléculas. La obtención de capas delgadas de dichos semiconductores es diferente según estemos tratando con polímeros o con moléculas pequeñas. Para los polímeros el proceso usual de depósito es a partir de la técnica conocida como spin-coating. El polímero se disuelve en un disolvente orgánico y a continuación se deposita sobre un sustrato. Posteriormente se hace rotar el sustrato a gran velocidad, distribuyéndose todo el líquido sobre su superficie. Con este proceso se consiguen capas delgadas con buena uniformidad. Por el contrario, los semiconductores orgánicos en pequeña molécula se depositan mediante evaporación térmica en cámaras de vacío. Con ambas tecnologías es posible obtener dispositivos con notables propiedades eléctricas.

En este artículo describiremos la fabricación de dispositivos utilizando procesos tecnológicos simples que pueden realizarse en equipos relativamente económicos. Los dispositivos se fabricarán utilizando semiconductores orgánicos de pequeña molécula. El pentaceno ($C_{22}H_{14}$), molécula consistente en cinco anillos de benceno enlazados formando una cadena aromática, es uno de los candidatos más prometedores, y será el utilizado para la fabricación de nuestros dispositivos. Los dispositivos finales tendrán dimensiones del orden de los milímetros, lo que permitirá caracterizarlos y manipularlos con cierta facilidad.

2. Esquema de la práctica

A continuación describiremos el desarrollo de una práctica de laboratorio que consistirá en la fabricación de diodos y su posterior caracterización eléctrica. Los equipos necesarios para la realización de la práctica son relativamente económicos. Con la realización de esta práctica se persiguen varios objetivos. Por una parte, los alumnos participarán activamente en la fabricación de un dispositivo activo, un diodo. Posteriormente medirán las características eléctricas de la variación de la intensidad en función de la tensión aplicada. Los resultados obtenidos se compararán con los existentes en la literatura para dispositivos similares y también con las características de diodos comerciales de silicio cristalino.

La práctica a realizar por los alumnos consistirá de los siguientes apartados:

- Descripción del proceso de fabricación. Equipos necesarios y etapas de fabricación.
- Fabricación de los dispositivos
- Medida de las características eléctricas de los dispositivos fabricados. Análisis de los resultados

A continuación se describen en detalle los diferentes apartados.

3. Descripción del proceso de fabricación

La estructura de los dispositivos fabricados se muestra en la figura 1. En la figura 1a se presenta la estructura del diodo, consistente en vidrio/ITO/pentaceno/aluminio, así como una foto con los dispositivos fabricados (figura 1b). El semiconductor orgánico, pentaceno en nuestro caso, está intercalado entre los dos electrodos, uno opaco de aluminio, y otro transparente de óxido de indio dopado con estaño (ITO-*Indium Tin Oxide*).

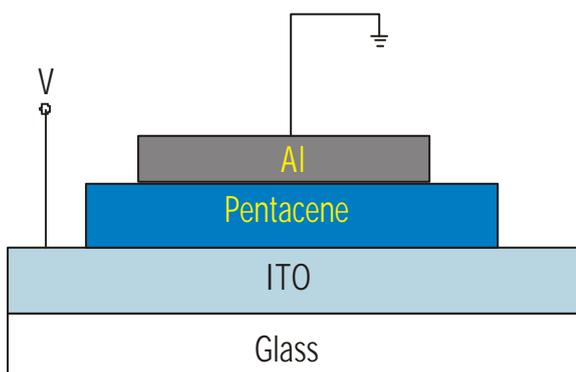


Figura 1a

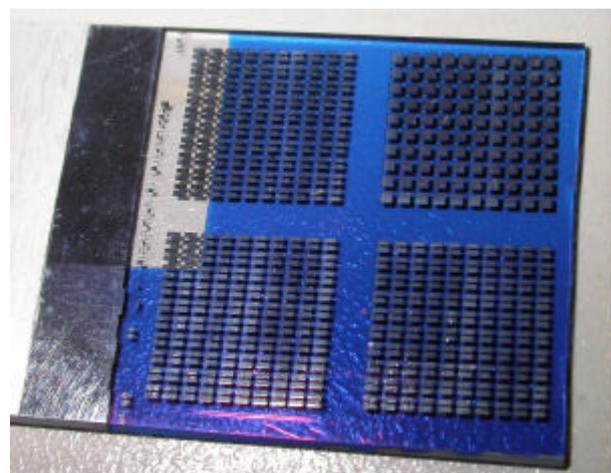


Figura 1b

Figura 1. Esquema de los diodos fabricados (Fig 1a) y fotografía de los dispositivos finales (Fig 1b).

La utilización de un óxido conductor y transparente como el ITO nos permitirá medir el dispositivo bajo iluminación. El substrato vidrio/ITO es accesible comercialmente en diferentes compañías. En nuestro caso hemos utilizado substratos proporcionados por la compañía inglesa Optical Filters (www.opticalfilters.co.uk). La capa delgada de pentaceno se deposita mediante evaporación térmica en un equipo que describiremos a continuación. El material base, pentaceno en polvo, fue proporcionado por la compañía Sigma–Aldrich (www.sigmaaldrich.com). El electrodo de aluminio fue también depositado por evaporación térmica a partir de filamento de aluminio. En nuestro caso utilizamos aluminio proporcionado por la compañía Goodfellow (www.goodfellow.com). Los nombres de las compañías se mencionan a título de ejemplo, puesto que son varias las que ofertan los diferentes compuestos.

El equipo utilizado para el depósito del semiconductor, pentaceno, y del contacto superior, aluminio, consiste de los siguientes subequipos:

- Campana de evaporación. En nuestro caso la campana de evaporación es de vidrio y de dimensiones 20 cm de diámetro de base por 25 cm de altura.
- Equipo de vacío, que consiste en una bomba mecánica en serie con una bomba turbomolecular.

En la figura 2a se muestra la campana de evaporación utilizada. También se puede observar uno de los crisoles utilizados para la evaporación de los materiales. El semiconductor orgánico y los electrodos se evaporan térmicamente utilizando crisoles moldeados manualmente a partir de una chapa de molibdeno de 50 micras de grosor. Las temperaturas de evaporación para los materiales utilizados son bastante moderadas. La temperatura de fusión para el pentaceno es de 300°C, mientras que el aluminio funde a 660°C. Para la delimitación de los contactos metálicos, el aluminio se evaporó a través de una máscara metálica a la que previamente se le habían perforado círculos de 1mm de diámetro. En la figura 2b se observa a alumnos de segundo ciclo utilizando el sencillo equipo de depósito de semiconductores orgánicos.



Figura 2a

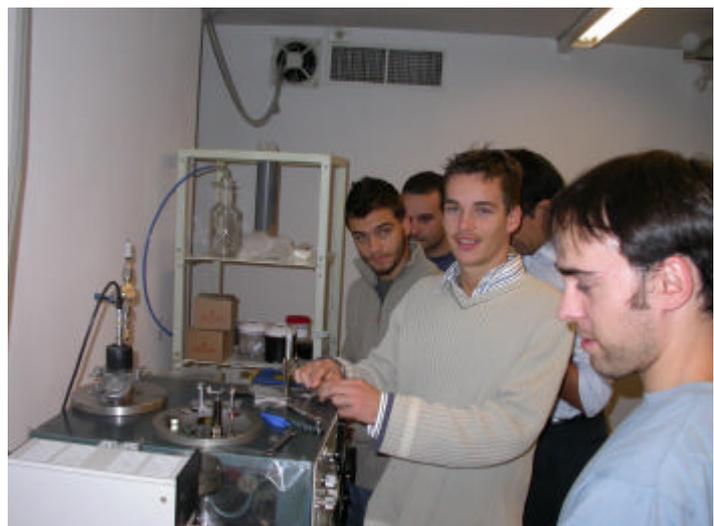


Figura 2b

Figura 2. Campana utilizada para la evaporación del semiconductor orgánico y el contacto metálico superior (a). Alumnos de segundo ciclo utilizando el equipo para el depósito de semiconductores orgánicos (b).

4. Caracterización

Una vez fabricados los diodos, se puede proceder a su caracterización eléctrica. La caracterización más básica consiste en la medida de la característica intensidad-tensión. En la figura 3 se muestra un ejemplo de las características medidas, tanto en escala lineal como semilogarítmica para apreciar la rectificación de varios órdenes de magnitud.

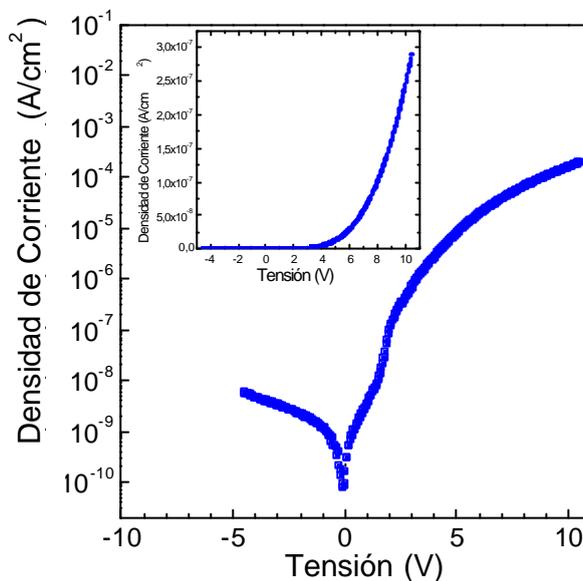


Figura 3. Característica corriente tensión de uno de los diodos de pentaceno fabricados por los alumnos.

5. Valoración

Durante el curso 2005-06, cuatrimestre de otoño se realizó una prueba piloto del desarrollo de esta práctica en alumnos que cursaban la asignatura de Dispositivos Electrónicos y Fotónicos 2, correspondiente a la enseñanza de segundo ciclo de Ingeniería Electrónica. En dicha prueba piloto participaron sólo una parte de los alumnos (8 personas). A su vez, éstos se dividieron en dos subgrupos que conjuntamente con el profesor realizaron la fabricación del diodo y su caracterización eléctrica. Los datos de la caracterización eléctrica fueron analizados por los alumnos y comparados con los datos de un diodo de silicio cristalino. Los alumnos también expusieron un trabajo de investigación en nuevos conceptos de dispositivos utilizando semiconductores orgánicos. Para ello contaron con la orientación del profesor en la búsqueda de artículos de investigación y de divulgación de las nuevas tecnologías con semiconductores orgánicos. En la figura 4 se muestra la exposición de uno de estos trabajos.

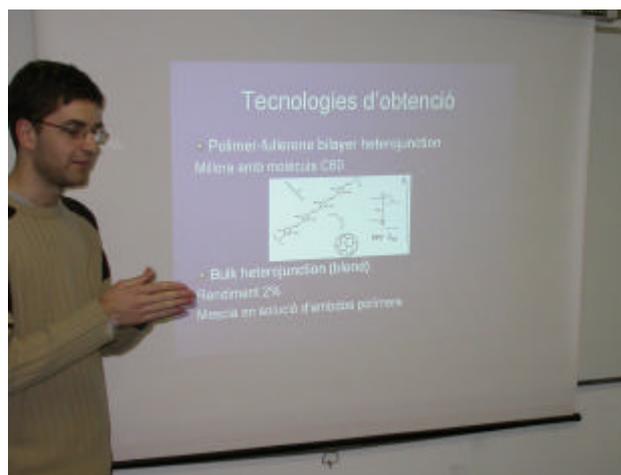


Figura 4. Alumno exponiendo aproximaciones muy novedosas para la fabricación de células solares con semiconductores orgánicos.

4. Conclusiones

La fabricación de dispositivos tales como diodos o transistores es relativamente sencilla y asumible si se utilizan materiales orgánicos como semiconductores activos. Esta aproximación permitiría la realización de prácticas de laboratorio en las que los alumnos realmente fabrican y caracterizan dispositivos. Esto permite a los alumnos participar en todo el proceso de obtención y caracterización del dispositivo, lo que se traduce en una mejor comprensión de todas las etapas involucradas. La actitud y la motivación de los alumnos en esta novedosa experiencia ha resultado excelente aunque actualmente la limitación de recursos impide su implantación definitiva para todos los grupos de la asignatura.