

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

C. VOZ, J. PUIGDOLLERS, 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 transistores en capa delgada utilizando semiconductores orgánicos. Los procesos y equipos utilizados son 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 con razonables prestaciones eléctricas 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, tales como el silicio, y sus prestaciones electrónicas son excelentes. No obstante, en los últimos años ha habido un gran interés en la obtención de dispositivos utilizando semiconductores orgánicos para su aplicación en sistemas electrónicos que requieran gran área y prestaciones electrónicas no muy exigentes. Existe una gran cantidad de semiconductores orgánicos, y la investigación en su síntesis ha realizado un gran progreso en los últimos años, siendo posible en la actualidad la síntesis de semiconductores orgánicos a la carta, es decir con propiedades predeterminadas. En general, los semiconductores orgánicos pueden dividirse en dos grandes grupos según 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 un transistor de efecto de campo en capa delgada 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, aunque también pueden utilizarse pigmentos como la ftalocianina de cobre

(CuPc) o fulereno (C_{60}). Los dispositivos finales tendrán áreas de contacto (del orden de los milímetros) suficientemente grandes para ser caracterizados y manipulados con cierta facilidad.

2. Esquema de la práctica

A continuación describiremos el desarrollo de una práctica de laboratorio que consistirá en la fabricación de transistores de efecto de campo 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 transistor. Posteriormente medirán las características eléctricas típicas de un transistor de efecto de campo: característica de salida, de transferencia y de saturación. De las características eléctricas se obtendrán la movilidad y la tensión umbral, y se compararán con los valores que se reportan en la literatura para dispositivos similares.

La práctica a realizar por los alumnos consistirá de los siguientes apartados, que a continuación se describirán en detalle:

- 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

3. Descripción del proceso de fabricación

La estructura de los dispositivos fabricados se muestra en la figura 1. En la figura 1a se presenta un esquema del transistor, consistente en vidrio/metal/PMMA/pentaceno/oro, así como una foto con los dispositivos fabricados (figura 1b). El sustrato consiste un vidrio, por ejemplo un porta objetos de microscopio, aunque también podría utilizarse un plástico o cualquier superficie suficientemente plana. A continuación se deposita por evaporación térmica una capa de metal que actuará como electrodo de puerta (*Gate*). El proceso continúa mediante el depósito de polimetil metacrilato (PMMA), polímero que realizará la función de dieléctrico. El PMMA se deposita por spin-coating con el fin de conseguir una superficie uniforme. El semiconductor orgánico, pentaceno en nuestro caso, se deposita a continuación mediante una máscara de sombra. Finalmente se deposita mediante evaporación térmica el contacto de oro, que delimitará los contactos de drenador (*Drain*) y fuente (*Source*).

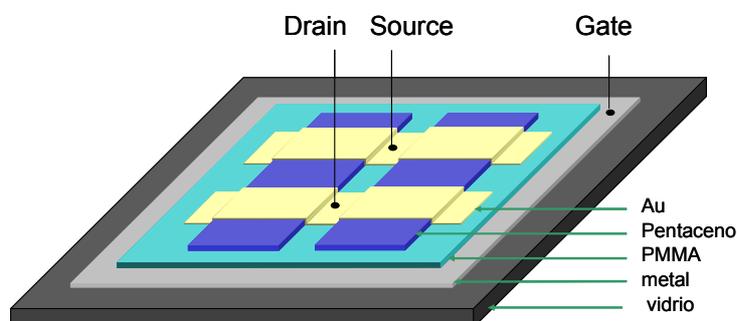


Figura 1a

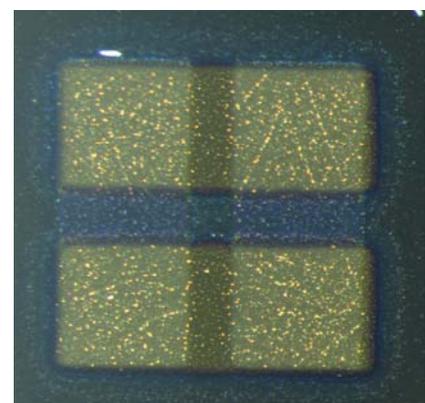


Figura 1b

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

La utilización de una máscara de sombra nos permite aislar los dispositivos, así como delimitar la longitud y anchura del canal del transistor. En nuestro caso hemos utilizado máscaras de sombra fabricadas en nuestras instalaciones de Sala Blanca, aunque también es posible adquirirlas en compañías especializadas (www.labelcomat.be). 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 oro. En nuestro caso utilizamos oro 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 oro funde a 1000°C. Para la delimitación de los contactos metálicos, tanto el pentaceno, como el contacto de oro fueron evaporados a través de una máscara metálica a la que previamente se habían delimitado los contactos de drenador y fuente. 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.

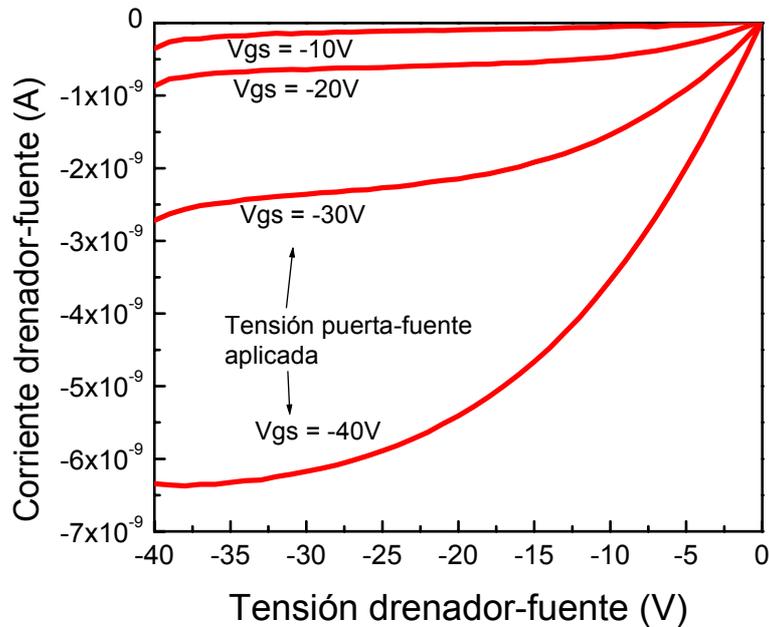


Figura 3. Característica de salida de uno de los transistores de efecto de campo de pentaceno fabricados por los alumnos.

5. Valoración

Durante el cuatrimestre de otoño del curso 2006-07 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. Esta prueba seguía a la realizada en el curso anterior dedicada a la fabricación de diodos orgánicos. En esta 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 transistor y su caracterización eléctrica. Los datos de la caracterización eléctrica fueron analizados por los alumnos y comparados con los datos de un transistor CMOS 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.

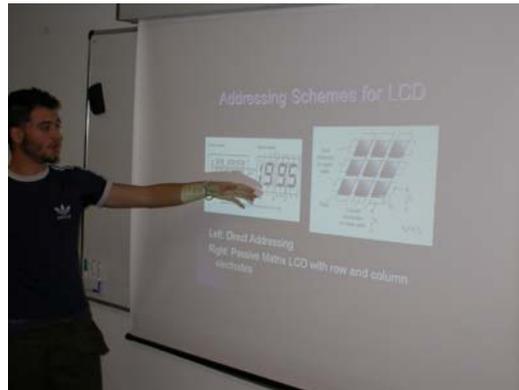


Figura 4. Alumno exponiendo un resumen de los resultados obtenidos en la fabricación de transistores de efecto de campo en capa delgada orgánica.

5. Conclusiones

La fabricación de dispositivos tales como transistores o diodos 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.