

Transistores de efecto de campo basados en moléculas orgánicas (OFETs)

Marta Mas-Torrent y Concepció Rovira

Resumen: Los dispositivos electrónicos orgánicos poseen propiedades muy interesantes como son flexibilidad, bajo peso, sintonizabilidad química, procesabilidad, bajo coste y bio-compatibilidad. En los últimos años ha habido un gran avance en la fabricación de estos dispositivos y más concretamente en la de transistores de efecto de campo (OFETs), con los que actualmente se llegan a alcanzar movilidades de portadores de carga del mismo orden que las del silicio amorfo. Este artículo pretende introducir al lector en el funcionamiento de un OFET y en el estado del arte de este campo centrándonos siempre en el uso de moléculas conjugadas pequeñas y procesables en solución.

Palabras clave: OFET, semiconductor orgánico, movilidad electrónica, moléculas conjugadas.

Abstract: Organic devices offer characteristics potentially useful for electronic applications, such as low-cost, large area coverage, structural and chemical flexibility and bio-compatibility. In the last few years the progress in the fabrication of organic devices has grown enormously, especially in the fabrication of organic field-effect transistors (OFETs), where charge carrier mobilities of the same order as amorphous silicon are currently achieved. This review gives a general description of the OFETs device operation and introduces the reader to the current standing in the area of OFETs focusing on the new solution-processed small conjugated molecules that have been recently reported.

Keywords: OFET, organic semiconductor, charge carrier mobility, conjugated molecule.

Introducción

Gran parte de nuestra actividad cotidiana implica el uso de dispositivos electrónicos (ej. teléfonos móviles, tarjetas de banco, ordenadores). En los últimos 40 años, los componentes de estos dispositivos se han basado en semiconductores inorgánicos y, en particular, en el silicio. Sin embargo, debido a las limitaciones de la tecnología del silicio, actualmente se está dedicando un gran esfuerzo científico al desarrollo de la *electrónica molecular*. Los dispositivos electrónicos orgánicos ofrecen propiedades muy interesantes como son flexibilidad, bajo peso, sintonizabilidad química, procesabilidad, bajo coste y bio-compatibilidad. Por estos motivos, se ha especulado que aunque la utilización de moléculas orgánicas en electrónica no sustituirá los circuitos de silicio cristalino de alta densidad y alta velocidad, sí que se usará para algunas aplicaciones donde ahora se utilizan chips de silicio amorfo (por ejemplo en células solares y pantallas electrónicas) y, además, dará lugar a una gran variedad de nuevos usos y aplicaciones. Los transistores de efecto de campo son las unidades de lógica principales en los circuitos electrónicos, donde por lo general funcionan como un interruptor o un amplificador. El primer transistor inorgánico, el cual se muestra en la Figura 1, fue inventado en 1947 por John Bardeen, William Shockley y Walter Brattain. Desde entonces, el avance de la electrónica ha sido espectacular y ha impactado de forma muy importante en nuestra sociedad. La fabricación del primer transistor orgánico (OFET, *Organic Field Effect Transistor*) no llegó hasta casi 40 años más tarde, en 1986, y se basó en la utilización

como semiconductor de una película de politiofeno crecida electroquímicamente.^[1] Cuatro años más tarde, se fabricó el primer OFET empleando una molécula pequeña conjugada (el sexitiofeno, un oligómero con 6 unidades de tiofeno).^[2] Desde entonces, y gracias al gran esfuerzo realizado durante los últimos 20 años, el funcionamiento de estos dispositivos orgánicos ha mejorado enormemente. Hoy en día, se llegan a alcanzar movilidades de portadores de carga del mismo orden que las del silicio amorfo ($0.1\text{-}1\text{ cm}^2/\text{Vs}$).^[3]



Figura 1. Primer transistor de Ge inventado en 1947 por Bardeen, Shockley y Brattain. Cortesía de *Lucent Technologies Bell Laboratories*.

¿Cómo funciona un transistor de efecto campo orgánico?

Un transistor de efecto de campo puede describirse como un dispositivo de tres terminales en el que la corriente a través del semiconductor conectado a dos terminales (fuente o *source* y sumidero o *drain*) se controla aplicando un voltaje en la tercera terminal (puerta o *gate*). Esta tensión aplicada (V_G) induce un campo eléctrico a través del dieléctrico en el que el semiconductor está depositado y causa la formación de una capa de acumulación de cargas en la interfase. Luego, mediante la aplicación de una diferencia de voltaje entre los contactos *source-drain* (V_{SD}) es posible medir la intensidad de corriente entre ellos (I_{SD}). Como se muestra en la Figura 2, las dos configuraciones de dispositivo más comunes utilizados en OFETs son: contacto superior, cuando los electrodos *source-drain* se depositan en la parte superior del material orgánico, y contacto inferior, cuando se depositan encima del dieléctrico antes de depositar el semiconductor orgánico.



M. Mas-Torrent

C. Rovira

Institut de Ciència de Materials de Barcelona (CSIC),
Campus UAB, 08193 Bellaterra, Barcelona
C-e: mamas@icmab.es; cun@icmab.es
Recibido: 03/11/2008. Aceptado: 15/12/2008.

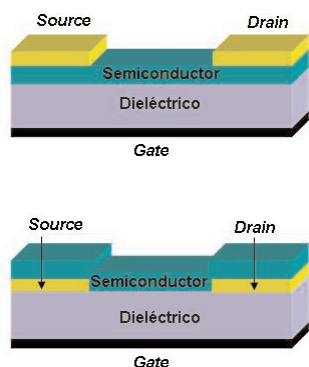


Figura 2. Configuraciones de un OFET: contacto superior (arriba) y contacto inferior (abajo).

Los principios básicos que rigen el funcionamiento de un transistor de efecto campo se pueden comprender en términos de diagramas de energía (Figura 3).^[4] En general, el nivel de Fermi (EF) de los metales se encuentra en medio de la energía de los orbitales HOMO (orbital molecular ocupado de mayor energía) y LUMO (orbital molecular vacío de menor energía) del semiconductor orgánico. Cuando se aplica una tensión al electrodo *gate* cambian los niveles de energía y, por lo tanto, se puede modular la conductividad a través del dispositivo. De este modo, un V_G negativo desestabiliza los orbitales HOMO y LUMO desplazándolos hacia arriba con respecto al nivel de Fermi del metal. Si el HOMO entra en resonancia con EF, podrá haber un flujo de cargas móviles (huecos) entre el HOMO y el metal. En este caso, el material se comportará como un semiconductor de tipo *p*. Por el contrario, si se aplica un V_G positivo, los orbitales HOMO y LUMO se estabilizan desplazándose hacia abajo, y si el LUMO entra en resonancia con EF, habrá conducción de electrones desde los electrodos metálicos al LUMO. Este material se comportará entonces como un semiconductor de tipo *n*. Los materiales capaces de conducir tanto electrones como huecos se conocen como semiconductores ambipolares.

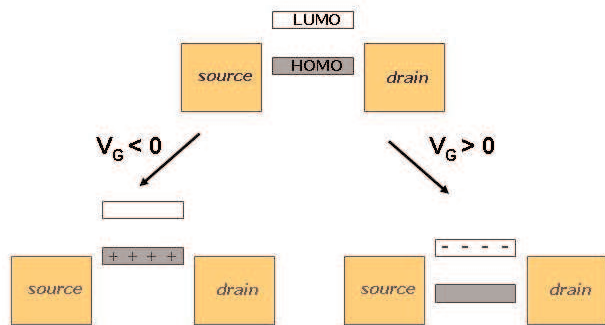


Figura 3. Esquema de los niveles de energía de los electrodos y el semiconductor orgánico en un dispositivo OFET.

El típico gráfico de las características eléctricas que se obtiene para un OFET a diferentes V_G se muestra en la Figura 4. Existen dos regímenes, el régimen lineal, donde la corriente es descrita por una parábola, y el régimen de saturación, cuando la intensidad de corriente I_{SD} es independiente del voltaje V_{SD} aplicado. La naturaleza y la calidad de los semiconductores orgánicos es fundamental para conseguir un OFET de alto rendimiento, lo cual se determina principalmente por la movilidad de los portadores de carga, μ , que se define como la velocidad del portador de carga por unidad de campo eléc-

trico. Otros parámetros importantes son la relación On/Off, que es el ratio entre la intensidad de corriente entre el modo de acumulación de cargas y el modo de depleción o despoblamiento, y la tensión umbral (V_T), es decir, la tensión mínima que hay que aplicar al electrodo *gate* a partir de la cual se forma el canal conductor.

Los dos regímenes de transporte se describen con las siguientes ecuaciones:

Régimen lineal:

$$I_{SD} = \frac{W}{L} \cdot \mu \cdot C \cdot V_{SD} \cdot \left(V_G - V_T - \frac{1}{2} V_{SD} \right)$$

Régimen de saturación:

$$I_{SD} = \frac{W}{2L} \cdot \mu \cdot C \cdot (V_G - V_T)^2$$

Donde L es la longitud del canal conductor entre los electrodos *source-drain*, W es la anchura del transistor y C es la capacitancia por unidad de área de la capa de dieléctrico.

En general, para poder utilizar en aplicaciones los dispositivos orgánicos se requiere alcanzar movilidades electrónicas por encima de $0.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ y valores de I_{on}/I_{off} mayores de 10^6 . Sin embargo, cabe destacar que estos valores son orientativos ya que depende de la aplicación para la que se quieran emplear. En cualquier caso, es imprescindible que los materiales que forman el dispositivo sean estables y procesables.

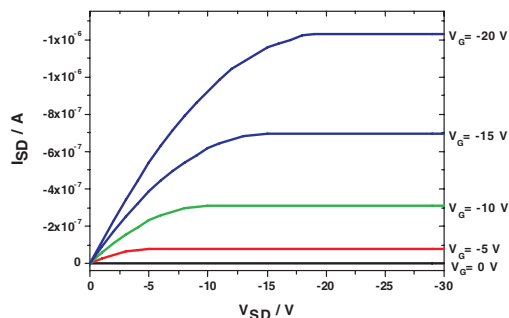


Figura 4. Características eléctricas que se obtienen típicamente para un transistor.

El diseño del dispositivo

El diseño de la configuración del dispositivo tiene una gran influencia en las propiedades electrónicas finales. Por ejemplo, la elección del metal de los contactos *source* y *drain* afectará la resistencia de contacto. Así, es importante elegir los electrodos de metal según la naturaleza de los semiconductores orgánicos para tener una inyección de cargas eficiente. Es decir, para un material de tipo *n* será más conveniente disponer de un metal con una función de trabajo (energía mínima necesaria para extraer un electrón del nivel de Fermi al vacío) baja, mientras que para un material de tipo *p* será más adecuado utilizar un metal con una alta función de trabajo. Generalmente, el oro es el metal más utilizado en los OFETs, y tiene una función de trabajo de 5.1 eV , valor cercano al potencial de ionización de la mayoría de los semiconductores orgánicos de tipo *p*. Por lo tanto, el oro es un metal muy adecuado para la inyección de huecos en el HOMO de los materiales orgánicos que se comportan como semiconductores *p*. Sin embargo, para inyectar electrones al LUMO de los semiconductores orgánicos *n* es más adecuado emplear metales tales como Al, Ca o Mg. El inconveniente es que estos metales tienden a oxidarse con facilidad.

El material dieléctrico también es fundamental para el buen funcionamiento del dispositivo, ya que influirá en el campo eléctrico que se crea a lo largo de él, la fuga de corriente a través del dieléctrico y la calidad de la interfase entre el semiconductor orgánico y el dieléctrico. El dieléctrico más utilizado en OFETs ha sido el SiO₂ crecido sobre silicio dopado, siguiendo las mismas tecnologías ya establecidas para la microelectrónica inorgánica. Las características de los dieléctricos también pueden ser modificadas con tratamientos de superficie. Por ejemplo, la preparación de monocapas autoensambladas de moléculas orgánicas sobre el dióxido de silicio puede transformar el carácter hidrofílico del óxido en hidrofóbico, lo que mejora la deposición del material orgánico. Se ha demostrado que estos tratamientos suelen tener efectos muy significativos sobre la estructura de la película orgánica y por consiguiente en sus propiedades eléctricas.^[3c,5] En los últimos años, se ha estudiado mucho la influencia de los diferentes tipos de dieléctricos inorgánicos sobre el rendimiento del OFET, y también se han empleado dieléctricos orgánicos ya que estos son compatibles con técnicas de procesado a partir de disolución y a baja temperatura y con el uso de sustratos flexibles.^[6]

Los semiconductores orgánicos se pueden depositar en el dispositivo a partir de una disolución utilizando técnicas como el *drop-casting* o el *spin-coating*. Estas técnicas suponen la vía más prometedora para la producción de dispositivos de bajo coste y sobre grandes superficies. Además, son compatibles con técnicas de estampado o técnicas de impresión,^[7] y, por lo tanto, permiten preparar patrones de los semiconductores orgánicos prescindiendo de las técnicas de litografía. Sin embargo, dado que a menudo los semiconductores orgánicos no son muy solubles, una alternativa mucho más extendida ha sido la deposición por sublimación de la materia orgánica haciendo uso de una gran variedad de sistemas de deposición al vacío. En estos casos, parámetros tales como la presión y la temperatura del sustrato determinan la morfología y la calidad de las películas orgánicas resultantes.

Los semiconductores orgánicos

Existen dos familias principales de semiconductores orgánicos: los polímeros y las moléculas conjugadas pequeñas (Figura 5). Los polímeros son procesados a partir de disolución y típicamente forman microestructuras complejas, en las que hay dominios microcristalinos incrustados en una matriz amorfa. La matriz desordenada limita el transporte de carga resultante dando lugar a movilidades electrónicas relativamente bajas. El polímero más estudiado en OFETs ha sido el poli(3-hexiltiofeno) (P3HT), del cual se han descrito movilidades de 0.1 cm²/Vs.^[8] Esta alta movilidad se debe al orden estructural de la película que este polímero forma inducido por las cadenas alquílicas laterales.^[9] Otra forma de conseguir un mayor ordenamiento estructural en polímeros es añadiendo anillos aromáticos condensados ya que proporcionan rigidez al esqueleto polimérico. Un ejemplo de esto es el transistor preparado con un copolímero dialquilado de tetraenoaceno (P2TDC13FT4) con el que se han llegado a movilidades superiores a 0.3 cm²/Vs.^[10] Recientemente, OFETs basados en el cristal líquido poli(2,5-bis(3-alkiltiofen-2-il)tieno [3,2-b] tiofeno, PBTTT) también han dado movilidades altas de hasta 0.7 cm²/Vs en su mesofase.^[11] A partir de

ahora, sin embargo, nos centraremos en los semiconductores basados en moléculas conjugadas pequeñas ya que tienden a dar lugar a dispositivos con movilidades electrónicas mayores debido a su mayor orden estructural.

Los semiconductores considerados como compuestos de referencia en el campo de los OFETs han sido los derivados de los acenos y de los tiofenos. Se han descrito movilidades electrónicas de 1.1 y 3 cm²/Vs para películas delgadas de oligotiofenos sustituidos^[12] y pentaceno,^[13] respectivamente. Sin embargo las movilidades OFET más altas se han encontrado en dispositivos basados en monocristales que, aunque no son tan interesantes para futuras aplicaciones, permiten estudiar las propiedades intrínsecas del material y realizar estudios de correlación estructura-propiedad. Así, se han descrito movilidades de hasta 18 cm²/Vs para un monocristal de rubreno.^[14]

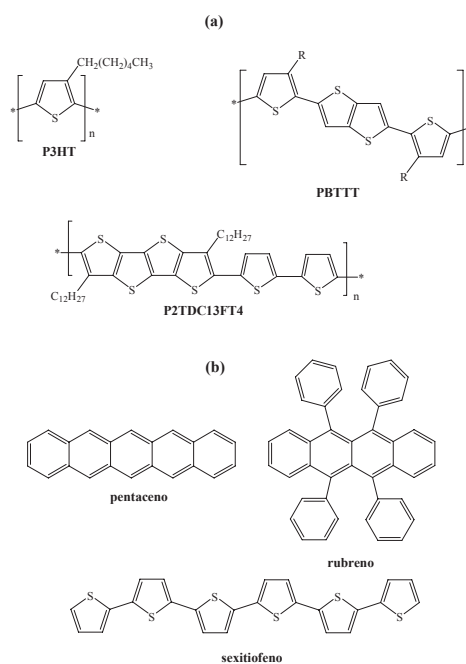


Figura 5. Polímeros conjugados (a) y moléculas conjugadas pequeñas (b) utilizados como semiconductores en OFETs.

No obstante, los dispositivos basados en este tipo de semiconductores típicamente se preparan evaporando el material orgánico debido a la poca solubilidad de la mayoría de estas moléculas en disolventes orgánicos comunes. Sin embargo, y como se ha mencionado previamente, actualmente hay un gran interés en fabricar transistores con movilidades electrónicas elevadas a partir de moléculas orgánicas procesables a partir de disolución. Para conseguir disolver las moléculas pequeñas semiconductoras se han seguido diferentes estrategias. Una de las rutas empleadas se basa en la síntesis de un compuesto precursor soluble que se puede convertir en el semiconductor deseado por calentamiento o irradiación. Algunos ejemplos de estos sistemas son las moléculas 1-4 que se muestran en la Figura 6a y que pueden ser convertidas en pentaceno.^[15] Con esta estrategia se han obtenido movilidades electrónicas de hasta 0.89 cm²/Vs.^[15b] Otra alternativa es funcionalizar los semiconductores orgánicos con grupos que puedan proporcionar solubilidad y una mayor estabilidad a la molécula (Figura 6b). Algunos trabajos se han basado en la funcionalización de derivados de aceno consiguiendo así

solubilizar el material y también incrementar las interacciones π - π . Siguiendo esta aproximación se han conseguido movilidades de 1.0 y 0.17 cm^2/Vs en OFETs basados en películas de los compuestos **5** y **6**, respectivamente.^[16] Además, se ha visto que la funcionalización de estas moléculas con grupos fluorados incrementa su estabilidad térmica y fotoquímica e induce interacciones en el estado sólido que favorecen su cristalización.^[17] También se han sintetizado tiofenos sustituidos con grupos alquílicos o alquilfenilos para proporcionar solubilidad. Los dispositivos preparados con estos materiales utilizando técnicas de deposición a partir de disolución han dado lugar a movilidades del orden de 0.01-0.05 cm^2/Vs .^[18]

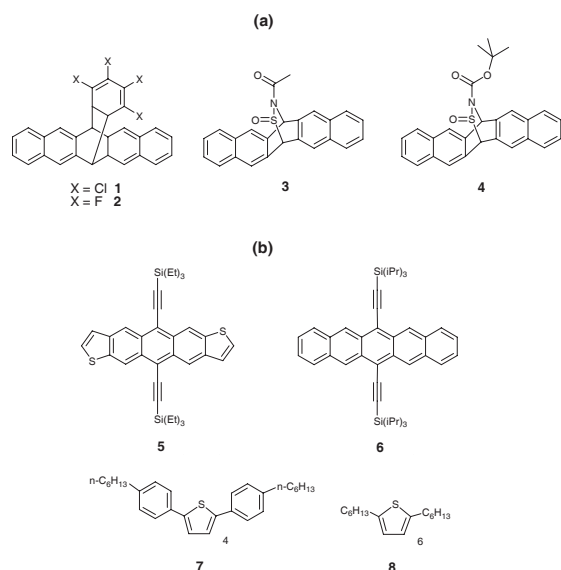


Figura 6. a) Precursores solubles de pentaceno por irradiación o calentamiento. b) Semiconductores solubles debido a la funcionalización química.

Recientemente, los tetratíafulvalenos (TTF) se han utilizado como semiconductores en OFETs. Estos derivados son generalmente solubles en una gran variedad de disolventes orgánicos, pueden ser fácilmente modificados químicamente y son buenos dadores de electrones. Los resultados obtenidos en los últimos años demuestran el gran potencial de esta familia de compuestos que además de presentar movilidades electrónicas elevadas, se pueden procesar a partir de disolución.^[19]

Con el fin de estudiar si se podía establecer una correlación estructura-movilidad, se prepararon monocristales de derivados de TTF mediante *drop-casting* de una disolución del derivado de TTF sobre un sustrato de Si/SiO₂ con electrodos de oro prefabricados. Después de dejar evaporar la disolución lentamente a temperatura ambiente se formaron cristales, algunos de los cuales conectaban dos de los electrodos microfabricados (Figura 7). Se observó una clara influencia de la estructura cristalina en la movilidad electrónica del dispositivo, siendo los derivados que cristalizan formando pilas uniformes de moléculas planas separadas por 3.56-3.66 Å los que mostraron mejores propiedades de OFET.^[20] La movilidad más alta que se encontró fue para el derivado DT-TTF (Figura 8) que mostró una movilidad de 3.6 cm^2/Vs con un ratio On/Off superior a 10⁶.^[20c] Muy recientemente, algunos dispositivos basados en monocristales preparados también a partir de disolución del derivado HM-TTF pero utilizando como electrodos el metal orgánico TTF-TCNQ, han dado lugar a movilidades del orden de 10 cm^2/Vs .^[21]

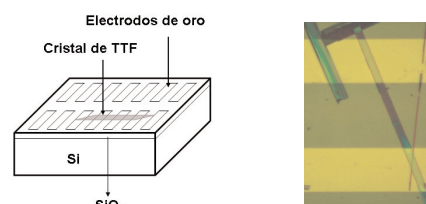


Figura 7. Izquierda: Configuración utilizada para el dispositivo. Derecha: Imagen obtenida por microscopio óptico de un cristal de DT-TTF sobre electrodos de oro. Reproducido con el permiso de la referencia 20a. Copyright 2004 American Chemical Society.

También se han preparado películas delgadas de DT-TTF y del derivado TTF-SC18 (Figura 8), que incorpora cadenas alquílicas que garantizan la solubilidad del compuesto y facilitan el solapamiento intermolecular π - π debido a la tendencia que las cadenas alquílicas tienen a empaquetarse de forma muy compacta, utilizando la técnica de *zone-casting*.^[22] Esta técnica consiste en depositar una disolución del compuesto deseado sobre un sustrato en movimiento controlando la velocidad del sustrato y la temperatura de éste y de la disolución. Esta técnica da lugar a películas orientadas que recubren grandes áreas. De este modo, los dispositivos basados en este tipo de películas han dado lugar a movilidades de 0.1 cm^2/Vs para el TTF-SC18 y 0.17 cm^2/Vs para el DT-TTF, lo que hace que estos materiales sean muy interesantes para futuras aplicaciones ya que cumplen los requisitos de alta movilidad, procesabilidad y recubrimiento de áreas grandes.^[23] También cabe destacar que se han preparado películas delgadas del derivado bisTTF-SC6 (Figura 8) utilizando la técnica del *spin-coating* y se han obtenido movilidades de 0.02 cm^2/Vs .^[24] Aunque la movilidad de estos dispositivos es de aproximadamente un orden de magnitud inferior a la encontrada en los dispositivos de TTF-SC18 y DT-TTF, vale la pena mencionar que la técnica de *spin-coating* puede ser más prometedora para aplicaciones industriales ya que puede ser más fácilmente escalable y es una técnica muy rápida.

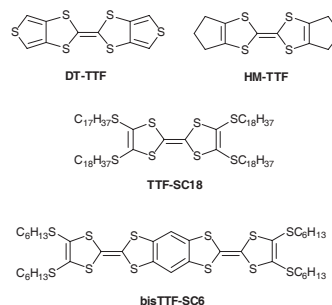


Figura 8. Derivados de TTF utilizados para la preparación de OFETs a partir de disolución.

Hasta el momento se ha hablado de transistores de tipo *p*, en los que los portadores de carga son huecos. El desarrollo de dispositivos orgánicos de tipo *n*, donde los portadores de carga son electrones, se encuentra todavía muy lejos de conseguir los resultados obtenidos con materiales de tipo *p*. Esto es debido al hecho de que el transporte a través de canales *n* se degrada fácilmente con el aire, que actúa como trampa de electrones, y a que la mayoría de los materiales orgánicos conocidos tienden a conducir huecos mejor que electrones. Otra dificultad añadida en el progreso de la fabricación de OFETs de tipo *n* es encontrar metales adecuados para los contactos.

A pesar de estos inconvenientes, existe actualmente un gran

interés en avanzar en la búsqueda de materiales de tipo *n* ya que son necesarios para poder fabricar circuitos complementarios.^[25] Por este motivo es importante encontrar semiconductores que muestren movilidades electrónicas de tipo *n* tan altas como las que ya se han encontrado para los semiconductores de tipo *p* y, que a la vez, no se deterioren con el tiempo.

La movilidad electrónica más alta publicada hasta la fecha para un semiconductor *n* se ha encontrado para una película delgada de fullereno crecida epitaxialmente sobre un dieléctrico polimérico ($\mu = 6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$).^[26] Sin embargo, el número de semiconductores *n* solubles es muy escaso. El compuesto naftaleno diimida **8** fue el primer semiconductor orgánico *n* soluble descrito que mostraba una alta movilidad (mayor que $0.01 \text{ cm}^2/\text{Vs}$).^[27] Los derivados de perileno sustituidos también han sido muy estudiados para OFETs de tipo *n*. Así dispositivos preparados a partir de una disolución de **9** han dado lugar a movilidades de hasta $0.024 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.^[28] Una de las moléculas solubles que han mostrado movilidades electrónicas más altas es el derivado de tiofeno **10** ($\mu = 0.21 \text{ cm}^2/\text{Vs}$).^[28] También con el derivado **11** se han preparado películas amorfas por spin coating y han dado lugar a dispositivos estables al aire con movilidades de $0.025 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.^[29] No obstante, estas películas después de un proceso de calentamiento forman estructuras cristalinas que muestran una movilidad electrónica de hasta $0.16 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Los derivados solubles de fullereno también han sido muy investigados como semiconductores *n*. Con el derivado **12** se han llegado a obtener movilidades de hasta $0.2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ utilizando el polímero poli(vinil acetato) (PVA) como dieléctrico.^[30-31] La estructura molecular de los semiconductores *n* mencionados previamente se muestran en la Figura 9.

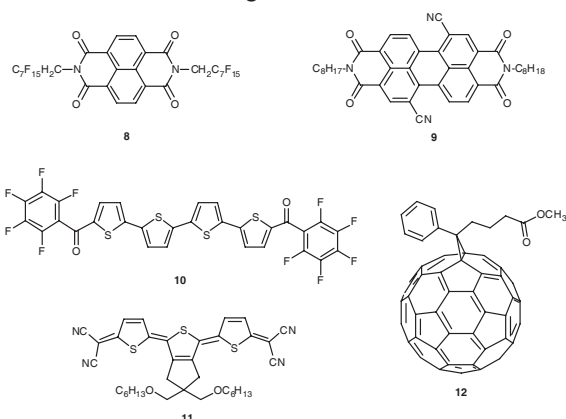


Figura 9. Semiconductores orgánicos solubles de tipo *n*.

Aunque la mayoría de los transistores orgánicos fabricados son unipolares, es decir, conducen un tipo de portadores de carga (huecos o electrones), hay también una necesidad creciente de preparar transistores ambipolares para el diseño de circuitos de bajo consumo.^[33] Un transistor ambipolar presenta acumulación de electrones a V_G positivos y acumulación de huecos a V_G negativos. Una de las formas de fabricar un transistor ambipolar es utilizando como capa activa una heteroestructura de un semiconductor *n* y uno *p*. Sin embargo, una estrategia más atractiva, ya que simplifica el proceso de fabricación del dispositivo, es utilizar un solo componente molecular semiconductor.

Recientemente en la bibliografía va aumentando el número de OFETs ambipolares publicados,^[34] pero muy pocos de los

dispositivos se preparan a partir de técnicas de disolución. Por ejemplo, se han obtenido transistores ambipolares a partir de mezclas solubles de polímeros *n* o *p* y una molécula conjugada pequeña *p* o *n*, respectivamente.^[35-37] Desafortunadamente, típicamente estos dispositivos presentan movilidades electrónicas muy pequeñas (10^{-5} - $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$) y la conducción de huecos y electrones no es equilibrada, es decir, los portadores de carga de un tipo presentan movilidades considerablemente superiores a las del otro tipo. También podemos encontrar algún ejemplo de OFETs ambipolares basados en un único componente molecular soluble. Un ejemplo es la triada formada por un oligotiofeno (conocido como semiconductor *p*) y dos unidades fullerénicas (conocidas como semiconductor *n*).^[38] Otro sistema que se comporta de forma ambipolar es el complejo de níquel, bis(4-dimetilaminotiofenil)níquel, que tiene un gap HOMO-LUMO pequeño (0.9 eV).^[39] En todos estos casos las movilidades electrónicas obtenidas son más que modestas. Por consiguiente, actualmente hay muchos grupos trabajando en esta dirección ya que de cara a aplicaciones es crucial encontrar materiales orgánicos ambipolares y procesables.

Perspectivas Futuras y Conclusiones

Actualmente hay un gran interés en la utilización de circuitos basados en transistores orgánicos para una gran variedad de aplicaciones, especialmente, aplicaciones en las que se requiere bajo coste y/o recubrir grandes áreas sobre sustratos flexibles.^[40]

Uno de los primeros dispositivos emergentes y más prometedores realizado con OFETs ha sido el papel electrónico, que consiste en la utilización de tintas electroforéticas formadas por pigmentos cargados que se mueven cuando se activa el OFET debido a la generación de un campo eléctrico.^[41] La gran estabilidad y contraste que muestra el papel asegura que la comercialización de estos dispositivos sea inminente. De hecho, la empresa Plastic Logic ya ha abierto una línea de producción de papel electrónico A4 flexible y prevé que en el 2009 estará en el mercado.^[42] Así, posiblemente nos podremos encontrar periódicos en los que se podrán descargar las noticias diariamente o libros interactivos como el prototipo que se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Prototipo de Plastic Logic de un libro basado en papel electrónico. Publicado con el permiso de Plastic Logic.

No obstante, los OFETs ofrecen muchas más posibilidades en muchas otras aplicaciones, como son sensores de sustancias químicas o biológicas,^[40,43] sensores de presión, muy atractivos en el campo de la robótica y ropa inteligente,^[44] transistores emisores de luz (OLETs, *Organic Light Emitting Transistors*)^[33,45] para pantallas, o como identificadores de radio

frecuencia (RFID).^[46] Estos últimos permiten transmitir la identidad de un objeto (similar a un número de serie) mediante ondas de radio y, por consiguiente, son muy prometedores en etiquetaje.

Por otro lado, se ha comenzado con gran ímpetu la preparación de OFETs utilizando técnicas ascendentes (*bottom-up*) que se basan en el auto-ensamblaje de las moléculas. Muy recientemente, se ha publicado un trabajo en el que se fabrican dispositivos mediante la formación de monocapas auto-ensambladas (SAMs, *Self-Assembled Monolayers*) de semiconductores orgánicos.^[47] Debido al buen funcionamiento de estos dispositivos junto con su reproducibilidad, se prevé que en un futuro se puedan producir de forma simultánea centenares de SAM-OFETs para la obtención de circuitos integrados.

En conclusión, en los últimos 20 años ha habido un intenso avance en el campo de los OFETs y se han obtenido dispositivos que funcionan de forma comparable a los transistores clásicos de silicio amorfo. Sin embargo, todavía hay mucho trabajo por hacer, como encontrar OFETs de tipo *n* y ambipolares más estables y que presenten mejores prestaciones para poder preparar circuitos complementarios. En algunos casos, ya se ha llegado al borde de aplicaciones comerciales, pero sin duda los OFETs en los próximos años van a traernos muchas más aplicaciones interesantes y novedosas en áreas tales como la biomedicina, óptica o la tecnología de la información.

Agradecimientos

Agradecemos a Raphael Pfattner por su ayuda en la preparación de algunas figuras de este manuscrito y al Prof. Jaume Veciana por sus consejos. También agradecemos la financiación de los proyectos FP7 ONE-P y DGI EMOCIONa (CTQ2006-06333/BQU) y el Instituto Carlos III, MIyC, a través de las "Acciones CIBER".

Bibliografía

- [1] A. Tsumura, K. Koezuka, T. Ando, *Appl. Phys. Lett.* **1986**, *49*, 1210–1212.
- [2] G. Horowitz, D. Fichou, X. Z. Peng, Z. G. Xu, F. Garnier, *Solid State Commun.* **1989**, *72*, 381–384.
- [3] a) C. D. Dimitrakopoulos, P. R. L. Malenfant, *Adv. Mater.* **2002**, *14*, 99–117. b) Y. Sun, Y. Liu, D. Zhu, *J. Mater. Chem.* **2005**, *15*, 53–65. c) Katz, H. E., *Chem. Mater.* **2004**, *16*, 4748–4756. d) Th. B. Singh, N. S. Sariciftci, *Annu. Rev. Mater. Res.* **2006**, *36*, 199–230.
- [4] C. R. Newman, C. D. Frisbie, D. A. da Silva Filho, J. -L. Bredas, P. C. Ewbank, K. Mann, *Chem. Mater.* **2004**, *16*, 4436–4451.
- [5] a) D. J. Gundlach, J. A. Nichols, L. Zhou, T. N. Jackson, *Appl. Phys. Lett.* **2002**, *80*, 2925–2927. b) I. Kymissis, C. D. Dimitrakopoulos, S. Purushothaman, *IEEE Trans. Electron Devices* **2001**, *48*, 1060.
- [6] a) J. Veres, S. Ogier, G. Lloyd, *Chem. Mater.* **2004**, *16*, 4543–4555. b) M.-H. Yoon, C. Kim, A. Facchetti, T. Marks, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *128*, 12851–12869.
- [7] M. M. Ling, Z. Bao, *Chem. Mater.* **2004**, *16*, 4824–4840.
- [8] H. Sirringhaus, P. J. Brown, R. H. Friend, M. M. Nielsen, K. Bechgaard, B. M. W. Langeveld-Voss, A. J. H. Spiering, R. A. J. Janssen, E. W. Meijer, P. Herwig, D. M. de Leeuw, *Nature* **1999**, *401*, 685–688.
- [9] E. Mena-Osteritz, A. Meyer, B. M. W. Langeveld-Voss, R. A. J. Janssen, E. W. Meijer, P. Bäuerle, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2000**, *39*, 2680–2684.
- [10] H. H. Fong, V. A. Pozdin, A. Amassian, G. G. Malliaras, D.-M. Smilgies, M. He, S. Gasper, F. Zhang, M. Sorensen, *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, *130*, 13202–13203.
- [11] I. McCulloch, M. Heeney, C. Bailey, K. Genevicius, I. Macdonald, M. Schkunov, D. Sparrowe, S. Tierney, R. Wagner, W. Zhang, M. L. Chabinyc, R. J. Kline, M. D. McGehee, M. F. Toney, *Nature Mater.* **2006**, *5*, 328–333.
- [12] M. Halik, H. Klauk, U. Zschieschang, G. Schmid, S. Ponomarenko, S. Kirchmeyer, W. Weber, *Adv. Mater.* **2003**, *15*, 917–922.
- [13] H. Klauk, M. Halik, U. Zschieschang, G. Schmid, W. Radlik, W. Weber, *J. Appl. Phys.* **2002**, *92*, 5259–5263.
- [14] a) J. Takeya, M. Yamagishi, Y. Tominari, R. Hirahara, Y. Nakazawa, T. Nishikawa, T. Kawase, T. Shimoda, S. Ogawa, *Appl. Phys. Lett.* **2007**, *90*, 102120. b) V. C. Sundar, J. Zaumseil, V. Podzorov, E. Menard, R. L. Willett, T. Someya, M. E. Gershenson and J. A. Rogers, *Science* **2004**, *303*, 1644–1646.
- [15] a) P. T. Herwig, K. Müllen, *Adv. Mater.* **1999**, *11*, 480–483. b) A. Afzali, C. D. Dimitrakopoulos, T. L. Breen, *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, *124*, 8812–8813. c) K. P. Weidkamp, A. Afzali, R. M. Tromp, R. J. Hamers, *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, *126*, 12740–12741.
- [16] M. M. Payne, S. R. Parkin, J. E. Anthony, C.-C. Kuo, T. N. Jackson, *J. Am. Chem. Soc.* **2005**, *127*, 4986–4987.
- [17] S. Subramanian, S. K. Park, S. R. Parkin, V. Podzorov, T. N. Jackson, J. Anthony, *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, *130*, 2706–2707.
- [18] a) M. Mushrush, A. Facchetti, M. Lefenfeld, H. E. Katz, T. J. Marks, *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, *125*, 9414–9423. b) F. Garnier, R. Hajlaoui, A. El Kassmi, G. Horowitz, L. Laigre, W. Porzio, M. Armanini, F. Provasoli, *Chem. Mater.* **1998**, *10*, 3334–3339. c) H. E. Katz, J. G. Laquindanum, A. J. Lovinger, *Chem. Mater.* **1998**, *10*, 633–638. d) A. Zen, A. Bilge, F. Galbrecht, R. Alle, K. Meerholz, J. Grenzer, D. Neher, U. Scherf, T. Farrell, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *128*, 3914–3915.
- [19] a) M. Mas-Torrent, C. Rovira, *Chem Soc. Rev.*, **2008**, *37*, 827–838. b) M. Mas-Torrent, C. Rovira, *J. Mater. Chem.*, **2006**, *16*, 433–436.
- [20] a) M. Mas-Torrent, M. Durkut, P. Hadley, X. Ribas and C. Rovira, *J. Am. Chem. Soc.*, **2004**, *126*, 984–985. b) M. Mas-Torrent, P. Hadley, S. T. Bromley, X. Ribas, J. Tarrés, M. Mas, E. Molins, J. Veciana and C. Rovira, *J. Am. Chem. Soc.*, **2004**, *126*, 8546–8553. c) M. Leugfen, O. Rost, C. Gould, G. Schmidt, J. Geurts, L. W. Molenkamp, N. S. Oxtoby, M. Mas-Torrent, N. Crivillers, J. Veciana, C. Rovira, *Organic Electronics* **2008**, *9*, 1101–1106.
- [21] Y. Takahashi, T. Hasegawa, S. Horiuchi, R. Kumai, Y. Tokura, G. Saito, *Chem. Mater.*, **2007**, *19*, 6382–6384.
- [22] A. Tracz, J. Ulanski, T. Pakula, M. Kryszewski, Polish Patent P-131986 1986.
- [23] a) P. Miskiewicz, M. Mas-Torrent, J. Jung, S. Kotarba, I. Glowacki, E. Gomar-Nadal, D. B. Amabilino, C. Rovira, J. Veciana, B. Krause, D. Carbone, J. Ulanski, *Chem. Mater.* **2006**, *18*, 4724–4729. b) M. Mas-Torrent, S. Masirek, P. Hadley, N. Crivillers, N. S. Oxtoby, P. Reuter, J. Veciana, C. Rovira, A. Tracz, *Organic Electronics* **2008**, *9*, 143–148.
- [24] X. Gao, W. Wu, Y. Liu, W. Qiu, X. Sun, G. Yu, D. Zhu, *Chem. Commun.* **2006**, 2750–2752.

- [25] B. Crone, A. Dodabalapur, Y.-Y. Lin, R. W. Filas, Z. Bao, A. LaDuca, R. Sarpeshkar, H. E. Katz, W. Li, *Nature* **2000**, *403*, 521–523.
- [26] Th. B. Singh, N. Marjanovic, G. J. Matt, S. Günes, N. S. Sariciftci, A. M. Ramil, A. Andreev, H. Sitter, R. Schwödiauer, S. Bauer, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **2005**, 871E:14.9.1.
- [27] H. E. Katz, A. J. Lovinger, J. Johnson, C. Kloc, T. Siegrist, W. Li, Y.-Y. Lin, A. Dodabalapur, *Nature* **2000**, *404*, 478–481.
- [28] B. Yoo, B. A. Jones, D. Basu, D. Fine, T. Jung, S. Mohapatra, A. Facchetti, K. Dimmler, M. R. Wasielewski, T. J. Marks, A. Dodabalapur, *Adv. Mater.* **2007**, *19*, 4028–4032.
- [29] J. A. Letizia, A. Facchetti, C. L. Stern, M. A. Ratner, T. Marks, *J. Am. Chem. Soc.* **2005**, *127*, 13476–13477.
- [30] S. Handa, E. Miyazaki, K. Takimiya, Y. Kunugu, *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *129*, 11684–11685.
- [31] T.-W. Lee, Y. Byun, B.-W. Koo, I.-N. Kang, Y.-Y. Lyu, C. H. Lee, L. Pu, S. Y. Lee, *Adv. Mater.* **2005**, *17*, 2180–2184.
- [32] Th. B. Singh, N. Marjanovic, P. Stadler, M. Auinger, G. J. Matt, S. Günes, N. S. Sariciftci, R. Schwödiauer, S. Bauer, *J. Appl. Phys.* **2005**, *97*, 083714.
- [33] J. Zaumseil, H. Sirringhaus, *Chemical Reviews* **2007**, *107*, 1296–1323.
- [34] M. L. Tang, A. D. Reichardt, N. Miyaki, R. M. Stoltenberg, Z. Bao, *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, *130*, 6064–6065.
- [35] E. J. Meijer, D. M. De Leeuw, S. Setayesh, E. Van Veenendaal, B.-H. Huisman, P. W. M. Blom, J. C. Hummelen, U. Scherf, T. M. Klapwijk, *Nature Materials* **2003**, *2*, 678–682.
- [36] A. Babel, J. D. Wind, S. A. Jenekhe, *Adv. Funct. Mater.* **2004**, *14*, 891–898.
- [37] M. Shkunov, R. Simms, M. Heeney, S. Tierney, I. McCulloch, *Adv. Mater.* **2005**, *17*, 2608–2612.
- [38] Y. Kunugi, K. Takimiya, N. Negishi, T. Otsubo, Y. Aso, *J. Mater. Chem.* **2004**, *14*, 2840–2841.
- [39] T. D. Anthopoulos, S. Setayesh, E. Smits, M. Cölle, E. Cantatore, B. de Boer, P. W. M. Blom, D. M. de Leeuw, *Adv. Mater.* **2006**, *18*, 1900–1904.
- [40] A. Dodabalapur, *Materialstoday* **2006**, *9*, 24–30.
- [41] J. A. Rogers, Z. Bao, K. Baldwin, A. Dodabalapur, B. Crone, V. R. Raju, V. Kuck, H. Katz, K. Amundson, J. Ewing, P. Drzaic, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2001**, *98*, 4835–4840.
- [42] See <http://www.plasticlogic.com>.
- [43] a) J. T. Mabeck, G. G. Malliaras, *Anal. Bioanal. Chem.* **2006**, *384*, 343–353. b) L. Wang, D. Fine, D. Sharma, L. Torsi, A. Dodabalapur, *Anal. Bioanal. Chem.* **2006**, *384*, 310–321. c) *Organic Electronics: Materials, Manufacturing and Applications*, Ed. H. Klauk, **2006** Wiley-VCH, Weinheim.
- [44] I. Manunza, A. Sulis, A. Bonfiglio, *Appl. Phys. Lett.* **2006**, *89*, 143502.
- [45] M. Muccini, *Nature Materials* **2006**, *5*, 605–613.
- [46] M. Chason, P. W. Brazis, J. Zhang, K. Kalyanasundaram, D. R. Gamota, *Proc. IEE*, **2005**, *93*, 1348–1356.
- [47] E. C. P. Smits, S. G. J. Mathijssen, P. A. van Hal, S. Setayesh, T. C. T. Geuns, K. A. H. A. Mutsaers, E. Cantatore, H. J. Wondergem, O. Werzer, R. Resel, M. Kemerink, S. Kirchmeyer, A. M. Muzafarov, B. de Boer, P. W. M. Blom, D. M. de Leeuw, *Nature* **2008**, *455*, 956.

ICHAC-9

International Conference on Heteroatom Chemistry

...where organic and inorganic chemistry meet.

Oviedo (Spain), June 30th to July 4th, 2009

Plenary Lecturers	
Takeshi Akasaka (Tsukuba Univ., Japan)	Tien-Yau Luh (National Taiwan Univ., Taiwan)
Guy Bertrand (Univ. of California, Riverside, USA)	Shengming Ma (Shanghai Inst. of Org. Chem. China)
Matthias Beller (Leibniz Inst. for Catalysis, Germany)	Nazario Martín (Univ. Complutense de Madrid, Spain)
Nobuaki Kambe (Osaka Univ., Japan)	Robert E. Mulvey (Univ. of Strathclyde, UK)
Jean Marie Lehn (Strasbourg Univ., France)	Philip P. Power (Univ. of California, Davis, USA)
Invited Lecturers	
Giuseppe Bartoli (Università di Bologna, Italy)	Myong Euy Lee (Yonsei University, Korea)
Eric Block (SUNY Albany, USA)	Ilan Marek (Technion- Isr. Inst. Tech, Haifa, Israel)
David Crich (Institut de Chimie des Substances Naturales, Gif-sur-Yvette, France)	Yoshihiro Matano (Kyoto University, Japan)
Benjamin Davis (University of Oxford, UK)	Toshiaki Murai (Gifu University, Japan)
H. V. Rasika Dias (Univ. of Texas, Arlington, USA)	Valentine G. Nenajdenko (Moscow State Univ., Russia)
Santos Fustero (Universidad de Valencia, Spain)	Brian G. Pagenkopf (Western Ontario Univ., Canada)
Douglas B. Grotjahn (San Diego State University, USA)	Gregory H. Robinson (University of Georgia, USA)
A. Stephen K. Hashmi (R.-K. Univ. Heidelberg, Germany)	Magnus Rueping (Frankfurt, Germany)
Cameron Jones (Monash University, Australia)	David Scheschekewitz (Imperial College, UK)
Koop Lammertsma (Free Univ. Amsterdam, Holland)	Jaume Veciana (ICMAB, CSIC, Spain)
Lechoslaw Latos-Grazyński (Wrocław University, Poland)	Zhenfeng Xi (Pekin University, China)
	Shigehiro Yamaguchi (Nagoya University, Japan)

Organizers:

