



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN

INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

*Desarrollo y caracterización de displays de 7 segmentos  
basados en material orgánico*

Autor: Roberto Chorén Rouco

Tutor: Dra. Beatriz Romero Herrero

Co-tutor: Dra. Belén Arredondo Conchillo

Curso académico 2008/2009



## RESUMEN

En este proyecto abordamos el proceso completo de fabricación y caracterización de un *display* de siete segmentos basado en tecnología OLED (*Organic Light Emitting Diode*)<sup>1</sup>.

El motivo de elección de esta temática es el increíble auge que está experimentando la tecnología OLED en el mundo tecnológico, especialmente en el ámbito de monitores de TV y paneles de iluminación ambiental, sin olvidar otras aplicaciones de gran importancia como *displays*, pantallas flexibles, sensores biológicos etc.

En el primer capítulo de este PFC realizaremos una introducción al mundo de la electrónica orgánica, mostrando en este apartado un breve repaso de su historia reciente, ventajas que aporta esta tecnología frente a otras más tradicionales, estado del arte y estructura básica del OLED, así como clasificación de los distintos tipos de OLED existentes y en desarrollo.

En el segundo capítulo nos centraremos en la metodología de fabricación de nuestro dispositivo: el *display* de siete segmentos basado en tecnología OLED utilizando sustrato rígido (vidrio) y sustrato flexible (PET -“*Polietilientereftalato*”-)<sup>2</sup>. Haremos una descripción exhaustiva de cada fase de este proceso explicando paso a paso todo el proceso de fabricación, así como las técnicas y materiales utilizados en él.

Por último procederemos a la caracterización eléctrica y óptica de los dispositivos fabricados. Mediremos la característica corriente-tensión de cada diodo, así como sus propiedades electroluminiscentes: espectro de emisión, luminancia y coordenadas de color.

---

<sup>1</sup> Diodos orgánicos electroluminiscentes

<sup>2</sup> Tereftalato de Polietileno



# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. HISTORIA DE LA ELECTRÓNICA ORGÁNICA .....	1
1.2. COMPARACIÓN ENTRE TECNOLOGÍA ORGÁNICA E INORGÁNICA. VENTAJAS E INCONVENIENTES.	2
1.3. ESTADO DEL ARTE .....	6
1.4. ESTRUCTURA BÁSICA DE UN LED ORGÁNICO.....	12
1.4.1. <i>Introducción</i> .....	12
1.4.2. <i>Clasificación de los OLEDs</i> .....	15
1.4.3. <i>OLEDs en el mercado</i> .....	17
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>19</b>
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
3.1. EQUIPO EXPERIMENTAL DE FABRICACIÓN.....	21
3.1.1. <i>Módulo de limpieza por ultrasonidos</i> .....	21
3.1.2. <i>Lámpara UV y máscara de alineamiento</i> .....	22
3.1.3. <i>Caja de atmósfera inerte (glove-box)</i> .....	23
3.1.4. <i>Sistema de depósito de capas delgadas por centrifugado (Spin Coating)</i> .....	26
3.1.5. <i>Evaporadora</i> .....	27
3.1.6. <i>Horno de vacío</i> .....	28
3.2. EQUIPO EXPERIMENTAL DE CARACTERIZACIÓN .....	29
3.2.1. <i>Caracterización eléctrica. Analizador de parámetros de semiconductor</i> .....	29
3.2.2. <i>Caracterización óptica. Espectrorradiómetro</i> .....	30
3.3. PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DEL <i>DISPLAY</i> DE 7 SEGMENTOS OLED.....	30
3.3.1. <i>Cortado y lavado del sustrato rígido o flexible</i> .....	31
3.3.2. <i>Fotolitografía</i> .....	33
3.3.3. <i>Deposición de capas</i> .....	35
3.3.4. <i>Evaporación</i> .....	37
3.3.5. <i>Encapsulado</i> .....	39
3.3.6. <i>Soldadura de contactos</i> .....	39
3.4. CARACTERIZACIÓN DEL <i>DISPLAY</i> DE 7 SEGMENTOS OLED .....	39
3.4.1. <i>Caracterización eléctrica</i> .....	39
3.4.2. <i>Caracterización óptica</i> .....	41
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
4.1. RESULTADOS ELÉCTRICOS .....	45
4.1.1. <i>Display sobre sustrato rígido</i> .....	45
4.1.2. <i>Display sobre sustrato flexible</i> .....	48
4.2. RESULTADOS ÓPTICOS .....	49

4.2.1. Espectro de emisión.....	49
4.2.2. Evolución temporal del espectro de emisión. Degradación .....	53
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>57</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>59</b>

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Aplicaciones de pantallas OLED. A la izquierda pantalla flexible y a la derecha panel de iluminación .....	6
Figura 1.3 Estructura de matriz AMOLED .....	8
Figura 1.2 Previsión de ventas en AMOLEDs y PMOLEDs .....	8
Figura 1.4 Vistas frontal (izquierda) y lateral (derecha) del monitor Sony XEL-1 .....	9
Figura 1.5 Cifras económicas movidas por elementos basados en OLED en el mercado .....	11
Figura 1.6 Muestra el tiempo aproximado durante el cual estos distribuidores mantendrán un bajo volumen de producción de OLEDs y a partir de cuándo se iniciará su fabricación en masa.....	11
Figura 1.7 <i>Displays</i> formados por OLEDs transparentes (TOLEDs).....	12
Figura 1.8 Estructura física básica de un OLED .....	13
Figura 1.10 Estructura física implementada para nuestro <i>display</i> de 7 segmentos OLED .....	14
Figura 1.9 Estructura física mejorada de un OLED .....	14
Figura 1.11 Mejora de la eficiencia conseguida en la última década en OLEDs formados por moléculas y.....	16
Figura 1.12 Estructura física y polarización de un pixel SOLED .....	18
Figura 3.1 Vista general del módulo de limpieza por ultrasonidos (izquierda) y cubeta con cuadro de control ampliado (derecha) .....	22
Figura 3.2 Lámpara UV.....	23
Figura 3.3 Máscara del ánodo para proceso fotolitográfico .....	23
Figura 3.4 Caja de manipulación con guantes.....	24
Figura 3.5 Módulo de acceso a la caja.....	25
Figura 3.6 <i>Display</i> de configuración la caja de manipulación (información de estado) 25	
Figura 3.7 Sistema de <i>Spin Coating</i> ( <i>spinner</i> ), <i>panel de mandos</i> (centro) y <i>pedal para activarlo</i> (derecha) .....	26
Figura 3.8 Evaporadora (izquierda) y <i>display</i> de control (derecha) .....	28
Figura 3.9 Horno de vacío interno a la caja de manipulación con guantes .....	28
Figura 3.10 Analizador de parámetros de semiconductor .....	29
Figura 3.11 Espectrorradiómetro Konica Minolta CS-2000.....	30

Figura 3.12 Esquema completo de lavado del sustrato .....	32
Figura 3.13 Pistola de nitrógeno para secado .....	32
Figura 3.14 Resultado del proceso litográfico de definición de ánodo .....	33
Figura 3.15 Filtro de partículas (izquierda) y pipeta (derecha) .....	36
Figura 3.16 Esquema de funcionamiento de evaporadora de UPM por efecto Joule.....	37
Figura 3.17 Inserción de la máscara de cátodo en la evaporadora de URJC.....	38
Figura 3.18 Apariencia del dispositivo tras el soldado de contactos .....	39
Figura 3.19 Esquema de conexión para la medida de la característica I/V del dispositivo .....	40
Figura 3.20 Captura de pantalla que muestra la configuración de los parámetros de medición .....	41
Figura 3.21 Esquema de conexión para la caracterización óptica del dispositivo .....	42
Figura 3.22 Disposición de <i>display</i> y espectrorradiómetro para acometer la caracterización óptica del dispositivo.....	43
Figura 3.23 Captura de pantalla de la configuración software para la realización de varias medidas equiespaciadas en el tiempo.....	43
Figura 4.1 Numeración de los segmentos del <i>display</i> .....	45
Figura 4.2 Característica J/V de distintos segmentos del <i>display</i> realizado sobre sustrato rígido.....	47
Figura 4.3 Diagrama de bandas de energía del OLED fabricado .....	47
Figura 4.4 Característica J/V de distintos segmentos del <i>display</i> realizado sobre sustrato flexible.....	48
Figura 4.5 <i>Display</i> sobre sustrato rígido (izquierda) y sobre sustrato flexible (derecha) luciendo .....	49
Figura 4.6 Relación entre luminancia y longitud de onda del segmento 6 polarizado a 3V devuelta por el software del espectrorradiómetro.....	50
Figura 4.7 Relación entre longitud de onda y luminancia asociada al segmento 6 polarizado a 6V.....	51
Figura 4.8 Ajuste gaussiano de la curva de electroluminiscencia .....	52
Figura 4.9 Evolución de electroluminiscencia con el tiempo.....	53
Figura 4.10 Variación de la luminancia del OLED con el tiempo.....	54
Figura 4.11 Variación del área relativa de cada pico con el tiempo .....	55
Figura 4.12 Diagrama de desplazamiento de color de coordenadas CIE entre primera y última medición .....	56





# 1. Introducción

## 1.1. Historia de la Electrónica Orgánica

Se puede decir que la electrónica orgánica nació con el descubrimiento y desarrollo de los polímeros conductores por parte de Alan Heeger, Alan MacDiarmid y Hideki Shirakawa (Universidad de Pensilvania) en 1977. Publicaron dicho descubrimiento en el artículo “*Synthesis of electrically conducting organic polymers: Halogen derivatives of polyacetylene (CH)<sub>x</sub>*” en el diario de la comunidad química *Chemical Communications* (1). Este trabajo, considerado como un auténtico hito, permitió a estos tres científicos a ganar el Premio Nobel de Química en el año 2000. Curiosamente, ese mismo año se otorgó el Nobel de Física a J. S. Kilby, H. Kroemer y Z. Alferov, inventores del circuito integrado y dispositivos de heteroestructuras de alta velocidad para optoelectrónica y comunicaciones, por el papel que han jugado en la revolución tecnológica actual.

Las investigaciones en este campo no han cesado desde entonces. Así, en 1985, un grupo de científicos formado por A. Tsumura, H. Koezuka y T. Ando fabrica el primer dispositivo basado en esta tecnología. Se trataba de un transistor de efecto campo orgánico (OFET) (2).

En 1983 R. H. Partridge crea el primer LED orgánico basado en polímeros (3) y en 1987 Kodak lanza el primer LED orgánico (OLED) basado en moléculas orgánicas (4).

Poco después, en 1990, se inició con éxito el uso de polímeros semiconductores fluorescentes como capa activa (Poli, PPV y sus derivados) para diodos electroluminiscentes (PLEDs), lográndose operar con voltajes razonables (<10 V) y una eficiencia aproximada del 2% en los primeros productos fabricados.

Desde entonces, se desarrollan simultáneamente LEDs orgánicos basados tanto en moléculas o como en polímeros.

La cadena de adelantos continuó y fue en 1999 cuando pudimos ver por primera vez esta tecnología en el mercado. Fue Pioneer quien lanzó en esta fecha un lector de CD para vehículos con *display* formado por OLEDs monocromáticos.

En el campo de la electrónica se han desarrollado en las dos últimas décadas dispositivos electrónicos basados en materiales orgánicos que reproducen los ya existentes de tecnología inorgánica tales como diodos (5), diodos emisores de luz (LEDs) (6), fotodiodos (7), transistores de efecto campo (FET) (8), celdas electroquímicas emisoras de luz (LECs) (9) y los primeros dispositivos optoelectrónicos integrados (10).

La industria electrónica ha desarrollado también multitud de productos basados en esta tecnología tales como monitores, baterías, papel electrónico etc.

### 1.2.Comparación entre tecnología orgánica e inorgánica. Ventajas e inconvenientes

No se puede hablar realmente de una tecnología OLED, sino más bien de tecnologías basadas en OLED, ya que son varias las que hay, dependiendo del soporte y finalidad a la que vayan destinados.

Las ventajas de esta nueva tecnología son enormes, pero también tiene una serie de inconvenientes, aunque la mayoría de estos son totalmente circunstanciales, y desaparecerán en unos casos conforme se siga investigando en este campo y en otros conforme vaya aumentando su uso y producción.

Los OLEDs presentan claras ventajas respecto a los dispositivos inorgánicos (LEDs):

1. Presentan emisión frontal, lo que favorece su integración en píxeles.
2. Son más ligeros y pueden aprovechar la flexibilidad mecánica del plástico, o su semitransparencia cuando se usa como sustrato.
3. Muy delgados: OLED permite dispositivos de unos 3 mm aproximadamente, ya que las capas de polímeros u orgánicas son mucho más finas que las capas cristalinas, que son las que se utilizan en la actualidad.
4. Pueden fabricarse sobre cualquier sustrato, aunque sea irregular, flexible o de gran área.

5. La tecnología es mucho más accesible, y los costes de producción mucho menores.

Los elementos orgánicos y los sustratos plásticos serán más baratos en un futuro próximo. Las tecnologías de fabricación que permiten los OLEDs también son más económicas que las tecnologías actuales. El OLED permite imprimir una matriz de LEDs orgánicos con tecnologías similares a las de una impresora de inyección de tinta, con el ahorro en coste de producción que esto conlleva.

Sin embargo, los OLEDs presentan algunas desventajas que son actual tema de investigación:

1. Degradación: sensibilidad frente al medio ambiente (especialmente a la humedad y oxígeno) y fotoestabilidad moderada. Baja movilidad de portadores (tensiones altas para corrientes moderadas).
2. Estabilidad térmica moderada: temperatura de degradación entorno a los 300 °.
3. Tiempos de vida cortos: en el ámbito de las pantallas, el tiempo de vida de las capas OLED es bastante menor que el del LCD. Además, no es igual para todos los colores, siendo menor para el azul que para el verde y el rojo.

En general se estima una duración aproximada (dependiendo, claro está, de la tecnología empleada) de 14000 horas, frente a las 60000 estimadas para el LCD.

4. Alto precio actual: Esto no es ninguna contradicción. Que algo sea barato de producir no quiere decir que su precio en el mercado sea bajo. Este abaratamiento se basa en los costes de producción, y realmente se notará cuando las tecnologías basadas en OLED adquieran mayor difusión y venta.

Por otra parte, y dado que en este trabajo nos centramos en el campo de los *displays* basados en OLEDs, cabe destacar las importantes ventajas que presentan frente a tecnologías basadas en TFT(*Thin Film Transistor*)<sup>3</sup> -LCD (*Liquid Crystal Display*)<sup>4</sup>:

---

<sup>3</sup> Transistor de película fina

1. Son dispositivos intrínsecamente activos. Al ser el mismo diodo el emisor de luz, no es necesario que haya una fuente luminosa extra, como ocurre en las pantallas basadas en LCD, que requieren de fuente de luz trasera. Esto reduce de forma más que considerable el consumo de energía. En la práctica, esto va a beneficiar extraordinariamente al mercado de ordenadores portátiles, en el que uno de los grandes consumidores de energía es precisamente la pantalla. Aunque con tecnologías de retroiluminación mediante LEDs se ha disminuido bastante el consumo, éste sigue siendo mucho más alto que el que se podría conseguir con OLEDs.
2. Alto brillo y contraste: Al emitir los píxeles de OLED luz directamente, permiten un rango más grande de colores, más brillo y contraste, y más ángulo de visión, con relación a los actuales basados en LCD. Además, estos píxeles se pueden apagar totalmente, generando con ello el negro, color que actualmente se genera a partir de la mezcla de los demás, ya que en la tecnología LCD un píxel no se puede apagar (no tiene iluminación propia). El efecto de *píxel fijo* (normalmente negro, pero puede ser de otro color) que se produce como avería en los monitores basados en LCD actuales se debe a un fallo en el píxel, no a que este se apague.
3. Mayor rango de colores.
4. Amplio ángulo de visión (del orden de 165°).
5. Alta velocidad de respuesta.
6. Alta capacidad de integración.
7. Bajo coste potencial de producción.
8. Flexibilidad: Algo de lo que carece la tecnología LCD. Es posible imprimir o depositar las capas orgánicas sobre un soporte flexible (en algunas tecnologías basadas en OLED, el sustrato de impresión puede ser de plástico) y por tanto es

---

<sup>4</sup> Pantalla de cristal líquido

posible crear pantallas de una gran flexibilidad. Esto abre un abanico extraordinario de futuras aplicaciones, como pueden ser, por ejemplo, teclados táctiles flexibles basados en OLED, configurables totalmente por software, bases digitalizadoras con esta misma tecnología, pantallas curvas o enrollables y, en otro tipo de aplicaciones, fuentes de luz a las que se les puede dar la forma que se desee. Una de las aplicaciones más llamativas de estas nuevas tecnologías es la posibilidad de incorporar pantallas incluso en prendas de vestir o envoltorios de alimentos.

9. Escalabilidad: las tecnologías basadas en OLED permiten una gran escalabilidad, llegando a superar los alcanzados por pantallas LCD y superándolos. Precisamente una de las ventajas a partir de un cierto tamaño es el peso de una pantalla OLED, muchísimo menor a igualdad de tamaño que una pantalla LCD.
10. Transparencia: por sus propiedades, como ya se ha indicado, las tecnologías de pantallas basadas en OLEDs abren todo un mundo de nuevas aplicaciones, hasta ahora vetadas por no ser posible su aplicación con pantallas LCD. ¿Se imaginan, por ejemplo, una ventana con una pantalla OLED que, al oscurecerla, se pueda convertir a su vez en un monitor? ¿Y que esta ventana a su vez sea curva?.

Debido a la gran competencia de las pantallas TFT-LCD, el avance de las pantallas OLEDs es lento.

Sin embargo, las aplicaciones más prometedoras para OLEDs son monitores de TV ultraligeros y paneles de iluminación ambiental.

En este último ámbito, cabe destacar que los OLEDs son mucho más eficientes que las tradicionales fuentes de luz incandescentes, y pueden alcanzar rendimientos energéticos similares a los fluorescentes. La capacidad de sintonizar el color puede introducir un nuevo concepto de iluminación ambiental.

Además, la sustitución de las actuales fuentes incandescentes por estos sistemas podría suponer un ahorro del 50% en el consumo de electricidad destinado a iluminación (11).

Pero la degradación de los materiales OLED ha limitado su uso por el momento. Actualmente se está investigando para dar solución a diversos problemas, hecho que hará de los OLEDs una tecnología que puede reemplazar la actual hegemonía de las pantallas LCD.

El OLED podrá ser usado en todo tipo de aplicaciones: pantallas de televisión, pantallas de ordenador y *displays* en general.

Las pantallas de polímeros se están desarrollando a gran velocidad, consiguiendo mejoras constantes de color, tamaño y calidad de imagen. Una vez que los OLEDs se puedan adaptar a pantallas de mayores dimensiones y aplicaciones curvilíneas, se harán con un nicho de mercado de más de 30.000 millones de dólares que representan las pantallas planas y otras aplicaciones, y su implementación no tendrá techo.

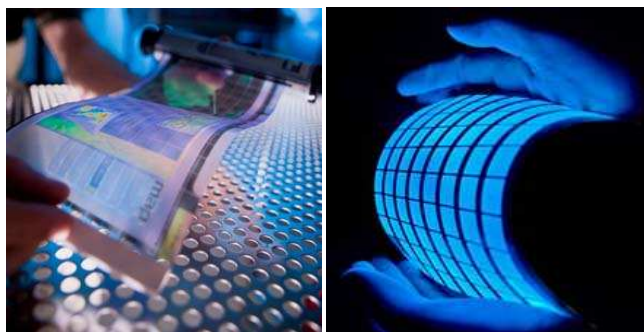


Figura 1.1 Aplicaciones de pantallas OLED. A la izquierda pantalla flexible y a la derecha panel de iluminación

### 1.3. Estado del arte

Hasta la década de los 90, el mercado de los monitores estuvo dominado por la tecnología de tubo de rayos catódicos (*Cathode Ray Tube*). Este tipo de pantalla ha adquirido una gran calidad y refinamiento, pero adolece de excesivo volumen y peso, así como de un alto consumo.

Sin embargo, la gran demanda de dispositivos portátiles de bajo consumo, delgados y ligeros hizo aumentar el interés por las pantallas planas (*Flat Panel Displays*).

En consecuencia, la tecnología más eficaz para obtener este tipo de pantallas demandadas ha venido de la mano de los cristales líquidos LCDs (*Liquid Crystal Displays*), que han dominado el mundo del ordenador portátil hasta el momento.

También hemos de mencionar la tecnología de pantallas de plasma (PDP, *Plasma Display Panel*), que irrumpió en el mercado a principios de los 90. Éstos poseen alto contraste y luminosidad, pero baja resolución. Es por ello que el LCD también ha desplazado al plasma en monitores de grandes dimensiones (12).

El cristal líquido es un filtro de luz polarizada que necesita iluminación trasera, difusores, polarizadores y cierta tecnología de transistores (matriz activa) para asegurar un tiempo de permanencia de la luz adecuado al ojo humano. En este sentido, los OLEDs han demostrado ser una alternativa eficaz que supera todos los inconvenientes de los LCDs.

Actualmente los OLEDs adolecen de una relación vida media/intensidad insuficiente para ciertos productos; sin embargo, esta tecnología en algunas aplicaciones ha empezado a competir con los LCDs en el mercado (teléfonos móviles, PDAs...).

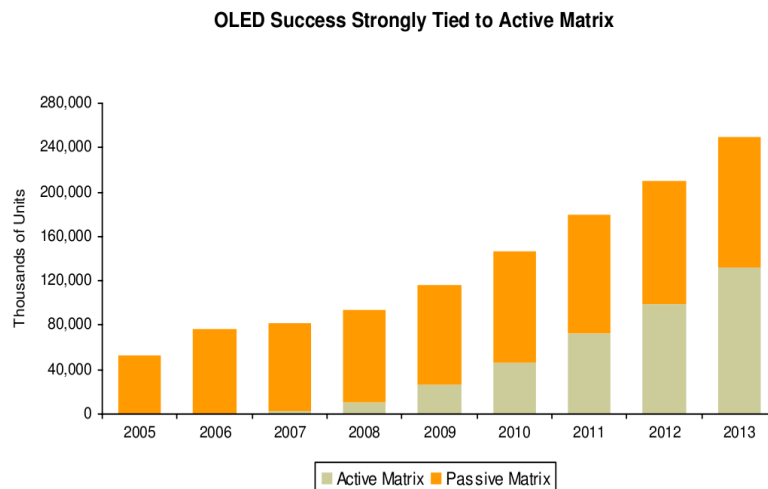
Existen dos tipos de pantallas de OLEDs según sea la alimentación de cada pixel: PMOLED (basadas en matrices pasivas) y AMOLED (basadas en matrices activas TFT).

Las pantallas AMOLED, a diferencia de las PMOLED, mantienen el estado (ON/OFF) y nivel de iluminación mediante un driver que controla los transistores (13). De este modo la intensidad se controla de una manera continua y no es necesario enviar un valor concreto de corriente en cada refresco de la pantalla, como sucede en el caso de las pantallas PMOLED. Por esto, las pantallas AMOLED logran un menor consumo respecto de las PMOLED (14).

Las pantallas PMOLED no son adecuadas para tamaños grandes, mientras que las AMOLED sí, aunque el proceso de fabricación es más costoso debido a la inclusión de la capa TFT.

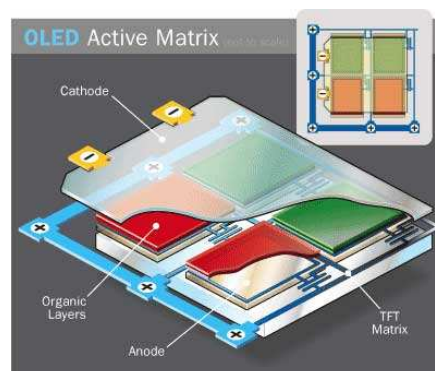
Pese a que en la actualidad el índice de penetración en el mercado de pantallas

AMOLED es mucho más pequeño que el de pantallas PMOLED, las predicciones para años posteriores muestran una gran mejoría en las pantallas AMOLED (15). Se muestra el número de unidades fabricadas y previstas para ambas tecnologías en la Figura 1.2.



**Figura 1.2** Previsión de ventas en AMOLEDs y PMOLEDs

En la Figura 1.3 se muestra un ejemplo de construcción de matriz activa (AMOLED) formada por cuatro OLEDs, en la cual podemos apreciar la presencia de la capa TFT que controla el estado de polarización e iluminación.



**Figura 1.3** Estructura de matriz AMOLED

## Introducción. Capítulo 1

La carrera en el mundo de los televisores OLED la inició Sony en 2007 lanzando la Sony XEL-1, con una pantalla de 11 pulgadas dotada de una resolución de 960 x 540 pixels, un contraste superior a 1.000.000:1 y un espesor de tan sólo 3mm (16).

Se trata sin lugar a dudas de un paso importante, pero aún no puede ser considerada una televisión OLED verdaderamente comercial: Sony admite que están teniendo pérdidas en cada unidad (17). El precio oficial en EE.UU es de 2500 € y la vida del producto se estima en 30000 horas.



Figura 1.4 Vistas frontal (izquierda) y lateral (derecha) del monitor Sony XEL-1

Compañías como Samsung, Motorola, LG o Nokia presentan desde hace tiempo terminales móviles con *displays* basados en tecnología OLED. Ejemplo de esto son los Nokia N85 y N86. Sin embargo, es Samsung la que se hace de momento con el 97% del mercado en *displays* AMOLED para teléfonos móviles con la venta de unos 23 millones de unidades con *display* AMOLED este año (18).

En la actualidad, Sony y Samsung son los mayores competidores en el mercado de los OLEDs.

Sony inició una inversión de 210 millones de dólares para permitir fabricar en masa pantallas OLED de tamaño mediano, las cuales estarían disponibles para su distribución previsiblemente este verano de 2009.

Como principal rival de Sony en esta carrera por la implantación del OLED a gran escala nos encontramos a Samsung, quien ya comercializa varios modelos de televisores OLED de hasta 55 pulgadas. Estos televisores, además de consumir un 40% menos que los LCD convencionales, no contienen plomo ni mercurio, lo que demuestra el compromiso de esta tecnología con la preservación del medio ambiente; no sólo en términos de consumo sino también en términos de compuestos de fabricación (19).

Como gran desventaja por el momento nos encontramos con el alto precio de los productos, motivado por la novedad que representa esta tecnología y es de esperar que descienda tras unos años en el mercado.

Según ha publicado Samsung, dentro de cinco años, los OLEDs estarán previsiblemente presentes en el 50% de teléfonos móviles y 20% de cámaras digitales.

Como podemos deducir de lo anteriormente expuesto, el desarrollo de productos basados en OLEDs se encuentra a la vanguardia dentro del mercado tecnológico.

Actualmente existen más de 100 compañías investigando y desarrollando productos basados en OLEDs, entre ellas grandes multinacionales de nivel contrastado (20):

Samsung SDI (Corea), Pioneer (Japón), Universal *Display* Corporation (EE.UU), Philips (Holanda), OSRAM (EE.UU), 3M (EE.UU), TDK (Japón), IBM (EE.UU), Fujitsu (Japón), Canon (Japón), Hitachi (Japón), Motorola (EE.UU), NEC (Japón), Sony (Japón), Xerox (EE.UU), Siemens (Alemania) o Bayer (Suiza).

Pese a que nos hemos centrado en el uso de OLEDs como elemento para construcción de pantallas, también debemos considerar su uso en relación a la iluminación ambiental mediante paneles formados por matrices de OLEDs. Así que posiblemente, las aplicaciones más prometedoras para la tecnología OLED además de los monitores de TV ultraligeros, son los paneles de iluminación ambiental. De ahí que haya compañías como OSRAM involucradas en el desarrollo de los mismos.

En cuanto a las previsiones de mercado en un futuro cercano, los OLEDs dominarán el mercado del *display* electrónico, pero esto no se dará hasta posiblemente llegado el año 2011. La tecnología de fabricación es todavía bastante cara pero en un período de tiempo disminuirá el coste de producción con la fabricación en masa de componentes.

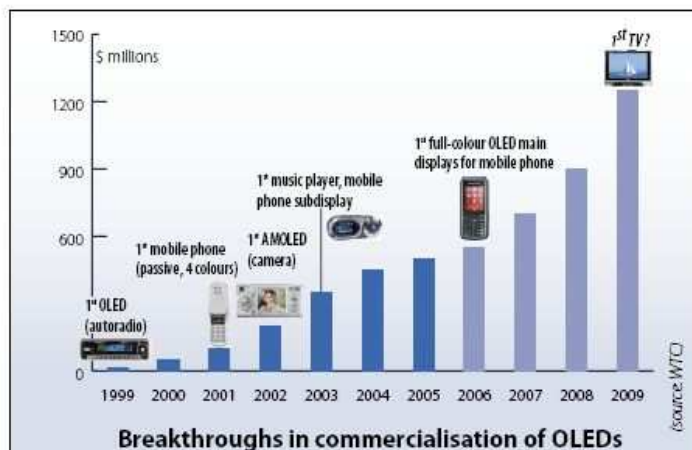


Figura 1.5 Cifras económicas movidas por elementos basados en OLED en el mercado

En unos años los OLEDs comenzarán a controlar el mercado y los analistas predicen que moverán un valor aproximado de 6 billones de dólares en el año 2018.

Otro ejemplo de aplicación de interés es el OLED transparente. Podríamos aplicar esta tecnología a diversos campos, como por ejemplo, a las ventanas de un hogar u oficina.

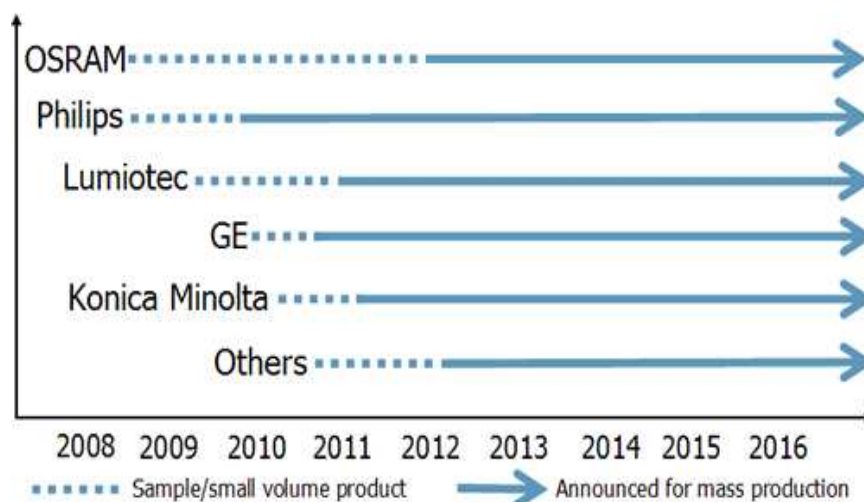


Figura 1.6 Muestra el tiempo aproximado durante el cual estos distribuidores mantendrán un bajo volumen de producción de OLEDs y a partir de cuándo se iniciará su fabricación en masa

Imaginemos que un cierre de cristal que se encuentra en un salón o dormitorio, deja a la vista el interior de éstos a otros edificios o jardines; gracias a la tecnología OLED Transparente (TOLED), podríamos cerrar esa falta de intimidad sin necesidad de persianas o cortinas.



Figura 1.7 *Displays* formados por OLEDs transparentes (TOLEDs)

### 1.4. Estructura básica de un LED orgánico

#### 1.4.1. Introducción

La diferencia de la electrónica orgánica frente a la tradicional electrónica inorgánica radica en el uso de compuestos orgánicos.

Los compuestos semiconductores inorgánicos son los elementos del grupo V de la Tabla Periódica (Si y Ge típicamente) o combinaciones de los grupos III-V (GaAs).

Los compuestos orgánicos, sin embargo, basan su estructura en el átomo de Carbono(C).

Sumergiéndonos más en el campo del OLED, definimos Optoelectrónica Orgánica como la disciplina que estudia el aprovechamiento, mediante interfaz electrónica, de ciertas propiedades semiconductoras de materiales orgánicos y su capacidad de emitir luz; es decir, estudia los dispositivos optoelectrónicos basados en materiales moleculares o poliméricos junto con sus aplicaciones en el ámbito de los sensores, comunicaciones, etc.

En su forma más simple, un OLED está constituido por una capa orgánica (a la que

llamaremos capa activa) confinada entre un cátodo metálico (típicamente de Al), y un ánodo típicamente de ITO (*Indium Tin Oxide*)<sup>5</sup> sobre un sustrato. Dicha capa posee tiene propiedades electroluminiscentes (emite luz cuando se polariza). En la Figura 1.8 se muestra un esquema de la estructura física de un OLED:



Figura 1.8 Estructura física básica de un OLED

Esta estructura puede complicarse tanto como permita la tecnología, de forma que en vez de una capa intermedia emisora tengamos un conjunto de capas, aparte de la capa activa emisora de luz, encargadas de inyectar y transportar los portadores (electrones y huecos) desde el contacto correspondiente (cátodo y ánodo).

En la Figura 1.9 se observan estructuras más complejas formadas por varias capas orgánicas. Observamos que se incluye, además de las capas anteriormente mencionadas y para la mejora del comportamiento del OLED, una capa que favorece la inyección de electrones y otra que favorece la inyección de huecos. Cabe reseñar que, tal como mencionamos con anterioridad, es necesario que tanto el sustrato como el ánodo sea transparente para poder extraer la luz emitida por el OLED. Para el caso del FOLED (OLED Flexible) se usa principalmente sustrato de plástico PET y para el OLED rígido sustrato de vidrio.

---

<sup>5</sup> Óxido de Estaño Indio

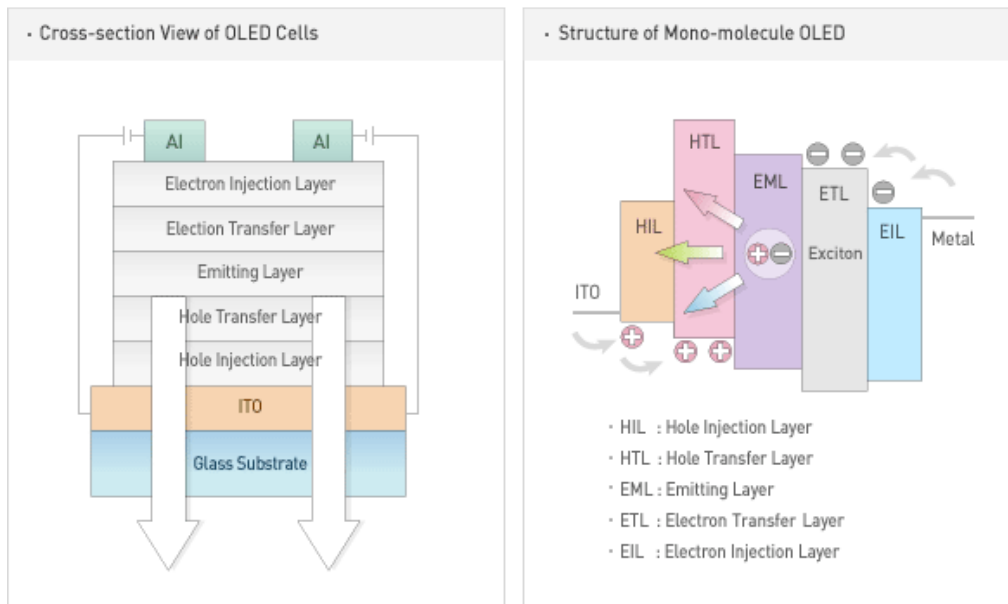


Figura 1.9 Estructura física mejorada de un OLED

Como podemos apreciar en la imagen derecha de la Figura 1.9, al polarizar adecuadamente ánodo y cátodo, los electrones y huecos inyectados se recombinan en la capa emisora y se produce el fenómeno de electroluminiscencia.

La estructura de capas que usaremos para el caso de estudio de este PFC será la mostrada en la Figura 1.10:

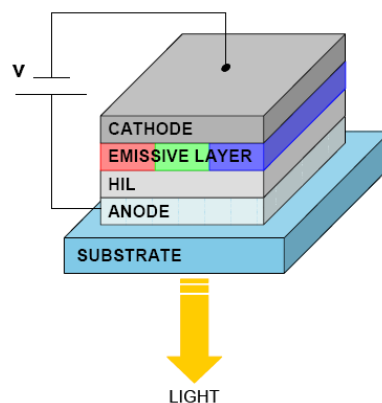


Figura 1.10 Estructura física implementada para nuestro *display* de 7 segmentos OLED

Como podemos observar, estará compuesta por un sustrato (vidrio o plástico), ánodo (ITO), capa de inyección de huecos (PEDOT:PSS), capa activa (polímero comercial) y cátodo (Ba-Al). Esta estructura la explicaremos de forma más detallada en capítulos posteriores.

### 1.4.2. Clasificación de los OLEDs

Los compuestos orgánicos pueden ser clasificados de acuerdo a multitud de parámetros. Sin embargo, el estudio de estos compuestos respecto del ámbito electrónico, los clasifica en dos grandes grupos de acuerdo al peso molecular del material utilizado como capa activa: moléculas de bajo peso molecular (SMOLEDs-*Small Molecule Organic Light Emitting Diode*)<sup>6</sup> y moléculas de alto peso molecular (PLEDs-*Polymeric Light Emitting Diode*)<sup>7</sup>.

1. SMOLEDs: capa emisora formada por moléculas conjugadas de un tamaño menor a 10 monómeros, conocidas como oligómeros. Los OLEDs con esta capa activa se denominarán también OLEDs moleculares.
2. PLEDs: capa emisora formada por moléculas conjugadas de un tamaño mayor a 10 monómeros, conocidas como Polímeros. Los OLEDs con esta capa activa se denominarán también OLEDs poliméricos.

Cabe reseñar alguna característica intrínseca a estos dos tipos de materiales:

- Oligómeros: forman cristales de tipo molecular. Las moléculas son aplicadas mediante la técnica de deposición multicapa a alto vacío.
- Polímeros: a diferencia de los cristales moleculares son solubles, lo que permite que sean depositados mediante impresión convencional o por centrifugado (*spin coating*), y de esta manera, obtener películas delgadas de gran área a muy bajo coste. Esta técnica la veremos con más detalle en capítulos posteriores para la fabricación de nuestro dispositivo OLED.

---

<sup>6</sup> OLED de molécula pequeña

<sup>7</sup> OLED de polímero

Las diferencias entre estos dos tipos surgen a raíz de los métodos de fabricación y preparación: la deposición en vacío se usa para materiales orgánicos semiconductores de bajo peso molecular, y el *spin-coating* se usa para depositar una disolución (sobre el sustrato deseado con ciclos de calentamiento/secado) de materiales poliméricos.

La principal ventaja de los materiales basados en moléculas es la pureza, dado que pueden ser limpiados hasta alcanzar el nivel deseado. Los polímeros, por el contrario, pueden contener impurezas fruto del proceso de preparación (restos de disolventes por ejemplo). Sin embargo, el material polimérico suele presentar voltajes de trabajo inferiores al basado en moléculas, además de un proceso de fabricación actualmente más económico y sencillo (*spin coating*).

Además, la principal ventaja de los OLEDs poliméricos es que permite el desarrollo de superficies de conducción más grandes utilizando una técnica de deposición similar a la de impresión de tinta.

En la Figura 1.11 podemos observar el rápido avance que ha sufrido la tecnología polimérica respecto de la molecular en los últimos años.

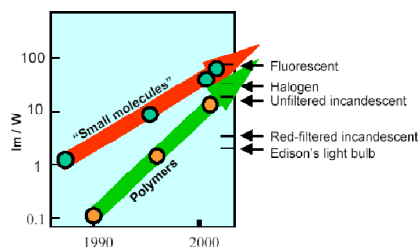


Figura 1.11 Mejora de la eficiencia conseguida en la última década en OLEDs formados por moléculas y

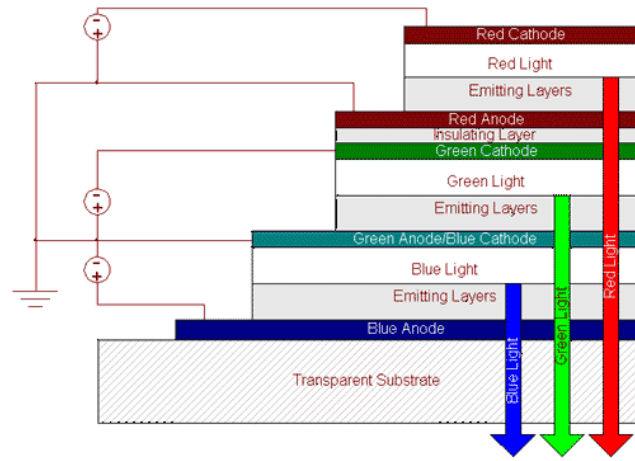
El límite teórico del OLED molecular en eficiencia es del 25% aproximadamente debido a la estructura intrínseca del mismo (recombinación en los estados de doblete y triplete) (21). Por otro lado, en la actualidad, se consiguen eficiencias cercanas al 100% en el OLED (mediante el uso de polímeros fosforescentes) (22).

### 1.4.3. OLEDs en el mercado

Independientemente del tipo de material orgánico (polimérico o molecular) podemos clasificar distintos tipos de OLEDs atendiendo a su funcionalidad característica:

- FOLEDs: acrónimo usado para referirse a los OLEDs flexibles. Se trata de un OLED sobre sustrato flexible.
- TOLED: Transparent OLED. Consisten en un OLED con ánodo y cátodo semitransparentes. Este tipo de OLED permite controlar su transparencia y luminosidad de forma dinámica.
  - SOLED: acrónimo de *Stack* OLED. Consiste en un agrupamiento de TOLEDs dispuestos verticalmente formando un pixel. Los subpíxeles son individualmente controlados mediante el ajuste de la corriente en cada uno de los tres TOLEDs formantes. Ello implica que cada pixel puede emitir en todos los colores (23). La arquitectura SOLED aspira a desbancar potencialmente los tradicionales CRTs, LCDs y plasma. A todas las ventajas que mencionamos en apartados anteriores ha de sumársele el hecho de que con la estructura SOLED sólo se necesita un píxel para generar un color mientras que en otras tecnologías se necesitan tres píxeles, uno para cada color. Esto triplica la resolución de la imagen (24).
- PHOLED: Phosphorescent OLED. Rendimiento potencial mayor al de los dispositivos fosforescentes actuales basados en tecnología inorgánica.
- WOLED: White OLED. Estos dispositivos específicos para iluminación ambiental alcanzarán en un futuro cercano eficiencias de hasta 150 lm/W frente a los 90 lm/W que llegan a ofrecer los tubos fluorescentes actuales (25).

La Figura 1.12 muestra la estructura y polarización de un pixel SOLED.



Structure and Drive Circuitry of UDC Stacked Organic Light Emitting Device  
(One of Several Illustrated in UDC's US Patent No 5,917,280)

Figura 1.12 Estructura física y polarización de un pixel SOLED

## 2. Objetivos

El objetivo de este PFC es el desarrollo completo y la caracterización eléctrica y óptica de un *display* de siete segmentos basado en tecnología OLED. Así pues abordaremos y explicaremos de forma precisa cada una de estas etapas desde el comienzo de la fabricación del dispositivo hasta finalizar con la medición de las características eléctricas y ópticas del mismo.

Puesto que el proceso de fabricación del dispositivo es manual, la probabilidad de éxito en el dispositivo final, que se traduce en una buena luminosidad de cada segmento, es relativamente baja debido a la “artesanía” de fabricación en varias etapas y subetapas. Es por ello que hemos procedido a la fabricación de varios dispositivos y elegido los que han proporcionado mejores resultados.

Con el fin de comprobar diferencias en cada etapa de fabricación y poder optimizar las mismas en función del tipo de OLED utilizado, a lo largo de este PFC hemos realizado varios *displays* de siete segmentos variando características de cada etapa de fabricación tanto sobre sustrato rígido como sobre sustrato flexible. Con ello hemos conseguido optimizar cada etapa de fabricación para cada tipo de sustrato y así poder conseguir una mejor luminosidad en cada segmento OLED.

Para la etapa de fabricación del dispositivo hemos hecho uso de los equipos del Laboratorio de Tecnología Electrónica (URJC) así como del Laboratorio de cristales líquidos del Departamento de Tecnología Fotónica de la UPM.

Para el proceso de medición de las características eléctricas y ópticas del dispositivo OLED hemos utilizado un analizador de parámetros de semiconductor y un espectrorradiómetro respectivamente, ambos pertenecientes al Departamento de Tecnología Electrónica de la URJC. Mediante el analizador de parámetros de semiconductor obtendremos la característica  $J/V$  del dispositivo. Mediante el espectrorradiómetro obtendremos las características de luminancia y cromaticidad y podremos medir la degradación de nuestro OLED con el paso del tiempo.



## 3. Materiales y métodos

En este capítulo mostraremos todas las técnicas y pasos de fabricación utilizados para el completo desarrollo de nuestro *display* orgánico de siete segmentos. Asimismo describiremos el equipo experimental utilizado para las tareas de fabricación y caracterización.

### 3.1. Equipo experimental de fabricación

Todo el proceso de fabricación del dispositivo se ha llevado a cabo tanto en el laboratorio de Cristales Líquidos de la Universidad Politécnica de Madrid, como en el laboratorio de Diseño de Circuitos Digitales y Tecnología Electrónica (LabTel), de la Universidad Rey Juan Carlos, situado en las instalaciones del Centro de Apoyo Tecnológico (CAT) en Móstoles. El proceso de fotolitografía se ha realizado exclusivamente en las instalaciones de la UPM dado que en LabTel no disponemos del equipo necesario para la realización de esta etapa.

A continuación detallaremos los módulos y equipos de trabajo de la sala blanca.

#### 3.1.1. Módulo de limpieza por ultrasonidos

Compuesto por tres depósitos de ultrasonidos (con agua y jabón, acetona e isopropanol) con una capacidad de 6 litros cada uno. Éste módulo es utilizado para la limpieza de los sustrato. Los depósitos están conectados a un motor que genera ondas de ultrasonidos de 40 KHz que, al generar burbujas microscópicas, limpian minuciosamente nuestras muestras de impurezas externas a nivel molecular.

En la Figura 3.1 se muestra de cerca una cubeta de ultrasonidos del CAT.

Podemos configurar tanto el tiempo de exposición de nuestras muestras como la temperatura de la cubeta mediante botones dispuestos en el mismo módulo de limpieza.



Figura 3.1 Vista general del módulo de limpieza por ultrasonidos (izquierda) y cubeta con cuadro de control ampliado (derecha)

### 3.1.2. Lámpara UV y máscara de alineamiento

Este equipo se usa en el proceso de fotolitografía de la muestra. Tal como podemos observar en la Figura 3.2, consta de cuatro módulos: fuente de luz UV, temporizador, controlador de intensidad de luz y superficie de alineamiento de máscara y sustrato.

El controlador de intensidad permite llegar a una potencia de 450 W y el temporizador nos permite seleccionar un tiempo de exposición de entre 1 y 999 s.

La muestra se alinea con la máscara en la superficie de alineamiento y posteriormente se introduce en la lámpara UV durante el tiempo establecido para la correcta realización de la fotolitografía.

La máscara se usa para proteger de la radiación UV. Como se puede observar, la superficie que se encuentre debajo de la zona sombreada (máscara) no será sometida a dicha radiación.

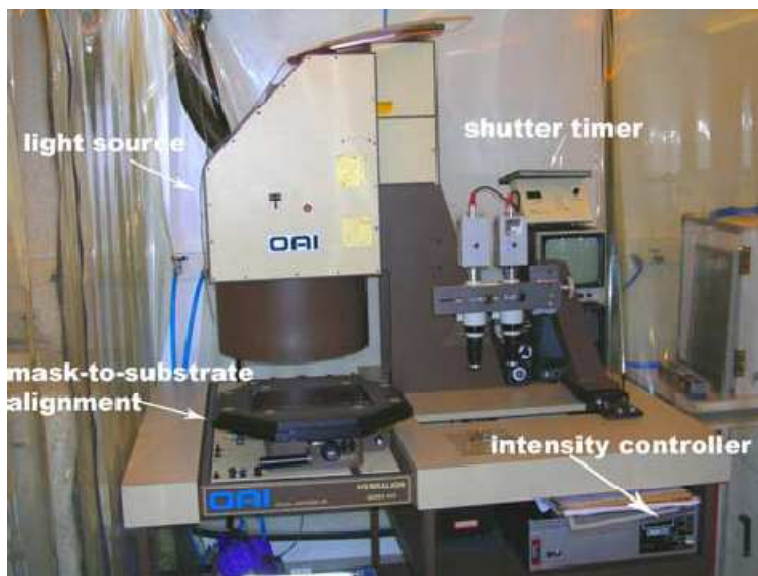


Figura 3.2 Lámpara UV

La Figura 3.3 muestra la máscara correspondiente al ánodo de nuestro *display*.

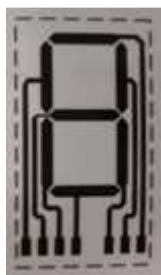


Figura 3.3 Máscara del ánodo para proceso fotolitográfico

### 3.1.3. Caja de atmósfera inerte (glove-box)

Esta caja es el módulo central de trabajo, dentro de la cual se realizarán todos los procesos de deposición y secado de las capas orgánicas, así como la evaporación del cátodo.

Se trata de una caja de  $2 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$  cuya atmósfera es de  $\text{N}_2$ . Cuenta con un sistema de purificación y en ella las concentraciones de  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{O}_2$  son muy bajas.

En el interior de la caja disponemos de todo el material necesario para la realización de dichos procesos. De este modo contamos con los siguientes equipos en su interior:

- Sistema de *Spin Coating*.
- Evaporadora de efecto Joule.
- Horno de curado.

Además cuenta con un módulo de acceso, llamado antecámara, para poder introducir en nuestra caja todos los elementos de trabajo necesarios, tales como pipeta, *displays*, disolventes, polímero, guantes de látex, filtros de partículas, pistola de nitrógeno, etc.



Figura 3.4 Caja de manipulación con guantes

La Figura 3.4 muestra una vista general de la caja de guantes. Para poder trabajar en su interior debemos introducir los brazos en los guantes, lo que conlleva algunos problemas de precisión a la hora de realizar el trabajo de fabricación del *display*.

En la Figura 3.5 podemos ver de un modo más preciso uno de los dos módulos de acceso a la caja de manipulación con guantes para poder introducir material (el otro módulo es de mayor tamaño).

La metodología a seguir para la correcta introducción de un objeto en nuestra caja será:

- Abrimos tapa externa a la caja, introducimos objeto en el túnel de acceso y cerramos tapa externa.
- Evacuamos la atmósfera externa del túnel de acceso.

- Rellenamos túnel con  $N_2$  proveniente de una botella externa.
- Abrimos tapa interna de la caja y extraemos objeto.
- Cerramos tapa interna.



Figura 3.5 Módulo de acceso a la caja

El proceso crítico es el de introducción de objetos desde el exterior al interior de la caja dado que la atmósfera interna es de nitrógeno y no debemos permitir la entrada de atmósfera externa para evitar la penetración de moléculas de oxígeno y/o vapor de agua que degradarían el dispositivo orgánico.

Para la extracción de objetos desde el interior al exterior únicamente debemos cerciorarnos de que la tapa interna esté cerrada antes de proceder a la extracción del objeto con la apertura de la tapa externa.

La caja de manipulación con guantes posee un *display* táctil externo que nos muestra su estado actual y nos avisa en caso de producirse alguna situación anómala.

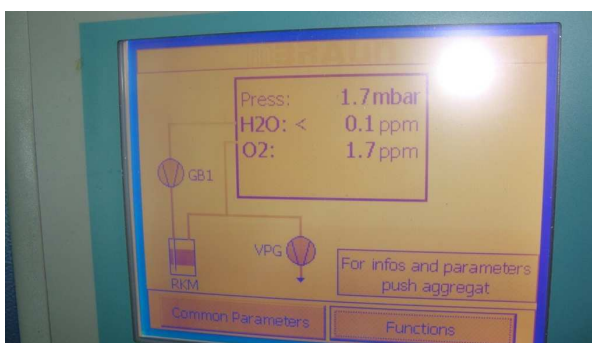


Figura 3.6 *Display* de configuración de la caja de manipulación (información de estado)

Es importante controlar que las concentraciones de agua y oxígeno no superen 0.2-0.3 ppm. Aun así, a veces resulta inevitable superar estos márgenes sobre todo en el proceso de depósito por centrifugado.

### 3.1.4. Sistema de depósito de capas delgadas por centrifugado (*Spin Coating*)

Este sistema lo utilizamos para depositar una capa delgada o película de polímero o capa orgánica en general. El material deberá estar en estado de disolución, para lo cual habrá que realizar previamente las disoluciones del material en el disolvente adecuado a la concentración pertinente (1% típicamente). El *spinner* girará al régimen de r.p.m que le indiquemos (típicamente entre 4000 y 6000 rpm) y distribuirá mediante fuerza centrífuga una capa uniforme sobre toda la superficie de la muestra. Previo al comienzo de giro, el *spinner* succionará la muestra a su base al pulsar el interruptor *ON/OFF* para que ésta permanezca fija durante la etapa de girado. En este sistema se puede configurar:

- Velocidad angular de giro (medida en r.p.m).
- Tiempo de giro. El sistema mantendrá la velocidad de giro indicada hasta la finalización del tiempo establecido, tras el cual dejará de girar. El sistema se activa mediante un pedal.



Figura 3.7 Sistema de *Spin Coating* (*spinner*), panel de mandos (centro) y pedal para activarlo (derecha)

La Figura 3.7 muestra el *spinner* y el *display* para configurar velocidad angular en r.p.m y tiempo de giro. Se puede configurar la pendiente de flanco o tiempo de

transición, es decir, el tiempo que queremos que tarde el *spinner* desde que es activado hasta que alcanza la velocidad angular de giro permanente así como el paso para realizar dicho avance hasta llegar a la velocidad de giro constante.

Una vez configurados los parámetros el *spinner* comenzará a funcionar cuando presionemos un pedal situado en la parte inferior de nuestra caja de manipulación con guantes.

### 3.1.5. Evaporadora

Se usará para la evaporación de los materiales que conforman el cátodo de nuestro OLED. La evaporación del metal se origina por efecto Joule.

Esta evaporadora está formada por una cámara de acero inoxidable conectada a dos bombas de vacío. Pequeñas cestas fijadas a los electrodos de la cámara contienen el material a evaporar (Al y Ba en nuestro caso).

Introduciremos nuestra muestra por la parte inferior de la bomba y tras haber alcanzado el vacío necesario (del orden de  $10^{-5}$  Torr), se procede a evaporar el metal, que quedara adherido a la superficie de la muestra que no esté recubierta. Para evitar la evaporación del metal en la parte donde se realizarán los contactos del ánodo utilizaremos unos marcos de metal que preservaran dichas zonas.

La evaporadora incorpora un módulo de control. Entre otros, podemos controlar el grosor de la capa de Al sobre nuestra muestra.

Como se puede apreciar, la evaporadora que tenemos instalada en el CAT se encuentra dentro de la caja de guantes con el fin de que la capa orgánica no esté en contacto con la atmósfera de oxígeno y vapor de agua hasta que no se finalice el proceso de evaporación y encapsulado de las muestras.

La evaporadora puede alcanzar un valor mínimo de presión de aproximadamente  $10^{-7}$  Torr.

En la Figura 3.8 podemos observar el *display* que nos informa de las condiciones de vacío en el interior de la bomba.



Figura 3.8 Evaporadora (izquierda) y *display* de control (derecha)

### 3.1.6. Horno de vacío

Lo utilizaremos para el secado de muestras tras la aplicación de procesos de:

- Lavado: para secar la muestra.
- Depósito de capas orgánicas: para evaporar el disolvente. Las muestras se introducen en la bandeja interior y el horno se programa para ofrecer una temperatura determinada durante el tiempo estipulado. Esta temperatura dependerá de la temperatura de evaporación del disolvente.

La Figura 3.9 muestra una vista general del horno.



Figura 3.9 Horno de vacío interno a la caja de manipulación con guantes

## 3.2. Equipo experimental de caracterización

### 3.2.1. Caracterización eléctrica. Analizador de parámetros de semiconductor

Usaremos este analizador para medir la característica I-V de nuestros OLEDs. El sistema posee un generador de pulsos para poder alimentar nuestro dispositivo.

El equipo es controlado mediante un software (*Metricstech*) específicamente diseñado para la medición de parámetros de semiconductor. Este software nos permitirá configurar el tipo de dispositivo a medir (diodo, transistor...) así como decidir principalmente las características y tipo de señal de excitación del dispositivo (DC o tren de pulsos) y tipo de medida que queremos realizar (barrido I/V o muestreo en el caso de DC en el dominio del tiempo).

El rango dinámico de voltaje del analizador es de  $\pm 40$  V con una resolución de  $40 \mu\text{V}$ . Posee una impedancia de entrada de  $10^{13} \Omega$  y una impedancia de salida de  $0.3 \Omega$ .

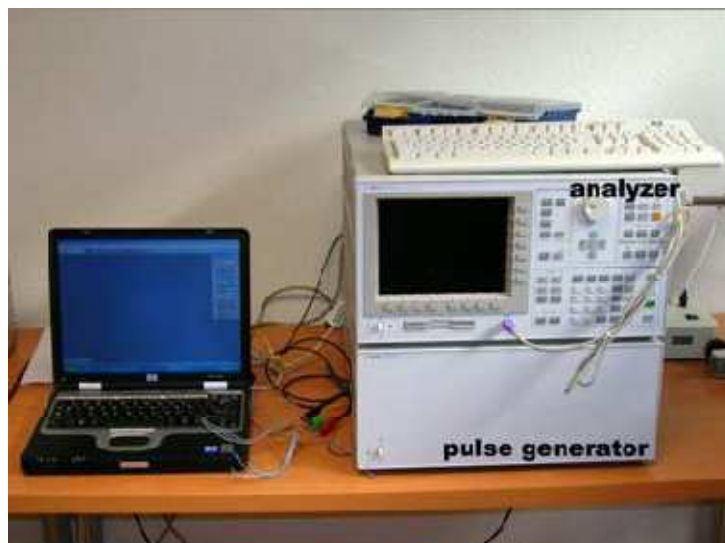


Figura 3.10 Analizador de parámetros de semiconductor

### 3.2.2. Caracterización óptica. Espectrorradiómetro

Las medidas de luminancia y cromaticidad del OLED se realizarán mediante el espectrorradiómetro Konica Minolta CS-2000. Este sistema incorpora un fotodiodo capaz de medir en el rango de longitudes de onda desde los 380 nm a los 780 nm en intervalos de 1 nm. Además es capaz de distinguir valores de luminancia inferiores a  $10^{-5} \text{cd/m}^2$ .



Figura 3.11 Espectrorradiómetro Konica Minolta CS-2000

Además, el espectrorradiómetro nos devolverá los datos de medición mediante su interfaz software asociada (CS-S10w). Tiene capacidad para medir espectros de emisión, luminancia, radiancia y coordenadas CIE.

### 3.3. Procedimiento de fabricación del *display* de 7 segmentos OLED

Nuestro *display* de siete segmentos está basado en dispositivos orgánicos electroluminiscentes (OLEDs)

El procedimiento de fabricación del OLED polimérico es completamente distinto al del OLED molecular. Mientras que en el primero la deposición de las capas orgánicas se realiza mediante la técnica de *spin coating*, en el segundo se realiza por sublimación en alto vacío.

La ventaja de la técnica de *spin coating* radica en su facilidad de uso. Basta con fijar

nuestra muestra al *spinner*; depositar el polímero o capa activa en disolución con una pipeta y activarlo para que empiece a girar y distribuya esta capa de forma uniforme por toda la muestra mediante centrifugado.

La ventaja de la técnica por sublimación radica en el control que tenemos sobre el grosor de la capa que depositamos así como la uniformidad de la misma, aunque el coste de producción es mucho mayor que en la primera.

Definiremos la geometría de los OLEDs de nuestro *display* de siete segmentos mediante fotolitografía. Esta técnica permite diseñar y construir las pistas y segmentos de conducción de nuestro *display* (ánodo). En nuestro caso estarán formadas por un conductor transparente muy utilizado en microelectrónica, ITO.

El proceso completo de fabricación se muestra de modo general en el siguiente esquema.

1. Cortado y lavado del sustrato de rígido o flexible.
2. Fotolitografía para el diseño del ánodo.
3. Deposición de capas orgánicas.
4. Evaporación de metales.

Todo el proceso se realiza en sala limpia y adicionalmente las dos últimas fases de este proceso de fabricación se realizan dentro de la caja de atmósfera de nitrógeno para evitar la degradación de las capas orgánicas, muy sensibles tanto a la presencia de oxígeno como de vapor de agua. Las capas de nuestro OLED poseen un grosor del orden de 100 nm, por lo que cualquier mínima impureza insertada en cualquier etapa puede dar al traste con el proceso entero de fabricación e impedir el correcto funcionamiento de nuestro dispositivo.

A continuación detallamos cada etapa del proceso de fabricación.

### 3.3.1. Cortado y lavado del sustrato rígido o flexible

En este PFC hemos realizado *displays* de siete segmentos tanto sobre sustrato rígido como sobre sustrato flexible. El sustrato está inicialmente recubierto de una capa de ITO

de 100 nm de espesor.

Cortaremos nuestras muestras de vidrio o plástico con unas dimensiones aproximadas de 30x55 mm<sup>2</sup>. Una vez dispongamos de nuestras muestras convenientemente cortadas procederemos al lavado de las mismas. Para ello serán introducidas sucesivamente en tres cubetas con ultrasonidos de 40 KHz de frecuencia.

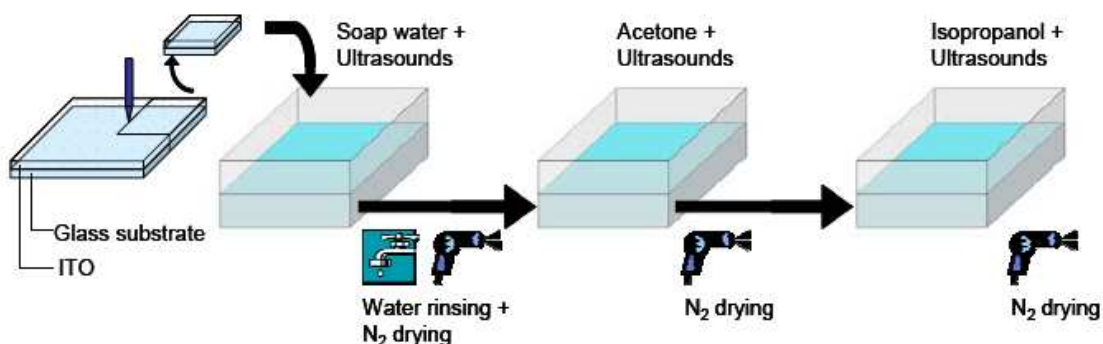


Figura 3.12 Esquema completo de lavado del sustrato

Primeramente introduciremos nuestra muestra en una cubeta con agua y jabón durante un periodo aproximado de 25 minutos. Tras este tiempo procederemos a la retirada de la muestra e inmersión de la misma en agua destilada con el fin de eliminar posibles restos de jabón en la misma. Se secará la muestra con una pistola de nitrógeno (Figura 3.13).



Figura 3.13 Pistola de nitrógeno para secado

Posteriormente, introduciremos nuestra muestra en una segunda cubeta con acetona durante 15 minutos y procederemos al secado de la misma con la pistola. Por último introduciremos la muestra en una tercera cubeta con isopropanol durante un tiempo aproximado de 15 minutos y procederemos de igual manera al secado de la misma.

### 3.3.2. Fotolitografía

El objetivo de esta fase de fabricación es definir y realizar nuestro ánodo de ITO. Éste formará el dibujo de las pistas y segmentos de nuestro *display* de siete segmentos.

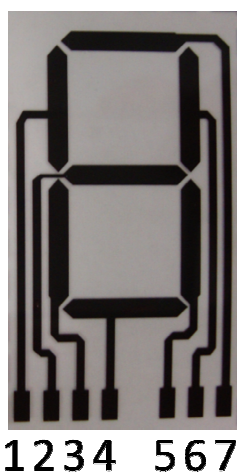


Figura 3.14 Resultado del proceso litográfico de definición de ánodo

Así pues seguiremos una serie de subetapas para eliminar el ITO del resto de la muestra; es decir, eliminaremos todo el ITO que no pertenezca a las pistas y segmentos de nuestro *display*. De este modo quedan definidos todos los ánodos de nuestros OLEDs (cada segmento es un OLED). Una vez finalizada la etapa anterior de lavado y secado de muestras, el proceso a seguir es el siguiente:

Depositaremos mediante una pipeta con un filtro de partículas de 0.45  $\mu\text{m}$  fotorresina (Microposit S1818) de modo uniforme sobre nuestra muestra y accionaremos el *spinner* durante un tiempo total de 30 s. Durante los 10 primeros segundos aumentaremos la velocidad de giro de forma gradual para al final de ese tramo alcanzar un régimen de giro constante de 4500 r.p.m. aproximadamente.

Una vez termine el *spinner* colocaremos nuestra muestra en el horno de curado durante 30 minutos a una temperatura de 90°C.

Tras esto, utilizaremos nuestra máscara de *display* de 7 segmentos y la lámpara UV para insolar la fotorresina que no pertenece a los segmentos y pistas del *display*. Para ello colocaremos la máscara sobre la muestra y la introduciremos en la lámpara UV a una potencia de 450 W durante 30 s.

Tras esto procederemos a retirar la fotorresina insolada con la lámpara (la que no ha sido protegida por la máscara; es decir, la que no pertenece al dibujo de nuestro *display*) mediante la inmersión de la muestra en una cubeta con un revelador de fotorresina (*Microposit Developer Concentrate*) durante unos 20s ó 30s hasta que hayamos comprobado visualmente que la fotorresina se ha desprendido de nuestra muestra. Introduciremos posteriormente la muestra en agua destilada para limpiar posibles restos y procederemos al secado de la misma en el horno durante 30 minutos a una temperatura entre 100 °C y 110 °C. Tras esto, conseguimos tener nuestra muestra cubierta entera con ITO y también con fotorresina sobre el ITO únicamente en las pistas y segmentos que conforman nuestro *display* de 7 segmentos.

Dado que el objetivo es que finalmente exista ITO únicamente en las pistas y segmentos del *display*, el siguiente paso es eliminar el ITO del resto de la muestra y también la fotorresina que queda sobre el ITO que queremos mantener. Esto se realizará mediante ataque químico con un ácido formado por 50% H<sub>2</sub>O (agua), 49% HCl (ácido clorhídrico) y 1% HNO<sub>3</sub> (ácido nítrico).

Este ataque será distinto en función del tipo de sustrato que estemos utilizando (rígido o flexible) debido a que el ITO depositado sobre los sustratos es diferente. En el caso de sustrato rígido, el ataque se llevará a cabo a una temperatura de 65 °C durante un tiempo aproximado de 25 s mientras que en el caso de utilizar sustrato flexible lo haremos a una temperatura de 25 °C durante un tiempo de 35 s.

La elección de este tiempo de exposición al ácido es un factor crítico ya que un tiempo de exposición menor del óptimo implicará que no se ha eliminado completamente el

ITO que no pertenece a nuestro ánodo (ITO sobrante), mientras que un tiempo de exposición mayor al óptimo implicará que además de eliminarse el ITO sobrante, también se podrán ver afectadas las pistas de ITO de nuestro *display* (sobre ataque).

Tras el ataque ácido sumergiremos nuestra muestra en un disolvente de fotorresina (Microposit Remover 1165) para eliminar la fotorresina restante y después en agua destilada para eliminar restos de dicho *remover*.

Es importante comprobar con un polímetro que efectivamente, tras el ataque ácido, las pistas y segmentos de ITO conducen y el resto de la muestra se comporta como un circuito abierto.

### 3.3.3. Deposición de capas

En esta etapa procederemos a la correcta deposición de las capas activa y de inyección de portadores sobre nuestra muestra. Previo al comienzo de este proceso volveremos a lavar las muestras consecutivamente en agua y jabón, acetona e isopropanol en cubetas de ultrasonidos; tal como se realizó en la primera etapa de fabricación detallada en la Figura 3.12.

Una vez lavada la muestra, todo este proceso se llevará a cabo en nuestra caja de atmósfera inerte. Con el fin de mejorar el comportamiento de nuestro dispositivo, previo a la deposición de la capa activa o capa de conducción (formada en nuestro caso por polímero) realizaremos la deposición de una capa intermedia de inyección de portadores (la más usada por la comunidad científica es PEDOT:PSS). El uso de esta capa intermedia tiene un doble objetivo (26):

1. Aumenta la inyección de huecos, lo cual implica una mayor eficiencia del dispositivo.
2. Ayuda a la conducción y suaviza la superficie de ITO.

El PEDOT:PSS es una mezcla de dos polímeros: PEDOT (Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)) y PSS (poly(styrenesulfonate)).

El hecho de que el PEDOT:PSS tenga un aspecto de emulsión acuosa, facilitará su

deposición sobre nuestra muestra mediante *spin coating*.

Previo a la deposición del PEDOT:PSS, y con el fin de homogeneizar esta emulsión, someteremos esta sustancia a un baño de ultrasonidos durante un período aproximado de 20 minutos. Después filtramos con un filtro de partículas de  $0.45\ \mu\text{m}$  para evitar la posible presencia de partículas no homogeneizadas en nuestra capa y procederemos a la deposición sobre nuestra muestra mediante una pipeta.



Figura 3.15 Filtro de partículas (izquierda) y pipeta (derecha)

Una vez la emulsión esté depositada sobre nuestra muestra, procederemos a girarla mediante el *spinner* a una velocidad angular de unas 6000 r.p.m durante un período aproximado de 30 s, resultando una capa de PEDOT:PSS de un grosor aproximado a 50 nm.

El siguiente paso consistirá en secar la muestra en el horno de nuestra caja de manipulación con guantes a una temperatura de aproximadamente  $120^\circ$  durante un periodo de 30 minutos.

Cabe reseñar que se ha elegido dicha velocidad angular de giro para conseguir una capa aproximada de unos 50 nm. Reducciones o aumentos en la velocidad de giro en 2000 r.p.m provocarán un aumento o reducción del grosor de la capa en un valor aproximado del 10% del valor actual. Además, a velocidades bajas (menor de 4000 r.p.m) no obtendremos una distribución homogénea sobre la superficie del dispositivo. Con 50 nm de grosor de capa obtenemos buenos resultados de conductividad.

En cuanto al polímero, lo diluiremos con un disolvente orgánico, lo calentaremos y lo someteremos a ultrasonidos hasta que la disolución presente un aspecto homogéneo.

El polímero utilizado será PFO (*Poly(9,9-dioctylfluorene)*), que presenta un pico de emisión en 420 nm que se corresponde con el color azul. Utilizaremos como disolvente orgánico Tolueno o Tetrahidrofurano en disoluciones aproximadas del 1% en peso.

Tal como procedimos en caso del PEDOT:PSS, someteremos nuestra disolución a un campo de ultrasonidos durante un período aproximado de 25-30 minutos para conseguir una buena homogenización de la misma. Tras este paso, filtramos la disolución (usando nuestro filtro de partículas del mismo modo que en el caso anterior (0.45  $\mu\text{m}$ ) y la depositaremos sobre la capa PEDOT:PSS. Activaremos nuestro *spinner* a 6000 r.p.m durante 30 s para la correcta deposición de la capa sobre nuestra muestra.

Procederemos inmediatamente después al secado de las muestras en el horno de curado durante un tiempo aproximado de 30 minutos.

#### 3.3.4. Evaporación

En esta etapa procederemos a la evaporación del cátodo común de nuestro *display* de 7 segmentos OLED. El. Con el fin de reducir la tensión umbral de los segmentos se ha utilizado un cátodo formado por una capa de Bario (de unos pocos nm) y otra de Al (de unos 100nm).

Este proceso se llevará a cabo en la evaporadora interna a la caja de manipulación con guantes de que disponemos en el CAT de la URJC.

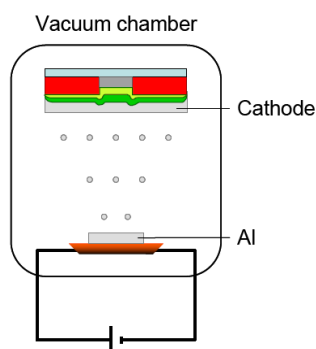
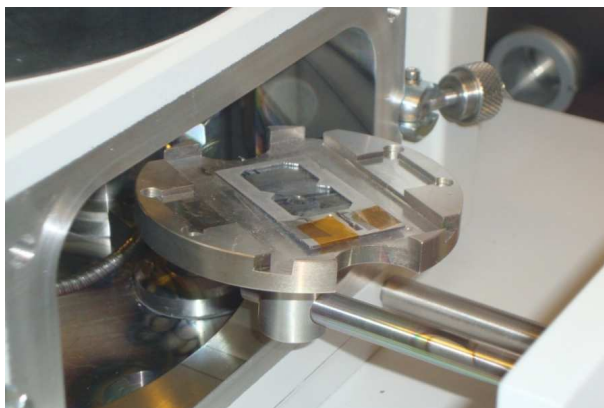


Figura 3.16 Esquema de funcionamiento de evaporadora de UPM por efecto Joule

Introduciremos nuestra muestra en la parte inferior de la bomba de vacío y el Ba y Al se colocarán sobre dos barquillas de tungsteno que a su vez estarán conectadas sobre los electrodos. El paso de corriente hará que ambos se evaporen y se depositen por toda la cámara. Utilizaremos una máscara para definir el dibujo del cátodo sobre nuestra muestra.



**Figura 3.17 Inserción de la máscara de cátodo en la evaporadora de URJC**

Desde que la evaporadora se pone en funcionamiento, tardará unas horas en alcanzar el vacío necesario para proceder a una buena evaporación del metal sobre la muestra, es decir, una buena unión o adherencia entre nuestro cátodo (Ba-Al) y nuestra capa activa (polímero). Para que se produzca esta adherencia en condiciones óptimas la evaporadora tendrá que haber conseguido un nivel de vacío de aproximadamente  $10^{-6}$  Torr. Un *display* nos informa en todo momento de la evolución de los parámetros de la evaporadora.

El valor de corriente que circulará por el interior de la evaporadora será aumentado poco a poco hasta un valor de 8 A para el Ba y 12 A para el Al. Esta corriente aumentará la temperatura del Al hasta llevarlo a su punto de sublimación para poder adherirse a las muestras que tenemos en la cámara de la evaporadora. Es lo que llamamos evaporación por efecto Joule.

### 3.3.5. Encapsulado

El encapsulado del *display* se realiza para evitar la degradación del dispositivo por contacto con oxígeno o agua (27). Para el *display* sobre sustrato rígido se utiliza una resina *epoxy* y una tapa de vidrio. Para el *display* sobre sustrato flexible se utiliza una resina curable con luz UV.

### 3.3.6. Soldadura de contactos

Una vez esté realizado el encapsulado del *display* procederemos a la soldadura de los contactos para poder acometer las mediciones eléctricas y ópticas posteriores.

Realizaremos las soldaduras correspondientes a los ánodos del dispositivo con indio.

La correspondiente al cátodo común se realizará con tintura de plata.

Posteriormente aplicaremos Araldit sobre los cables ya soldados con el fin de que se fijen a nuestro *display* de modo permanente y facilitar así las posteriores mediciones.

La Figura 3.18 muestra el resultado final del proceso.



Figura 3.18 Apariencia del dispositivo tras el soldado de contactos

## 3.4. Caracterización del *display* de 7 segmentos OLED

### 3.4.1. Caracterización eléctrica

En este apartado mediremos la característica I/V en cada segmento de nuestro *display*. Para ello haremos uso de un medidor de parámetros de semiconductores (*Agilent 4155C*) y un generador de pulsos (*Agilent 41501B*). Mediante el generador de pulsos excitaremos nuestro segmento OLED y procederemos a la medida de su I/V con el analizador de parámetros.

El tren de pulsos utilizado para la excitación del dispositivo posee un ciclo de trabajo del 0.5% (0.5 ms de ancho de pulso y un período total de 100 ms). Usamos un tren de pulsos en vez de una tensión continua para poder establecer un tiempo de refresco y evitar el sobrecalentamiento de nuestro dispositivo. De este modo evitamos la degradación del mismo así como la reducción de su tiempo de vida.

La interconexión de los elementos de medición utilizada es la mostrada en la Figura 3.19.

Utilizaremos una caja de Faraday para aislar nuestra muestra de posibles ruidos eléctricos externos.

Un software instalado en nuestro PC (*Agilent I/CV Lite*) (28) nos permite la configuración del tipo de medición que realizará el analizador así como la exportación de los datos.

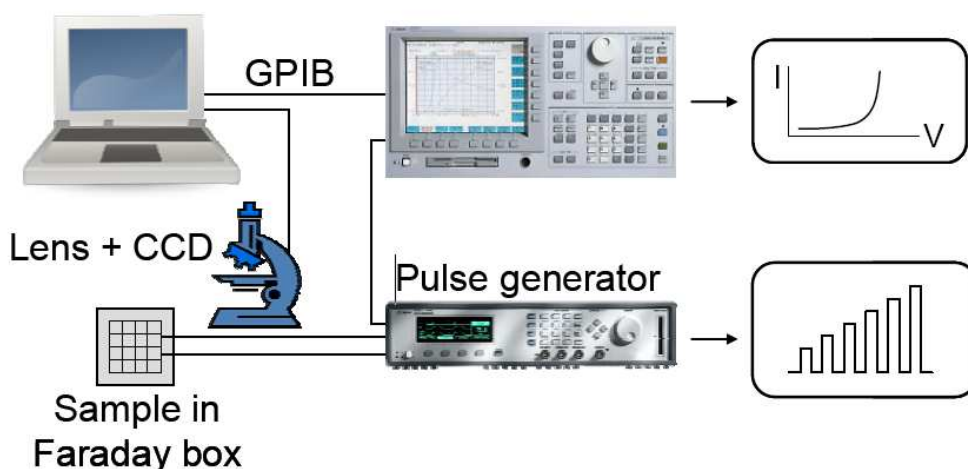


Figura 3.19 Esquema de conexión para la medida de la característica I/V del dispositivo

Como hemos mencionado con anterioridad, someteremos a nuestro OLED a una excitación con un tren de pulsos y procederemos a la medición de la característica I/V del mismo.

A continuación procedemos a la configuración de los parámetros de medida.

Iniciaremos nuestra medición con un barrido entre 0 y 4 V con el objetivo de que nuestro OLED se vaya calentando y finalizaremos con un valor máximo de voltaje adecuado para poder visualizar con claridad la característica I/V del segmento OLED.

Este valor depende del segmento a medir. Dado que los segmentos de la parte superior tienen una pista más larga, poseerán una resistencia serie ( $R_s$ ) mayor y por tanto tendrán una tensión umbral un poco mayor que la de los segmentos situados en la parte inferior del *display*. Delimitaremos la corriente máxima que circula por nuestro OLED hasta un valor de 2.5 mA (inicialmente estará limitada a 0.1 mA y aumentaremos el valor a medida que aumente el rango dinámico del barrido) con el fin de evitar la degradación eléctrica del mismo.

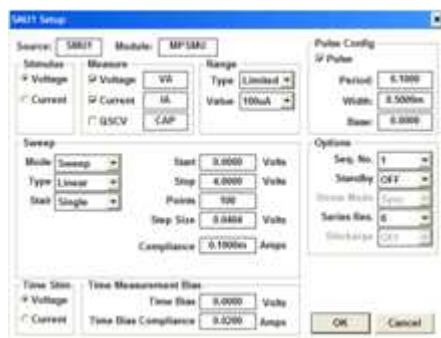


Figura 3.20 Captura de pantalla que muestra la configuración de los parámetros de medición

De este modo ya estamos listos para proceder a la medición I/V. Indicaremos si deseamos realizar una única medida o varias seguidas con los valores establecidos anteriormente. Mediante este software el analizador nos retornará todos los valores I/V obtenidos en cada medición y podremos exportarlos mediante un fichero *.dat* para la representación gráfica de los mismos.

### 3.4.2. Caracterización óptica

El espectrorradiómetro nos proporcionará los valores de radiancia, luminancia y coordenadas de color de nuestro OLED para así poder evaluar la calidad del mismo como dispositivo electroluminiscente.

Para la realización de las medidas utilizaremos el espectrorradiómetro *Konica Minolta*

CS-2000. El esquema lógico implementado será el mostrado en la Figura 3.21.

Mediante el generador de funciones (*TGA 1241*) y el osciloscopio (*TEKTRONIX TDS 1012*) configuraremos una señal de excitación en forma de pulso, con un ciclo de trabajo del 0.5% (100 ms de periodo y 0.5 ms de ancho de pulso).

Utilizaremos el amplificador (*TREK 601 C*) para conseguir un valor de amplitud de pulso de 6 V. Esta amplitud es suficiente para que el dispositivo luzca correctamente

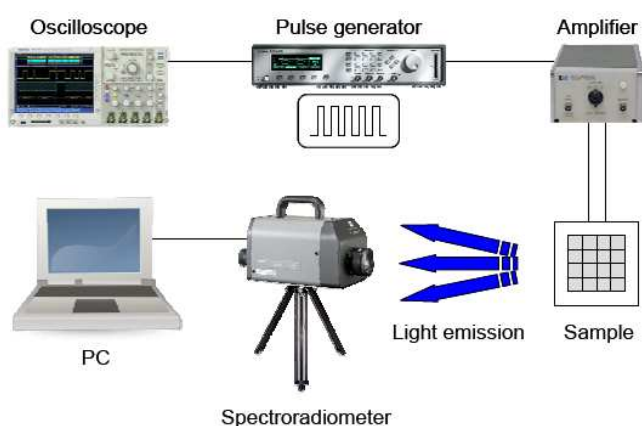


Figura 3.21 Esquema de conexión para la caracterización óptica del dispositivo

. En la Figura 3.22 se muestra la conexión para la polarización del segmento OLED del *display* y el espectrorradiómetro situado en frente.

La medición se realizará cubriendo los dispositivos con cartulina para garantizar que la luz medida por el espectrorradiómetro provenga únicamente del segmento OLED.

Utilizaremos una resistencia ( $220 \Omega$ ) para monitorizar la corriente en el OLED a 2 mA.

El espectrorradiómetro se controla mediante un software instalado en nuestro PC (*CS-S10w*). Mediante éste, indicaremos el modelo de espectrorradiómetro que realizará las medidas, así como los intervalos de medición de las mismas. Con el fin de obtener la degradación óptica de nuestro OLED, realizaremos un total de 10 medidas del mismo segmento con un intervalo de 15 minutos de duración entre cada una. Obviamente, con nuestro OLED encendido durante todo este periodo de tiempo (135 minutos).

Se muestra la configuración del software en la Figura 3.23.

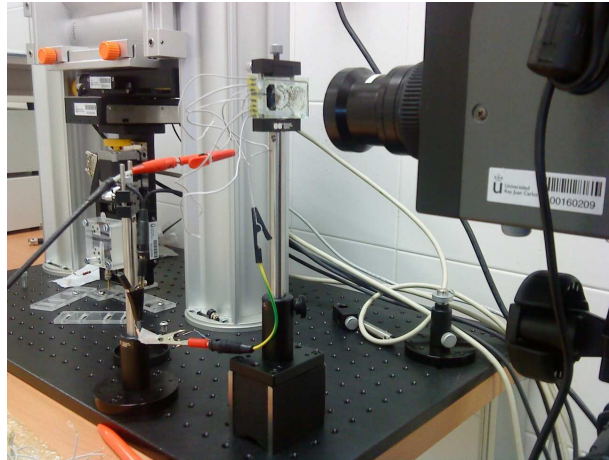


Figura 3.22 Disposición de *display* y espectrorradiómetro para acometer la caracterización óptica del dispositivo

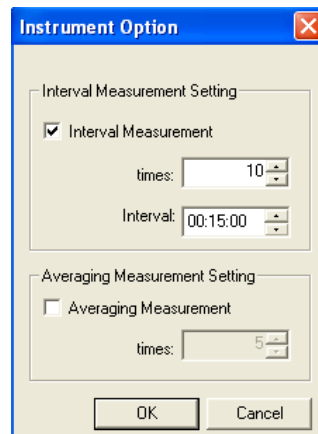


Figura 3.23 Captura de pantalla de la configuración software para la realización de varias medidas equiespaciadas en el tiempo

El software nos devolverá después de ese período todos los datos de medición por pantalla. De este modo podremos visualizar los valores de luminancia y cromaticidad asociados a cada medida así como la degradación del dispositivo durante ese período total de tiempo.



## 4. Resultados

En este apartado presentamos los resultados de la fabricación y caracterización eléctrica y óptica de nuestros dispositivos. Presentamos un *display* OLED sobre sustrato rígido y sobre sustrato flexible. Asimismo se presentan las curvas de caracterización eléctrica y los espectros de emisión.

### 4.1. Resultados eléctricos

Una vez realizadas las medidas de las características I/V, se procederá a la exportación de los datos para poder realizar una representación gráfica de los mismos. Excitaremos nuestros dispositivos con un tren de pulsos de amplitud creciente hasta 6 V y ciclo de trabajo del 0.5%. Primeramente convertiremos nuestra característica I/V a J/V dividiendo por la superficie de cada segmento OLED medido (en nuestro caso todos los segmentos tienen una superficie aproximada de 11 mm<sup>2</sup>). Utilizaremos la nomenclatura mostrada en la Figura 4.1 para cada segmento.

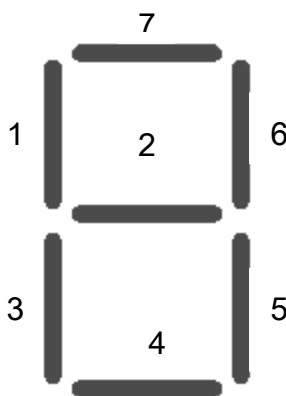


Figura 4.1 Numeración de los segmentos del *display*

#### 4.1.1. *Display* sobre sustrato rígido

En la Figura 4.2 se muestra la característica J/V de distintos segmentos de nuestro *display* de sustrato rígido. Como se puede apreciar, las tensiones umbrales ( $V_{\gamma}$ ) de todos los segmentos están entre 4 y 5 V.

Las diferencias en la tensión umbral se deben a que cada segmento posee una resistencia serie ( $R_s$ ) distinta, que es debida a la diferente longitud de la pista que conecta el *pad* con el segmento en sí. Sabemos por datos que proporciona el fabricante que la  $R_s$  del ITO de nuestro *display* de sustrato de vidrio es de  $20 \Omega/\text{cuadro}$ . Calculando la longitud de cada pista podemos calcular la  $R_s$  teórica asociada a cada segmento y compararla con la calculada a partir de la curva J/V (calculando la inversa de la pendiente a altos niveles de inyección). Así, obtenemos los resultados mostrados en la Tabla 4.1:

Número de segmento	$R_s$ teórica ( $\Omega$ )	$R_s$ medida en I/V ( $\Omega$ )
4	160	142.65
7	880	621
5	280	224.4
6	640	470
2	600	416.3

Tabla 4.1  $R_s$  asociada a cada segmento

Observamos que, como es lógico, los valores más altos de  $R_s$  corresponden a los segmentos con pistas más largas. Esto implica que la pendiente de la característica J/V será menor en esos segmentos puesto que tienen asociada una  $R_s$  más grande.

En la Figura 4.2 comprobamos que los datos representados son correctos, siendo los segmentos con pista más larga (S7, S6 y S2) los que menor pendiente tienen.

Los valores de la tensión umbral obtenidos son relativamente bajos (entre 4 y 5 V). El uso de la capa de Bario reduce considerablemente la tensión umbral de los segmentos del *display*.

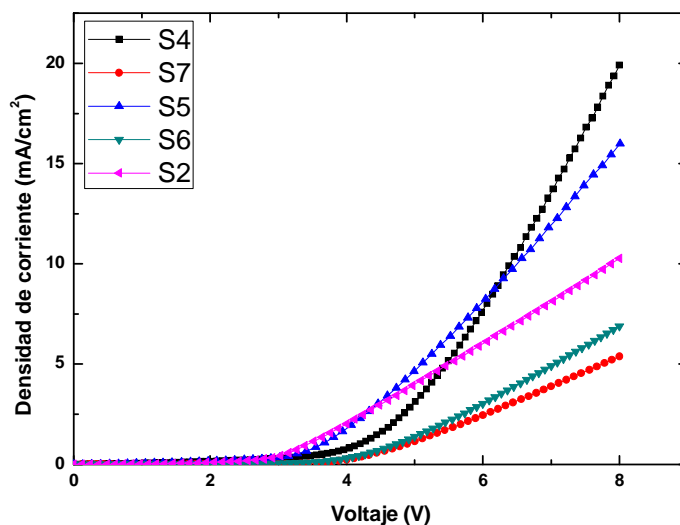


Figura 4.2 Característica J/V de distintos segmentos del *display* realizado sobre sustrato rígido

La Figura 4.3 muestra un diagrama de bandas de energía y la mejora que implementa el bario al reducir la energía necesaria para que los electrones alcancen la banda de conducción o LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*)<sup>8</sup>.

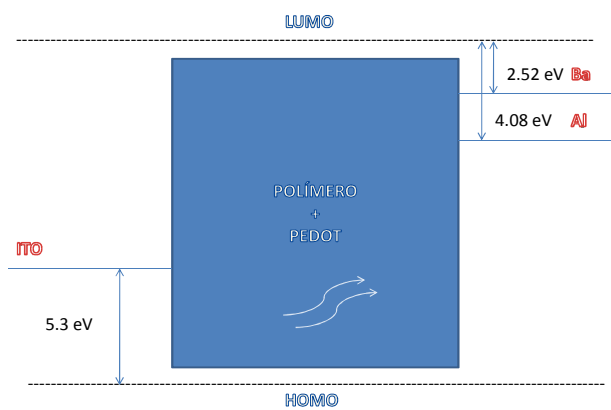


Figura 4.3 Diagrama de bandas de energía del OLED fabricado

<sup>8</sup> Orbital molecular desocupado de energía más baja

4.1.2. *Display* sobre sustrato flexible

En la Figura 4.4 se muestra la característica J/V de varios segmentos OLED del *display* de sustrato flexible. Se puede apreciar que la tensión umbral es considerablemente mayor en comparación con la observada en el *display* de sustrato rígido.

El aumento de la tensión umbral de la muestra sobre sustrato flexible frente a la realizada con sustrato de vidrio se puede deber a varios factores en la fabricación del dispositivo:

- Posible mala adherencia del ITO sobre el sustrato PET.
- Difícil optimización del proceso de ataque ácido del ITO sobre PET.
- Las altas temperaturas alcanzadas en el proceso de evaporación por efecto Joule pueden afectar al buen funcionamiento del dispositivo.

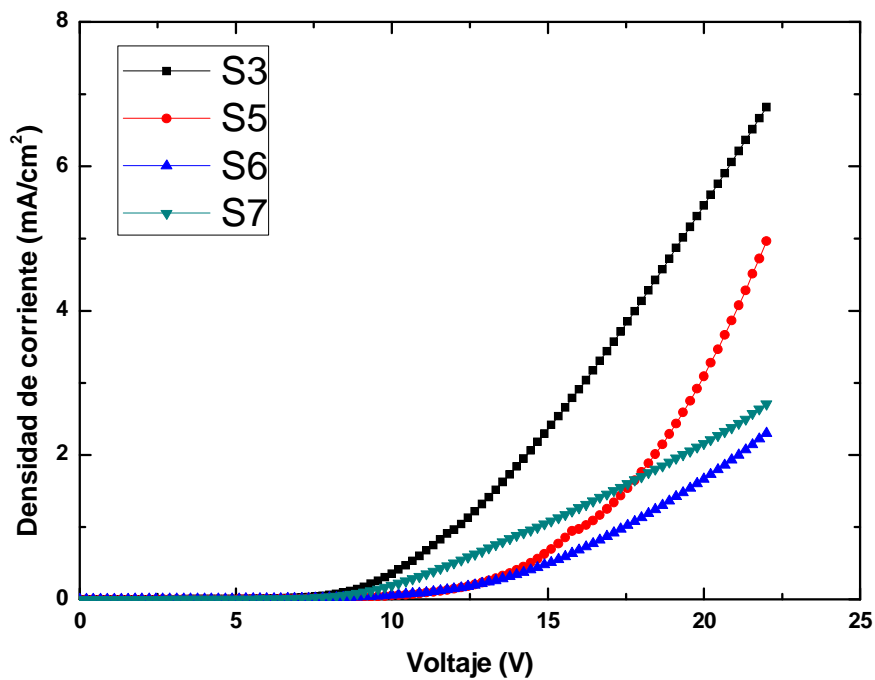


Figura 4.4 Característica J/V de distintos segmentos del *display* realizado sobre sustrato flexible

## 4.2. Resultados ópticos

En la Figura 4.5 (izquierda) se observa el *display* 7 segmentos sobre vidrio luciendo en configuración del número '3'. Se puede apreciar una buena intensidad de emisión aunque en algunas zonas los segmentos no lucen homogéneamente. En la Figura 4.5 (derecha) se observa el *display* 7 segmentos sobre PET con el segmento '4' polarizado. Podemos comprobar que el comportamiento emisor es considerablemente peor que el obtenido utilizando vidrio como sustrato. Se observa una emisión generalizada de todo el segmento perceptible al ojo, pero difícilmente medible con la cámara disponible en el laboratorio para captar imágenes (*Sony DCR-TRV22E*). Aun así la fotografía muestra un aumento de la emisión no homogénea en la parte izquierda del segmento polarizado.



Figura 4.5 *Display* sobre sustrato rígido (izquierda) y sobre sustrato flexible (derecha) luciendo

### 4.2.1. Espectro de emisión

Las mediciones ópticas se han realizado excitando el dispositivo con un tren de pulsos de amplitud 6 V y ciclo de trabajo del 0.5%.

El software asociado al espectrorradiómetro nos devolverá todos los valores de luminancia y coordenadas CIE<sup>9</sup> del OLED. Los resultados sobre la caracterización óptica del dispositivo no deberían depender del tipo de sustrato utilizado dado que ambos poseen como capa activa el mismo polímero orgánico. Sin embargo, no se ha podido realizar la caracterización óptica del *display* de sustrato flexible ya que debido a

---

<sup>9</sup> Coordenadas de cromaticidad

la no optimización de algunas etapas en el proceso de fabricación no se ha conseguido que luzca lo suficiente como para realizar la medición.

La Figura 4.6 muestra los datos devueltos por el espectrorradiómetro.

Procederemos a la exportación dichos datos para una correcta representación.

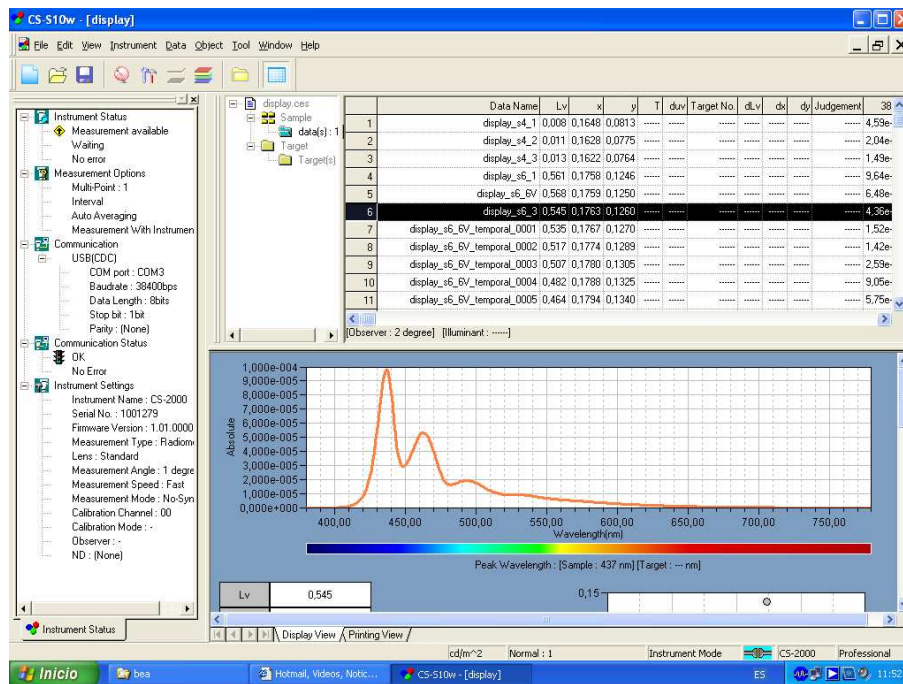


Figura 4.6 Relación entre luminancia y longitud de onda del segmento 6 polarizado a 3V devuelta por el software del espectrorradiómetro

En la Figura 4.6 mostramos el espectro de electroluminiscencia del segmento S6.

El valor máximo de electroluminiscencia que proporciona nuestro segmento OLED es de  $9.54 \cdot 10^{-5}$  W/sr m<sup>2</sup> nm. Procedemos a la normalización del eje de ordenadas y se muestra el espectro de electroluminiscencia en la Figura 4.7.

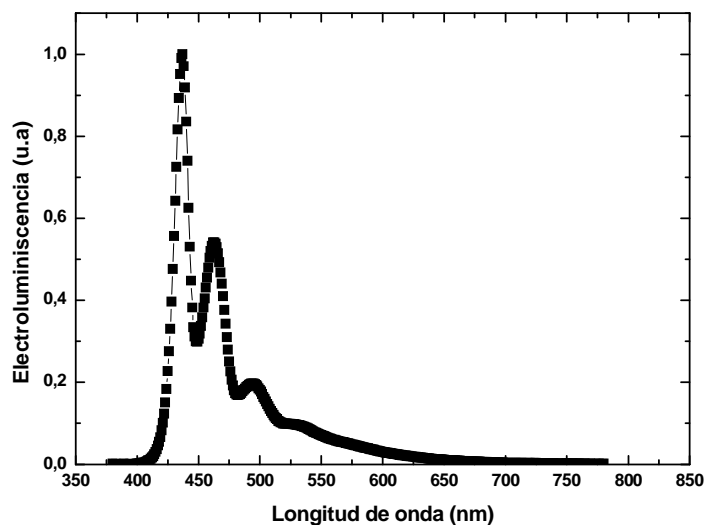


Figura 4.7 Relación entre longitud de onda y luminancia asociada al segmento 6 polarizado a 6V

Para hallar los valores de longitud de onda ( $\lambda$ ) centrales de las transiciones que conforman el espectro de nuestro segmento OLED realizamos un ajuste gaussiano del gráfico. Previamente será necesario convertir los valores de longitud de onda ( $\lambda$ ) a energía (eV):

$$E = h \cdot \nu$$

Siendo  $h = 4.14 \cdot 10^{-15} [eV \cdot s]$  la constante de Planck y  $\nu = \frac{c}{\lambda} [s^{-1}]$  la frecuencia de la onda lumínica.

Para llevar a cabo el proceso de ajuste utilizaremos la herramienta *Peak Fitting Module* instalable sobre *Origin*.

De este modo, la aplicación realiza una deconvolución del espectro descomponiendo en suma de curvas gaussianas. Se muestra el resultado de esta deconvolución en la Figura 4.8.

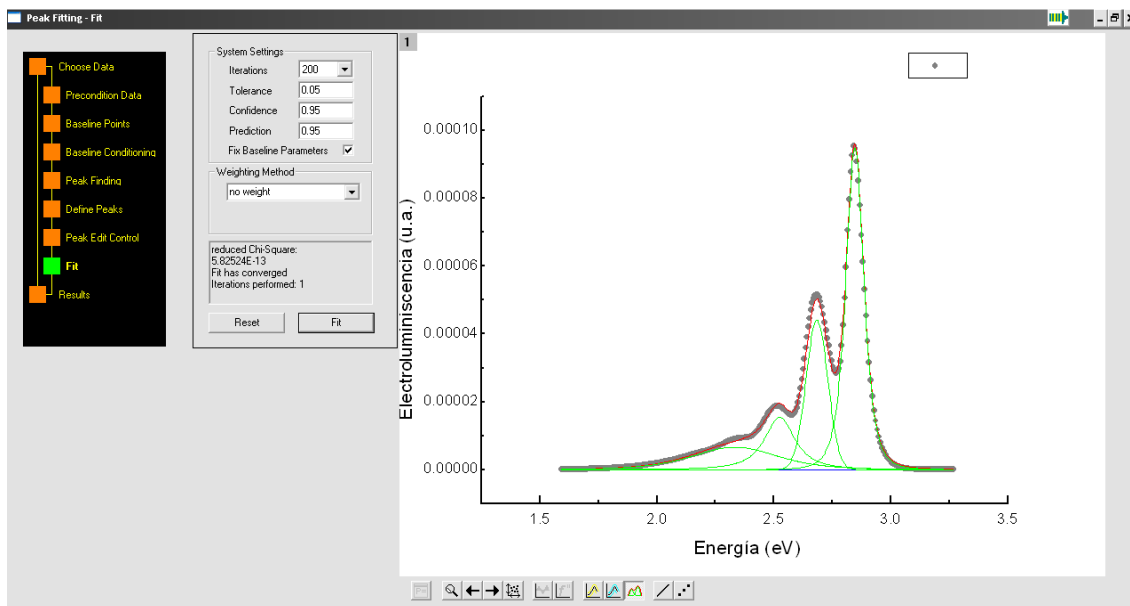


Figura 4.8 Ajuste gaussiano de la curva de electroluminiscencia

La aplicación nos devuelve las medias y varianzas de cada curva de ajuste gaussiano y a partir de éstos podemos calcular la longitud de onda correspondiente a cada transición; es decir, la emisión espectral de nuestro segmento OLED. Procederemos al cálculo de longitud de onda emitida únicamente para los picos principal y secundario, que se corresponden con la emisión excitónica y vibrónica respectivamente. Las otras dos curvas de ajuste se deben a defectos en el dispositivo. De este modo obtenemos los valores indicados en la Tabla 4.1 para los picos principal y secundario.

Picos	Energía (eV)	Longitud de onda (nm)
Secundario	2,68363	462,8059755
Principal	2,84648	436,3283775

Tabla 4.2 Picos de emisión del segmento OLED

Comprobamos que, efectivamente, la longitud de onda emitida en dichos picos pertenece al color azul (como corresponde al polímero utilizado).

#### 4.2.2. Evolución temporal del espectro de emisión. Degradación

Con el fin de observar la evolución temporal de los parámetros ópticos de nuestro dispositivo, realizaremos diez medidas equiespaciadas 15 minutos en el tiempo con el espectrorradiómetro.

En la Figura 4.9 se muestra la evolución temporal del espectro de emisión.

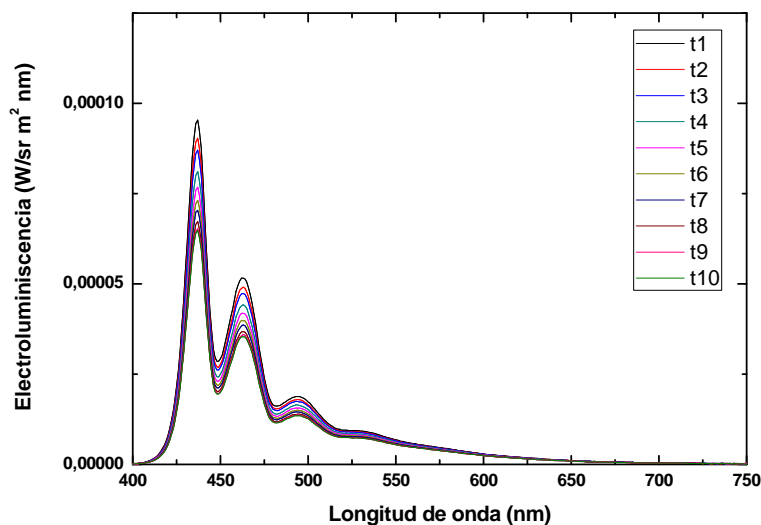


Figura 4.9 Evolución de electroluminiscencia con el tiempo

Observamos que se produce una disminución del 31% en la electroluminiscencia máxima emitida por el OLED desde la primera hasta la última medida realizada 135 minutos después.

Para calcular la degradación eléctrica del dispositivo calculamos la variación de la luminancia a lo largo del tiempo. Se muestra en la Figura 4.10.

Para poder comparar con dispositivos polarizados en continua, y teniendo en cuenta que nuestro OLED sólo está en ON un 0.5% del tiempo, habría que multiplicar estos valores por 200.

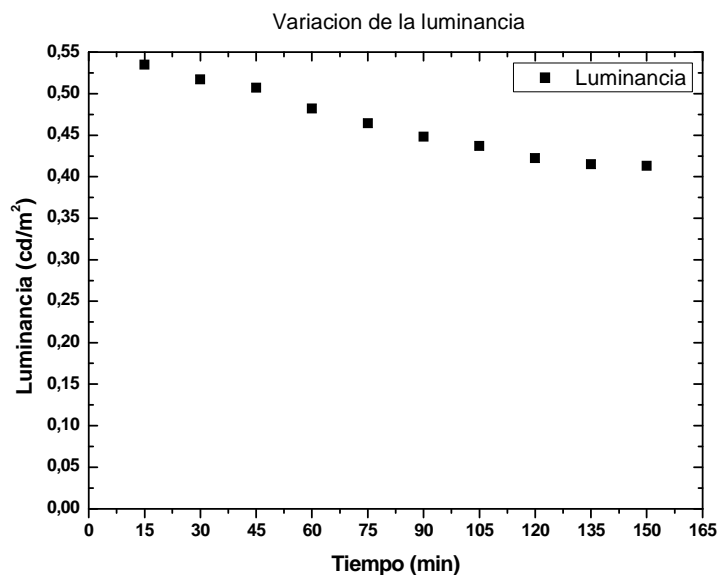


Figura 4.10 Variación de la luminancia del OLED con el tiempo

Observamos una pérdida de luminancia del 23% entre la primera medida y la última. Se ha comprobado que esta disminución es debida a la correspondiente disminución en la corriente que atraviesa el dispositivo (29).

Para comprobar si existe degradación óptica, observaremos la evolución temporal de los distintos picos con el paso del tiempo. Para ello procedemos al cálculo del área relativa de cada curva de ajuste gaussiano y observaremos su variación. De este modo comprobamos que con el paso del tiempo aumenta ligeramente la contribución de los picos secundarios respecto de los primarios; esto es, aumenta la contribución de los defectos en detrimento del pico principal.

Se ilustra la variación del área relativa en la Figura 4.11.

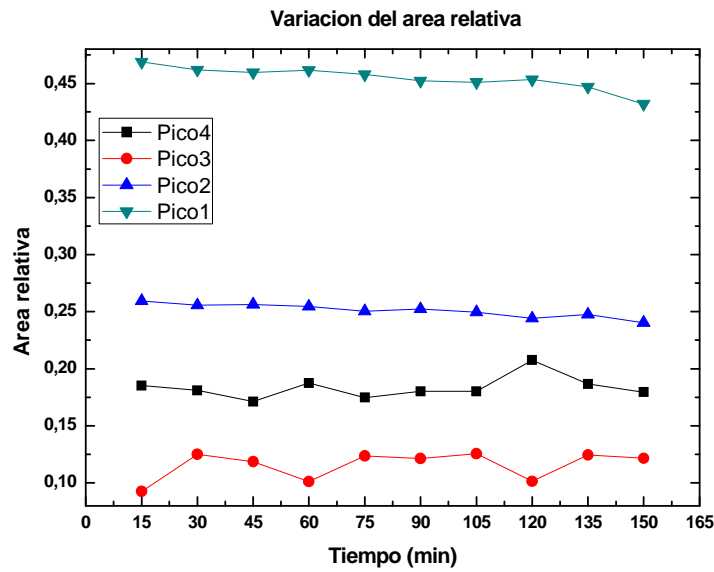


Figura 4.11 Variación del área relativa de cada pico con el tiempo

La mayor contribución de los picos secundarios provocaría la degradación óptica del dispositivo. En este caso podemos comprobar que apenas se produce dicho fenómeno ya que la variación del área relativa de cada pico permanece prácticamente constante.

En la Figura 4.12 se muestra el diagrama de desplazamiento de color de coordenadas CIE devuelto por el software del espectrorradiómetro. Observamos que apenas cambian con el tiempo las coordenadas de color emitidas por nuestro OLED entre la primera y la última medición realizada.

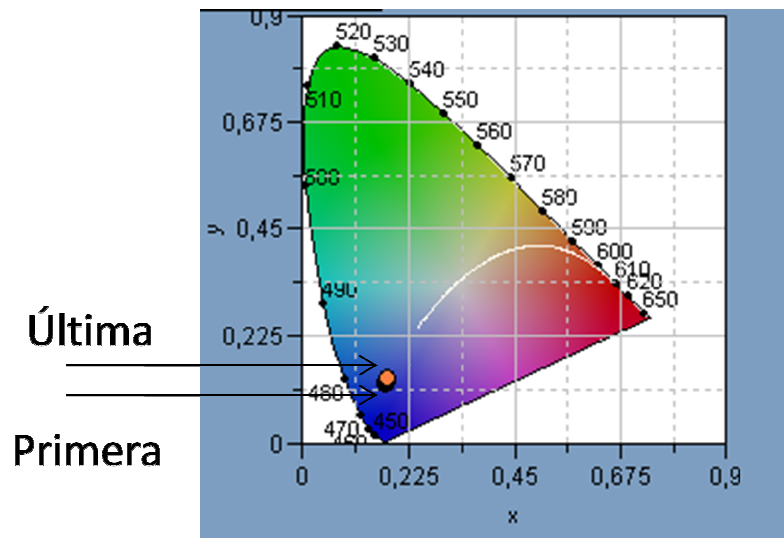


Figura 4.12 Diagrama de desplazamiento de color de coordenadas CIE entre primera y última medición

## 5. Conclusiones

En este capítulo se recogen los principales logros alcanzados y las posibles líneas de trabajo futuras.

Los logros alcanzados durante la realización de este Proyecto Fin de Carrera son los siguientes:

- Se han fabricado con éxito *displays* orgánicos de 7 segmentos sobre sustrato de vidrio con estructura ITO/PEDOT:PSS/PFO/Ba/Al.
- Los segmentos tienen un buen comportamiento eléctrico, ya que su voltaje umbral no es muy elevado comparado con otros OLEDs de estructura similar, estando en todos los casos por debajo de los 6 V.
- Los *displays* emiten en color azul, con sus picos excitónico y vibrónico situados 436.3 y 462.8nm respectivamente. La degradación óptica con el paso del tiempo no es significativa, como se puede observar en el diagrama de coordenadas CIE y de la evolución temporal del área relativa de cada uno de los picos.
- Se han fabricado *displays* orgánicos de 7 segmentos sobre sustrato flexible (PET) con estructura ITO/PEDOT:PSS/PFO/Ba/Al.
- La caracterización eléctrica indica que los dispositivos se comportan como diodos aunque su tensión umbral es elevada, en torno a los 15 V. Asimismo, la intensidad de luz emitida por estos *displays*, aunque perceptible al ojo, es muy tenue y heterogénea para poder llevar a cabo medidas de electroluminiscencia.

Posibles líneas futuras de trabajo:

- Incluir de una capa intermedia de inyección de electrones en la estructura con el fin de conseguir mejorar la conducción de los dispositivos.
- Modificar la máscara de fotolitografía para reducir la resistencia serie de las pistas.
- Mejorar del proceso de fabricación del *display* sobre sustrato flexible. Para ello

habría que estudiar otro tipo de sustratos flexibles con mejor adherencia del ITO, así como modificar los tiempos y temperatura del proceso del ataque ácido del ITO con el fin de optimizarlo.

## BIBLIOGRAFÍA

1. *Synthesis of Electrically Conducting Organic Polymers: Halogen Derivatives of Polyacetylene, (CH)<sub>x</sub>*. Hdeki Shirakawa, Edwin J. Louis, Alan G. MacDiarmid, Chwan K. Chiang, Alan J. Heeger. s.l. : J.C.S. CHEM. COMM., 1977.
2. *Macromolecular electronic device: Field-effect transistor with a polythiophene thin film*. A. Tsumura, H. Koezuka, T. Ando. 1210, 1986, Appl. Phys. Lett., Vol. 49.
3. *Electroluminescence from Polyvinylcarbazole films*. Partridge, R. H. 1983, Polymer, Vol. 24, pp. 733-762.
4. *Organic electroluminescent diodes*. Company, Eastman Kodak. 913, 1987, Appl. Phys. Lett. , Vol. 51.
5. *Metal-polymer Schottky barriers on cast films of soluble poly(3-alkylthiophenes)*. Tomozawa, D. Braun, S. Philips, A. J. Heeger, H. Kroemer. 63, 1987, Synth. Met., Vol. 22.
6. *Light-emitting diodes based on conjugated polymers*. J. H. Burroughes, D. D. Bradley, A. R. Brown, R. N. Marks, K. Mackay, R. H. Friend, P. L. Burns, A. B. Holmes. 539, 1990, Nature, Vol. 347.
7. *Efficient photodiodes from interpenetrating polymer networks*. J. J. M. Halls, C. A. Walsh, E. A. Marseglia, R. H. Friend, S. C. Moratti, A. B. Holmes. 498, 1995, Nature, Vol. 376.
8. *Intrinsic transport properties and performance limits of organic-field effect transistors*. L. Torsi, A. Dodabalapur, L. J. Rothberg, A. W. P. Fung, H. E. Katz. 1086, 1996, Science, Vol. 269.
9. *Polymer light-emitting electrochemical cells*. Q. Pei, G. Yu, C. Zhang, Y. Yang, A.J. Heeger. 1086, 1995, Science, Vol. 269.
10. *Integrated optoelectronic devices based on conjugated polymers*. H. Sirringhaus, N. Tessler, R. H. Friend. 1741, 1998, Science, Vol. 280.

11. *OLEDs for General Illumination Update 2002*. **Stolka, Milan**. 2003, O.I.D.A Technology Roadmap, p. 5.
12. **Hakala, David**. [Online] 07 14, 2005.  
<http://www.varbusiness.com/showArticle.jhtml?articleID=164903998>.
13. *AMOLED pixel circuit with electronic compensation of luminance degradation*. **S.J. Ashtiani, G.R. Chaji, A. Nathan**. 2007, *Journal of Display Technology*, Vol. 3, p. 36.
14. **Silva, Pablo Oliveira y.** PC WORLD digital. [Online] 07 19, 2007.  
<http://www.idg.es/pcworld/Nuevas-pantallas-AMOLED/doc59116-Periferico.htm>.
15. *OLED market tracker*. **Jakhanwal, Vinita**. 2008, iSuppli.
16. **Sony**. [Online]  
<http://www.sonystyle.com/webapp/wcs/stores/servlet/CategoryDisplay?catalogId=10551&storeId=10151&langId=-1&categoryId=8198552921644539854&N=4294966120>.
17. **P. Chamorro Posada, J. Martín Gil, P. Martín Ramos, L.M. Navas García**. *Fundamentos de la tecnología OLED*. s.l. : Mata Digital SL. pp. 122-126.
18. *ANALYSIS-Smartphone battle opens door for new OLED technology*. **Reuters**. 2009, iSuppli.
19. **Samsung**. [Online]  
[http://www.samsung.com/es/consumer/detail/detail.do?group=televisions&type=televisions&subtype=ledtv&model\\_cd=UE55B7020WWXXC](http://www.samsung.com/es/consumer/detail/detail.do?group=televisions&type=televisions&subtype=ledtv&model_cd=UE55B7020WWXXC).
20. [Online] 03 18, 2002. <http://www.e-insite.net/electronicnews>.
21. *Conjugation-length dependence of spin-dependent exciton formation in pi-conjugated oligomers and polymers*. **M. Wohlegenannt, X. M. Jiang, Z. Vardeny, R. A. Janssen**. 197401, 2002, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 88.
22. *Electroluminescence in conjugated polymers*. **R.H. Friend, R.W. Gymer, A.B. Holmes, J.H. Burroughes, R.N. Marks, C. Taliani, D.D.C. Bradley, D.A. Dos Santos, J.L. Bredas, M. Lögdlund, W.R. Salaneck**. 121, 1999, *Nature*, Vol. 397.

23. *Full Color Pixel with Vertical Stack of Individual Red, Green, and Blue Transparent Organic Light-Emitting Devices Based on Dye-Dispersed Poly(N-vinylcarbazole)*. Takayuki Uchida, Masahiro Ichihara, Tohru Tamura, Masao Ohtsuka, Toshio Otomo, Yujiro Nagata. 09 7, 2006, Japanese Journal of Applied Physics.
24. Mercado, L. G. Durango. *Electrónica Orgánica*. 2005. pp. 44-45, PFC.
25. Universal Display Corporation. [Online]  
<http://www.universaldisplay.com/default.asp?contentID=586>.
26. Conchillo, Dra. Belén Arredondo. *Fabrication, Characterization and Modelling of Organic Electroluminescent Diodes with Blue Emission. Application to the Design and Manufacturing of Organic Displays*. 2008, pág11. PhD Thesis.
27. *Thin-Film Permeation-Barrier Technology for Flexible Organic Light-Emitting Devices*. J. S. Lewis, M. S. Weaver. 45, 2004, IEEE, Vol. 10.
28. Metrics technology. [Online] <http://www.metricstech.com/>.
29. *Influence of Electrical Operating Conditions and Active Layer Thickness on Electroluminescence Degradation in Polyfluorene-phenylene based Light Emitting Diodes*. B. Romero, B. Arredondo, A. L. Alvarez, R. Mallavia, A. Salinas, X. Quintana, J. M. Otón. 2009, Solid State Electronics, Vol. 53, pp. 211-217.

