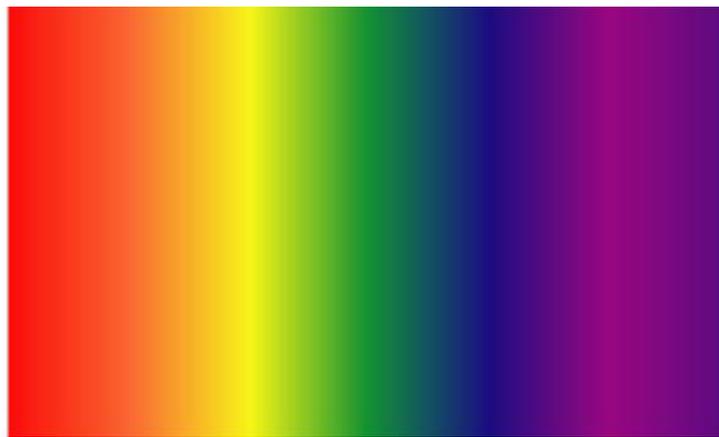


Eficiencia y ahorro energético en iluminación natural y artificial

Juan Bisquert
2006



Presentación

La luz, para iluminar viviendas, comercios, escuelas, industrias, calles y carreteras, es un componente esencial de nuestra vida. Tras 100 años de iluminación con lámparas eléctricas existen muchos dispositivos que dan luz de gran calidad, pero con poca eficiencia en el consumo de la energía. La iluminación artificial constituye un 20% del gasto total de electricidad en países avanzados, y por lo tanto contribuye sustancialmente a la emisión de carbono a la atmósfera. El descubrimiento y la extensión de los diodos semiconductores emisores de luz (LEDs) promete proporcionar iluminación de gran calidad óptica con un consumo mínimo de energía. La iluminación de estado sólido significa la conversión directa de energía eléctrica en luz por medio de materiales inorgánicos y orgánicos. Los LEDs ya se encuentran ampliamente implantados en el dominio de señalización de tráfico, a causa de su eficiencia y alta luminosidad monocromática. Pero para iluminar los hogares los LEDs necesitan reproducir las fuentes de luz naturales a las que los humanos estamos acostumbrados, como el sol, las velas o incluso sistemas más antiguos como el fuego. Se esperan grandes progresos en la realización de luz blanca con LEDs, que entonces podrán substituir a las lámparas convencionales. Por otra parte los LEDs orgánicos (OLEDs) permitirán realizar nuevas aplicaciones de grandes superficies luminosas, como papel de pared luminoso, o grandes pantallas de alta definición montadas sobre la pared. La contribución de los LEDs y OLEDs al ahorro de energía puede ser enorme, y además producirán un nuevo tipo de industria de iluminación.

Desde siempre se ha empleado la luz natural para iluminar interiores, y cada vez está más extendido el uso de grandes superficies de vidrio en arquitectura. Pero la radiación solar, además de la agradable luz visible, aporta una gran cantidad de calor radiante en forma de infrarrojo. En países soleados como el nuestro, la radiación solar entrante conlleva una gran carga de calor que incrementa notablemente el consumo de electricidad para enfriar los interiores. El tratamiento de la radiación solar entrante mediante vidrios con recubrimientos especiales que seleccionan la parte visible de la luz solar, puede reducir considerablemente el consumo de energía. También se investigan los vidrios electrocrómicos, cuya transmisividad se puede regular a voluntad mediante un voltaje aplicado. Con estos vidrios se lograría realizar "ventanas inteligentes" que permiten el control dinámico de la entrada de radiación solar, adaptando las características ópticas de la ventana al cambio de las condiciones ambientales.

Juan Bisquert es Catedrático de Universidad de Física Aplicada en el Departament de Ciències Experimentals, Universitat Jaume I, 12071 Castelló.

Email: bisquert@uji.es

Web: <http://www.elp.uji.es/jb.htm>

Este trabajo se presentó a los Premios de Investigación sobre Energías Renovables 2006 de Caja España.

Nota del autor: Las Secciones 1-6 contienen una revisión de las tecnologías más recientes de producción de luz artificial y filtrado de luz solar. La Sección 7 contiene un resumen de las contribuciones del autor en estos campos.

Las imágenes de la portada son LEDs de Nichia Corporation; el espectro visible, y tres placas OLED RGB, de Novaled.

1. Luz artificial y radiación solar

En las próximas décadas la tecnología de iluminación general experimentará una transformación muy importante mediante mejoras en la iluminación de estado sólido (IES). La IES puede contribuir muy significativamente a limitar la emisión de gases de efecto invernadero reduciendo la cantidad de energía que se emplea en la iluminación artificial. La IES con diodos emisores de luz (*light-emitting diodes*, LEDs) es el sistema más reciente de iluminación, ya que su descubrimiento se origina en los años 1960. La luz se produce por materiales semiconductores estimulados directamente por la electricidad, que generan muy poco calor. La alta eficiencia de los LEDs de luz blanca actuales indica que existe la posibilidad de lograr ahorros en consumo de energía muy importantes.

Los beneficios potenciales de la IES son enormes. Se estima que en 2025 la IES podría reducir la cantidad global de electricidad que se usa en iluminación en más un 50%, con lo que el consumo total de electricidad disminuiría en más de un 10%. Ningún otro tipo de consumo de electricidad tiene un ahorro potencial similar. La mayor parte de la electricidad proviene de la quema de combustible fósil, por tanto la reducción del consumo de energía daría como resultado la reducción de emisiones de carbono del orden de centenares de millones de toneladas anuales. Además, la IES representa un nuevo paradigma de iluminación que creará una nueva industria de iluminación, de más de 50.000 millones \$ anuales en todo el mundo,¹ y aumentará la experiencia visual humana mediante control digital sobre el color y la distribución espacial de la luz.

Las tecnologías de iluminación son sustitutos de la luz del sol en la región espectral 425-675 nm en donde la luz del sol está más concentrada, y para la cual el ojo humano ha evolucionado para tener mayor sensibilidad. Las tres tecnologías tradicionales son: (1) el fuego, (2) la incandescencia y (3) la fluorescencia y las descargas de alta intensidad. Estas tres tecnologías han realizado progresos significativos a lo largo de los últimos 200 años, pero parecen haberse saturado en eficiencias entre 1-25%.²

El desarrollo de las lámparas eléctricas data de la segunda mitad del siglo XIX. Las primeras lámparas eléctricas comerciales eran fuentes de luz incandescentes, introducidas por Thomas Edison en los EEUU y Joseph Swan en Inglaterra que separadamente desarrollaron una lámpara en 1878 en que pasaba corriente eléctrica a través de un filamento de hilo de carbón. El principio de las lámparas de descarga eléctrica a través de mezclas de gases se remonta al descubrimiento del arco eléctrico por Humphry David en 1802. Las lámparas de descarga, tanto tubos fluorescentes como la lámpara de

mercurio a alta presión, alcanzaron éxito comercial por primera vez en los años 1930. Las primeras lámparas de descarga con mercurio de baja presión hacían uso de espectro visible azul verdoso del mercurio, pero el descubrimiento por un grupo de científicos alemanes en 1926 de que la radiación ultravioleta (UV) profunda de la lámpara podía convertirse en luz visible por medio de un fósforo condujo directamente a la introducción de la lámpara fluorescente en los años 1930.³ Hoy en día las lámparas fluorescentes se usan en interiores comerciales, industriales, e institucionales. Se ha estimado que un 80% de la luz artificial mundial es fluorescente.



Fig. 1. (a) LEDs blancos de InGaN de Nichia. (b) LED UV de alta potencia de Nichia, con pico en la línea de 365 nm de la lámpara de sodio.



Fig. 2. OLED blanco de Philips.

Las fuentes de luz convencionales, como las lámparas de filamento y las fluorescentes, dependen de procesos de incandescencia o descargas en gases. Estos procesos conllevan grandes pérdidas de energía, asociados a las altas temperaturas y a la diferencia entre las frecuencia de absorción y emisión de luz (desplazamiento de Stokes). Por ejemplo un 22% del consumo total de electricidad en Estados

Unidos se destina a iluminar hogares, escuelas y comercios. Las lámparas incandescentes representan un 42% de esta demanda, y sin embargo producen sólo un 14% de luz, medida en lúmenes. (El lumen es una unidad que mide la potencia de iluminación tal como se percibe por el ojo humano, ver Sec. 2). Con las bombillas sólo se consigue una eficacia de iluminación de 12 a 15 lm/W, lo cual representa un sistema muy poco eficiente. Los tubos fluorescentes son unas seis veces más eficientes que la lámpara incandescente, pero no se usan ampliamente en el sector residencial por la calidad percibida de la luz que producen, y por su alto coste inicial. La bombilla compacta fluorescente constituye una alternativa efectiva a la incandescente, pero no ha conseguido una cuota significativa de mercado por varias razones, incluyendo su alto coste inicial.

La IES es una nueva, cuarta tecnología. Hasta hace poco la iluminación con semiconductores se asociaba con simples lámparas indicadoras en juguetes y electrónica. Pero ahora la tecnología de LEDs ha florecido y se han logrado eficiencias y brillos similares a las lámparas incandescentes, en prácticamente todas las frecuencias visibles. La tabla 1 muestra una comparación de las propiedades de las bombillas incandescentes y las de los LEDs, anticipando también el desarrollo de estos últimos en los próximos años. Los factores claves para el rápido desarrollo de la iluminación de estado sólido basada en LEDs de alto brillo son su gran eficiencia, fiabilidad, construcción compacta, bajo consumo de potencia, y durabilidad. Por estas propiedades han comenzado a

desplazar a las bombillas incandescentes en muchas aplicaciones (señales de tráfico, automóviles, *displays*, e iluminación externa direccional).

Los LEDs tienen potencial para convertir electricidad en luz casi con eficiencia de unidad. Sin embargo, en la creación y extracción de fotones en un semiconductor existen muchos posibles procesos de pérdida. En la práctica, la creación eficiente de luz blanca con materiales semiconductores que cubran todo el espectro visible es un gran desafío científico y tecnológico.

Los OLEDs (*organic light-emitting diodes*) son versiones orgánicas de los LEDs, con algunas diferencias cruciales. En lugar de emitir en un único punto brillante, como hacen los LEDs, los OLEDs producen iluminación uniforme en una gran área. Además, los OLEDs consisten en un material fino, flexible, de tipo plástico (en contraste con los rígidos chips de semiconductor que forman los LEDs), cuyo procesamiento para iluminación general podría resultar a un coste muy bajo, si se consiguen determinados progresos en la tecnología. Los OLEDs podrían alcanzar diversas aplicaciones comerciales en unos 5 años, incluyendo señalizaciones, iluminación ambiental y funcional. Pero la iluminación general flexible de gran superficie se encuentra todavía a más de una década de distancia.

En conjunto la investigación en IES se desarrolla con rapidez con el objetivo de realizar fuentes de luz eficientes y de amplio espectro que reemplazarán a las lámparas incandescentes y tubos fluorescentes que se emplean en iluminación general.

| Tabla 1. Comparación de lámparas incandescentes y LEDs | | |
|--|-------------------------------|-----------------------------------|
| Atributos | Lámparas incandescentes | LEDs 2003 [2013] |
| Potencia | 110 V - AC | -5V--DC |
| Tamaño | Grande | Pequeño |
| Colores disponibles | Blanco-similar a la luz solar | Monocromático – todos los colores |
| Duración | Mil horas | 20 [100] mil horas |
| Temperatura de operación | Caliente | Frío |
| Eficacia | 16 lúmenes / watt | 25 [160] lúmenes / watt |
| Coste | 0.4 \$ / kilolumen | 200 \$ [2\$] / kilolumen |
| Integración con chips de ordenador | Complejo | Simple |

El progresivo incremento del uso del vidrio en la arquitectura hace que sea necesario optimizar las propiedades de los vidrios para mejorar el confort de los ocupantes del edificio y para reducir el consumo de energía asociado con la entrada y emisión de luz por las superficies ópticamente transparentes.

En general, los edificios utilizan energía de dos maneras. En las viviendas, el mayor gasto de energía es en iluminación, aparatos domésticos y agua caliente. En espacios como oficinas, escuelas, bibliotecas, aeropuertos y almacenes, los costes de la iluminación artificial constituyen cerca del 50% del uso

total de la energía y se usan también computadoras, fotocopiadoras y aire acondicionado. El uso de la luz del día combinado con la iluminación de alto rendimiento mediante vidrios adecuados puede conducir a 30-50% de ahorro y en algunos casos hasta el 70%.

Las funciones principales del cristal como elemento del edificio, ya sea una ventana o una fachada de vidrio, consiste en proporcionar la luz del sol, iluminación diurna, ventilación, visión, aislamiento, así como regular el reloj biológico del cuerpo. El ritmo de sueño-vigilia sigue un ciclo de aproximadamente 24

horas denominado ritmo circadiano. Se sabe desde hace tiempo que la luz regula el ritmo circadiano humano. Las ventanas y la luz del día son extremadamente útiles para la salud. Se ha comprobado que la luz del día es esencial para el bienestar y para la productividad de los habitantes del edificio. Por lo tanto, el diseño y esmaltado de ventanas es vital para alcanzar los requisitos antedichos. El esmaltado de vidrios contribuye positivamente o negativamente al nivel de la luz del día y su distribución en interiores del edificio.

Los esmaltes fueron diseñados para modular el paso de la radiación interceptando parte de ella, permitiendo solamente cierto componente a través del cristal. Esto puede hacerse alterando las características del cristal mismo, o aplicando una capa a la superficie del material. Los recubrimientos espectro-selectivos transmiten una amplia proporción de la radiación solar visible (luz solar) pero apantallan hasta un 80% de la radiación infrarroja. Este efecto consigue una baja transmisión del calor radiado por el sol, y reduce la necesidad de enfriar los interiores de edificios, mientras que los vidrios mantienen una alta transmisión al visible. Por lo tanto el vidrio deja fuera el calor que no se necesita y permite el paso de la luz natural. Se ha demostrado con simulaciones que los recubrimientos espectro selectivos más efectivos pueden reducir hasta un 40% las necesidades de enfriado eléctrico de edificios en hogares de climas cálidos.

Especialmente en climas de zona templada, la radiación solar impone en verano una gran carga de

calor indeseada en los edificios, mientras que la calefacción pasiva por la radiación solar es bienvenida en invierno. La solución óptima serían las ventanas con vidrio de transmisión óptica regulable (Fig. 3). El electrocromismo es un proceso reversible que induce transiciones ópticas en un material mediante una reacción electroquímica. El material electrocromático más estudiado es WO_3 , que cambia de transparente a azul marino con la inserción de protones o iones litio. El electrocromismo se aplica en los *displays* con memoria y los espejos retrovisores antirreflejantes. Pero las ventanas inteligentes de gran tamaño realizadas con los vidrios electrocromáticos tienen por ahora un coste astronómico. La extensión de los vidrios electrocromáticos para permitir el ahorro de energía a gran escala requerirá grandes desarrollos tecnológicos.



Fig. 3. Estados transparente y oscuro de una ventana electrocromática (Sage Electrochromic).

2. Propiedades y calidad de la luz

La radiación solar tiene tres componentes: ultravioleta (UV), visible, e infrarrojo (IR) (Fig. 4). Aproximadamente un 50% de la energía que irradia el sol ocurre fuera de la porción visible del espectro, sobre todo en el IR, y por tanto proporciona calor pero no luz.

El espectro solar se puede asimilar a la radiación de un "cuerpo negro" (que representa un irradiador perfecto) a temperatura de 5000-6000 K. Asimismo la luz de una bombilla de cuarzo-halógeno se asemeja a la radiación de un cuerpo negro a 3200 K.

Nuestra percepción del color resulta de la composición de la luz (el espectro energético de los fotones) que entra al ojo. Las células de cono del ojo humano son sensibles a tres rangos de frecuencia que el ojo interpreta como azul (con un pico cerca de 419 nm), verde (con un pico cerca de 531 nm) y rojo (con un pico cerca de 558 nm, que es más bien amarillento). El espectro visible se extiende de 390 nm (violeta) a 780 nm (rojo), Fig. 5.

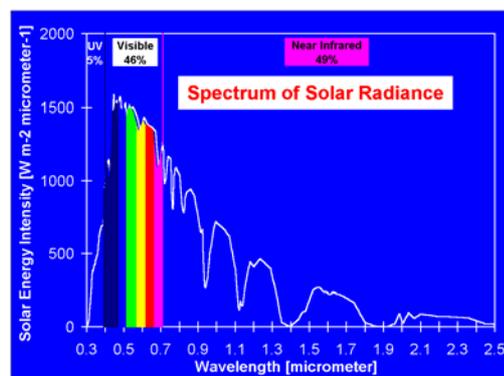


Fig. 4. Espectro solar (energía radiante respecto de longitud de onda de la radiación), indicando los tres componentes de la radiación solar: ultravioleta, visible, e infrarrojo cercano.

Un objeto no luminoso se define como "blanco" si refleja aproximadamente por igual todos los colores (frecuencias visibles), lo que significa que adopta la apariencia de la luz ambiente. Sin embargo, normalmente denominamos blanca a la luz del sol, o a

respuesta del ojo es máxima para la luz verde de longitud de onda 555 nm, y 1 W de potencia radiada a esta longitud de onda se define como 683 lm. El espectro de cualquier fuente de luz puede medirse y componerse con la respuesta fotópica para dar un total de producción de lúmenes de la lámpara. La eficacia de una fuente de luz se mide en lm/W, el número de lúmenes producido por vatio de potencia eléctrica suministrada, mientras que la eficacia del sistema incluye la potencia disipada en los mecanismos que hacen funcionar la lámpara, tal como el circuito electrónico en los tubos de descarga.

En general el ojo humano se encuentra adaptado por millones de años de evolución a la luz solar, que contiene todas las frecuencias visibles, y a los

sistemas antiguos de iluminación, como el fuego. Por este motivo nuestro sistema visual no admite por igual diferentes calidades de luz. Así, la luz blanca de un tubo fluorescente trifósforo se considera "fría" y no se suele incorporar en las viviendas (excepto en cocinas), aunque es mucho más eficiente que la lámpara incandescente. También se ha establecido que el ritmo circadiano que es esencial para nuestro bienestar se controla por la intensidad y composición espectral de la luz.⁴ Resulta muy difícil crear luz blanca ambiental de buena calidad para interiores, para sustituir las ineficientes bombillas incandescentes. Este es uno de los grandes desafíos de la IES para los próximos años.

3. LEDs

Los LEDs fueron descubiertos en 1962, por Holonyak y Bevacqua, científicos de General Electric. Los primeros productos, que se introdujeron en 1968, eran lámparas indicadoras, por Mosanto y el primer auténtico *display* electrónico lo realizó Hewlett-Packard. La calidad de estos productos iniciales era relativamente pobre, suministraban un flujo de 0.001 lm y el único color disponible era un rojo intenso. Un progreso constante en eficacia hizo que los LEDs resultaran visibles en luz ambiente intensa, incluso bajo la luz solar, y en 1976 la gama de colores ya se había extendido a naranja, amarillo y verde amarillento.⁵

Hasta 1985, los LEDs se limitaron a aplicaciones de baja intensidad (menor de 0.1 lm de flujo) para funciones indicadoras o píxeles de *display*. Alrededor de 1985, los LEDs entraron en aplicaciones de potencia de flujo media, que requieren 1-100 lm. La primera aplicación de este tipo fue la luz central superior de frenado en automóviles. Se requerían 75 lámparas en doble fila, y en seguida fue obvio que consiguiendo lámparas más potentes se reduciría su cantidad, proporcionando una amplia ventaja en términos de costes. Esta fue la primera situación en que la eficacia de los LEDs resultaba un aspecto apremiante para obtener una bonificación en el mercado. En 1990 las eficacias alcanzaron 10 lm/W para LEDs de arseniuro de galio aluminio (GaAlAs), ya superiores que la de la lámpara incandescente con filtro rojo.

La búsqueda de incrementos de eficacia intensificó la exploración de nuevos materiales con eficacias superiores y un espectro de colores más amplio, Fig. 8. Primero emergieron los LEDs de fosfato de galio aluminio indio (GaAlInP) que cubrían la gama de rojo a amarillo/verde, con eficacias superiores a 20 lm/W. En 1993, Nakamura, de Nichia Chemical Corporation en Japón, descubrió un material azul muy eficiente, el nitruro de galio (GaN). Este importante descubrimiento significaba que los LEDs podían cubrir

prácticamente todo el espectro visible, permitiendo su entrada en aplicaciones de señales de luz potente como las luces de tráfico (semáforos).

La evolución del flujo de luz y precio de los LEDs desde 1968 han seguido una ley de Moore. El flujo por unidad ha aumentado 30 veces por década, cruzando el nivel de 10 lm en 1998. De forma similar, el precio por unidad de flujo se ha reducido unas 10 veces por década, hasta unos 0.06 \$/lm en 2000.

Actualmente el principal mercado de penetración de LEDs de alto brillo son las luces de fondo que iluminan los botones del teléfono móvil. El crecimiento de la demanda se puede extender a las cámaras digitales y flash de teléfono móvil. Otro mercado prometedor es el de iluminación trasera de pantallas de televisión y monitores de ordenador. Algunas previsiones proyectan un gran crecimiento en este ámbito⁶ porque las pantallas iluminadas con LEDs pueden dar colores de gran calidad. Otros mercados de crecimiento son las señalizaciones, automóviles, e iluminación decorativa. La penetración de los LEDs en la señalización de tráfico es muy notable. En la mayoría de ciudades se están reemplazando las lámparas incandescentes de los semáforos con LEDs, por varias razones: Los LEDs son más brillantes, tienen una duración de varios años, y además ahorran una gran cantidad de energía. Una ciudad puede ahorrar fácilmente un millón de euros anuales en consumo de electricidad reemplazando las lámparas con LEDs.

Los LEDs de alto brillo de nueva generación están producidos principalmente con tres sistemas de materiales semiconductores que permiten fabricar materiales que emiten en la longitud de onda deseada. El sistema de materiales AlGaAs permite generar luz de rojo a IR, mientras que AlInGaP emite luz entre ámbar y rojo-naranja. Los materiales AlGaInN tienen una brecha energética mayor que los anteriores, lo que permite el acceso a las regiones del espectro de mayor energía, verde, azul y UV. Con estos tres sistemas de materiales, la región espectral desde UV

a IR está ampliamente cubierta.⁷

Dado que existen LEDs con eficacia razonable que cubren el espectro visible (con excepción de una pequeña ventana en el amarillo-verde), es posible crear fuentes de luz blanca. Existen para ello dos estrategias básicas. Una es recubrir un LED azul con

un fósforo, que emite luz cuando le impactan los fotones azules. Al combinar la luz azul del LED y la luz amarilla del fósforo se obtiene luz blanca. La otra estrategia es combinar LEDs de color azul, amarillo y rojo para crear blanco.

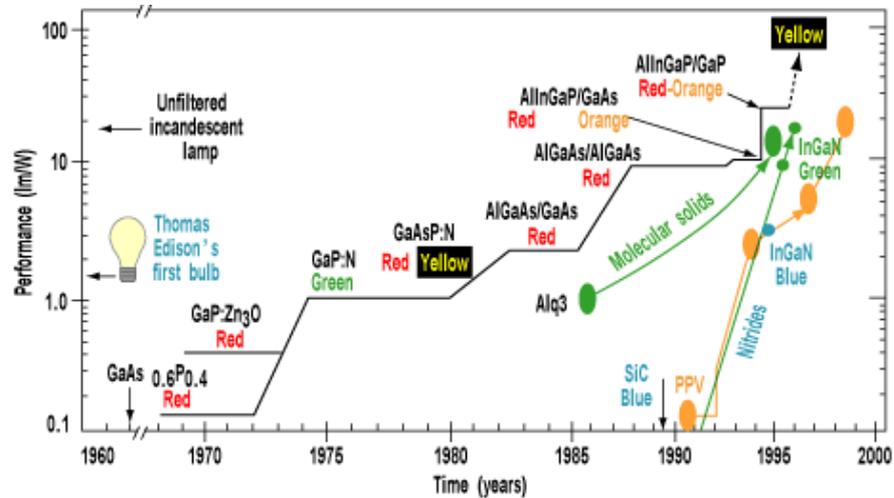


Fig. 8. Aumento de las eficiencias de los LEDs desde su descubrimiento en los años 1960 (Fuente: Osram Optoelectronics).

Actualmente el sistema predominante para crear luz blanca con LEDs es la conversión descendente con fósforos, por su relativa simplicidad. Pero el “efecto halo” y la baja absorción de la luz azul por parte del fósforo constituyen dos problemas significativos. El efecto halo ocurre porque la luz del LED azul es unidireccional, mientras que el fósforo irradia en todas direcciones. Por lo tanto la luz aparece multicolor cuando un observador mira desde un lado. La absorción limitada del azul por los fósforos de tierras raras, hace que sean necesarios capas gruesas de fósforo. Con el sistema de conversión descendente también se puede emplear una combinación de fósforos para mejorar la calidad de los colores.

A la larga, la mezcla de LEDs de varios colores será probablemente el método preferido. La mezcla de colores permite producir luz blanca con mayor definición de colores (en cuanto a su CRI). Además, los fotones de cada LED contribuyen directamente a la luz blanca, por lo que este sistema es más eficiente, al no incurrir en pérdidas de energía por conversión descendente. La mayor eficiencia no solo dará lugar a ahorros de consumo de electricidad, sino que además reducirá los costes de capital asociados a la compra de un determinado número de lúmenes.

Para llegar al mercado de iluminación general los LEDs deben superar las características de las lámparas fluorescentes, que se encuentran en eficiencias bastante altas de 80 lm/W a 100 lm/W. Sin

embargo estas lámparas emiten luz en todas direcciones mientras que los LEDs emiten frontalmente, por lo que la eficiencia de utilización de la luz de un LED a 60 lm/W será superior a la de un tubo fluorescente de 100 lm/W. Los LEDs también proporcionan la posibilidad de un diseño muy versátil de fuentes de luz.



Fig. 9. LED blanco de alta potencia para iluminación general de General Electric.

Las eficiencias de conversión de electricidad a luz mayores al 50 % ya se han alcanzado en LEDs de IR. El objetivo a largo plazo es llegar a eficiencias similares en LEDs visibles, que darían lugar a una fuente de luz blanca de 200 lm/W, que es una eficiencia doble que la de los tubos fluorescentes, y diez veces mayor que la de las lámparas incandescentes. Para realizar el desarrollo de LEDs competitivos para iluminación general, deben

superarse una serie de desafíos de I+D que cubren un amplio espectro desde avances de ciencia básica hasta vertientes de ingeniería. Particularmente es necesario aumentar la calidad de los materiales semiconductores emisores, pero también deben solucionarse muchos aspectos como el empaquetado con baja resistencia térmica, la impresión de

substratos, la forma del chip y la textura de la superficie para aumentar la extracción de luz, entre otros. La rapidez de penetración de la IES en el mercado dependerá de la efectividad de las soluciones que se encuentren a estos aspectos de los LEDs inorgánicos.

4. LEDs orgánicos (OLEDs)

El estudio de las propiedades eléctricas de materiales semiconductores orgánicos comenzó alrededor de los años 50, debido a la necesidad de entender los dispositivos xerográficos. Estos orgánicos reproducían muy pobremente las características semiconductoras de los materiales inorgánicos. La situación fue cambiando poco a poco a medida que iban apareciendo nuevos tipos de polímeros orgánicos más conductores y más estables en el aire. Pero a final de los años 80 y principios de los 90, con el descubrimiento de la electroluminiscencia de diodos basados en polímeros conjugados, creció considerablemente el impacto de los semiconductores orgánicos. Este tipo de materiales tienen gran interés comercial especialmente en el campo de la tecnología de imágenes, debido a diversas propiedades: el bajo precio de la fabricación en serie de los dispositivos, bajo consumo, la calidad de la imagen independientemente del ángulo del observador, alta luminosidad, pequeño espesor, alta gama de colores, ligereza y, dependiendo del sustrato, flexibilidad. También tienen un enorme potencial en el campo de la iluminación general.

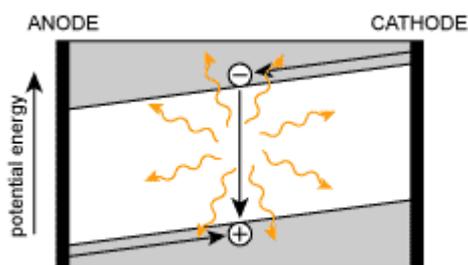


Fig. 10. Recombinación de portadores inyectados en un OLED (Fuente: Philips).

Un dispositivo orgánico emisor de luz (OLED) consiste en una capa muy fina (unos 100 nm) de material orgánico insertada entre dos electrodos de metales diferentes, Fig. 10. Uno de estos metales tiene una función de trabajo muy alta para facilitar la inyección de huecos (el ánodo), y el otro una función de trabajo muy baja para favorecer la inyección de electrones (el cátodo). La inyección se facilita con capas adicionales de transporte, Fig. 11, que realizan una función de bloqueo. Los electrones inyectados por el cátodo y los huecos que entran por el ánodo

avanzan conducidos por un campo eléctrico hasta la capa emisiva, donde forman excitones y recombinan emitiendo luz.

El ánodo está constituido por una capa de ITO (*Indium tin oxide*, una mezcla de $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$), por su alta función de trabajo y por su transparencia. Existen ahora dos tecnologías de capa emisiva en OLEDs. En los sistemas de pequeña molécula, se evaporan diversas capas de materiales moleculares de bajo peso molecular en procesos de vacío. En la segunda tecnología, largas cadenas de polímeros emisores de luz se depositan en solución sobre el sustrato usando métodos de impresión. Los polímeros luminiscentes más comunes son el PPV, *Poly(p-phenylene) vinylene* y sus derivados, y el PFO, *Polyfluorene*. Los metales más utilizados para el cátodo son calcio, aluminio y bario. Incluso con el sistema multicapa, el sistema entero es muy delgado, normalmente menor que $1\ \mu\text{m}$, y el grosor del dispositivo está determinado por el sustrato y el recubrimiento.

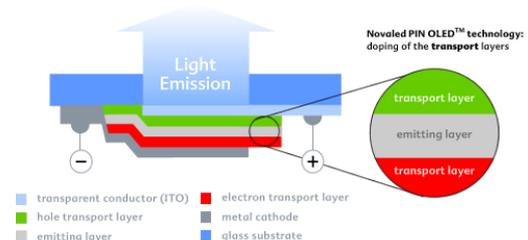


Fig. 11. Arquitectura de un OLED de emisión. Los electrones se inyectan desde el ánodo y transportan en una capa dopada tipo p, hasta la capa de emisión. Los electrones se inyectan desde el cátodo y se transportan por una capa tipo n. La recombinación tiene lugar en la capa emisora, y se produce luz. (Fuente: Novaled).

Las limitaciones de los actuales dispositivos de OLED son debidas a las limitaciones existentes en los materiales que forman los polímeros conductores y polímeros emisores de luz. Los polímeros luminiscentes utilizados en la actualidad presentan valores de tiempos de vida y eficiencias limitados debido a inestabilidades, bajas movilidades en electrones y huecos, y a la naturaleza no emisiva de los excitones en estado triplete. Otro factor importante

para los OLEDs es su estabilidad. Esta se puede incrementar mejorando la estabilidad del material emisor de luz, mejorando la estabilidad del dispositivo y mejorando las condiciones de procesamiento. Actualmente la vida media de los dispositivos depende críticamente del tipo de cátodo. Mejorando las propiedades de los materiales y dispositivos, la estabilidad de los OLEDs ha aumentado a lo largo de los años hasta 40.000 horas para el material amarillo estándar (*super-yellow* de Covion-Merck) a temperatura ambiente. El tratamiento de la extracción de la luz también juega un papel importante en el desarrollo de los OLEDs. Con diseños simples, sólo un 20-30% de la luz generada puede escapar del dispositivo. El control y modificación de la trayectorias de la luz puede aumentar la extracción en un factor 2.

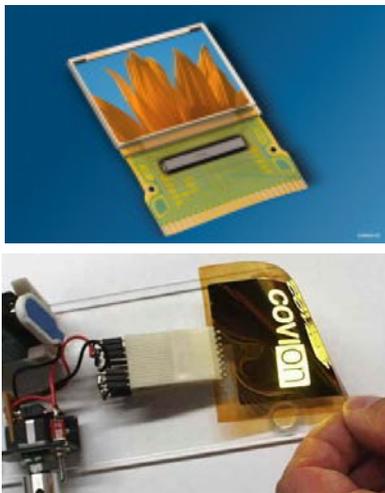


Fig. 12. Arriba: *display* comercial OLED Pictiva de 1 pulgada con 96 x 64 líneas RGB, de OSRAM. Abajo: *display* experimental OLED flexible de Covion (actualmente Merck).

El color de la luz emitida por los polímeros depende de su composición química. Mediante modificación química de la estructura del polímero, se ha podido formar una variedad de polímeros solubles emisores de luz en el dominio de 400 nm a 800 nm. Así, puede obtenerse cualquier color del espectro visible. Las eficiencias de los OLEDs blancos han superado la marca de las lámparas incandescentes (13 lm/W).

Cuando se usa para producir *displays*, la tecnología de OLEDs proporciona capas luminosas que no necesitan iluminación trasera (en contraste con la tecnología LCD), lo que da lugar a pantallas muy finas y compactas, con amplio ángulo de visión hasta 160 grados, y con bajos requerimientos de potencia, sólo 2-10 voltios. Actualmente los OLEDs se comercializan en *displays* auto-emisivos de pequeñas dimensiones, Fig. 12, en equipamiento electrónico portátil como teléfonos móviles y reproductores MP3. Estos *displays* también podrían realizarse sobre un sustrato flexible, Fig. 12. En la actualidad todas las empresas punteras

en pantallas electrónicas como Philips, Sony, etc., priorizan entre sus actividades de I+D el estudio de OLEDs ya que dicha tecnología va a permitir desarrollar nuevas formas de mostrar la información (por ejemplo, pantallas flexibles, ultra finas o extensibles) y mejoras en la calidad de las imágenes.



Fig. 13. Prototipo de placa OLED de gran dimensión emisora de luz blanca, de Siemens.



Fig. 14. Propuesta de papel de pared luminoso de OSRAM.

El potencial para la iluminación general con OLEDs es enorme pero la investigación en los próximos años debe lograr dispositivos de altas prestaciones. La investigación actual se centra en la obtención de OLEDs blancos de alto brillo, alta eficiencia y estabilidad, para iluminación general y señalización (Fig. 13). También se contemplan para los OLEDs las dos estrategias de creación de luz blanca que comentamos para los LEDs, es decir, desplazamiento de frecuencias o mezcla de colores. Se espera que los

OLEDs suministren luz blanca de alta calidad y alto CRI (>90). Los desafíos para llegar al mercado de iluminación general consisten en elevar la eficiencia de los OLEDs de luz blanca a 50 lm/W (similar a la de los tubos fluorescentes) a la vez que reducir el coste de los dispositivos en 1-2 órdenes de magnitud.⁸ Los OLEDs podrían combinar la eficiencia de los tubos fluorescentes y la agradable calidad de color de las lámparas incandescentes, en configuración totalmente plana. Los OLEDs admiten nuevos diseños arquitectónicos, como el papel de pared luminoso (Fig. 14) y pueden integrarse en el mobiliario, llevarse en la ropa, y emplearse de muchas formas todavía por

descubrir.

Las proyecciones más recientes⁹ indican la posibilidad de rápidos progresos, de modo que se podrían conseguir en un plazo de unos 3 años sistemas OLED con un CRI > 80, una vida > 5000 h, y una eficacia > 50 lm/W. Estos avances permitirían a los dispositivos OLED comenzar a competir con las lámparas fluorescentes compactas en el mercado general de iluminación. La vía hacia eficiencias de 100 lm/W y superiores dependerá crucialmente de la mejora de la extracción de luz y de una optimización de todos los aspectos del sistema.

5. Recubrimientos espectrales selectivos

La luz del día constituye uno de los mayores desafíos de diseño de los edificios en climas soleados, debido a la cantidad inmensa de iluminación recibida del cielo y a las largas horas de sol. La colocación, el área, y las características del cristal contribuyen decisivamente al aprovechamiento eficaz de la luz del día. Las ventanas representan normalmente cerca de 25-40% del área de la pared de los edificios eficazmente diseñados para aprovechar la luz diurna. En algunos edificios, alcanza hasta 80-100%. El uso de edificios completamente vidriados se ha convertido en una tendencia extendida. La mayoría de las ventanas dejan entrar demasiada luz que crean calor y fulgor innecesarios. Las técnicas eficientes de aprovechamiento de la luz del día dependen de la exposición apropiada del cristal y de las ventanas, y de las características de funcionamiento tales como transmitancia y coeficiente de ganancia del calor solar del vidrio.

Las funciones primarias de aberturas vidriadas en edificios son dejar entrar la luz natural en el edificio y permitir la vista al aire libre. Sin embargo, la entrada incontrolada de la energía solar por aberturas esmaltadas tiene ciertas desventajas:

- Las áreas esmaltadas grandes, características, por ejemplo, de la construcción moderna de oficinas pero también típicas de algunos edificios residenciales y comerciales, pueden dar lugar al recalentamiento extremo en verano.

- En espacios inundados con radiación solar intensa, el mobiliario interior sufre de deterioro acelerado, tal como decoloración de telas o la degradación de plásticos.

- En los lugares y los períodos con intensa radiación solar, los niveles de la luz del día en espacios con aberturas grandes son generalmente mucho mayores de lo que se necesita. El fulgor resultante del contraste entre las áreas extremadamente brillantes de la ventana y las superficies interiores causa malestar visual.

Inicialmente los problemas de efectividad de energía en *clima frío*, se resolvieron con vidrios para

ventanas aislantes con baja emisividad (baja-e) que se extendieron en los años 1980. Los recubrimientos de baja-e son importantes porque reducen las pérdidas de calor por radiación desde el interior a través del esmalte. Estos recubrimientos para climas fríos bloquean la radiación de infrarrojo lejano al visible (de longitudes de onda largas) a partir de cuerpos fríos, y transmiten la mayor parte del visible y también el IR cercano al visible, por lo tanto no realizan un considerable filtrado del calor radiante que entra al edificio.

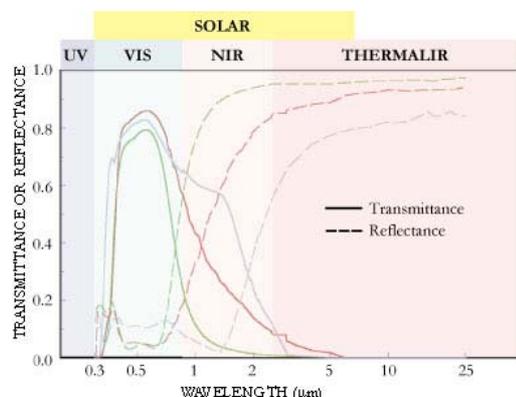


Fig. 15. Transmitancia y reflectancia de tres recubrimientos espectral-selectivos. Una capa simple de óxido (gris) tiene alta T en el IR, y los otros dos, que son recubrimientos finos metálicos, tienen T reducida en el IR cercano (NIR). El recubrimiento doble metálico (verde) corta la mayor parte del NIR y tiene una transición más abrupta entre transmitancia y reflectancia que la capa simple (rojo) (Fuente: Physics Today).

En cambio los requerimientos de *climas cálidos* son diferentes. Se trata de proporcionar luz natural sin imponer una penalización excesiva en términos de calor no deseado. La solución a este problema consiste en desarrollar recubrimientos espectralmente selectivos que transmitan todo (o la mayor parte de) el espectro visible mientras reflejan todo el infrarrojo y el

ultravioleta (Fig. 15). Esto significa que hay que producir esmaltes que reflejen no solo el IR lejano, sino también la parte del IR más cercana al visible, es decir aproximadamente la mitad del espectro solar, por encima de 0.74 μm .

Los esmaltes teñidos azules y verdes convencionales, y algunas capas de baja-e son espectral-selectivos en pequeña medida. La nueva generación de esmaltes espectral-selectivos se diseña

para exagerar la diferencia entre las porciones visibles e infrarrojas del espectro, y es así altamente eficiente en el bloqueo de la radiación infrarroja (Fig. 15). Debido a este diseño, los esmaltes tienen a menudo un aspecto azul o verdoso; sin embargo, no se colorean tan profundamente como esmaltes teñidos convencionales porque transmiten la luz visible de forma relativamente uniforme respecto del espectro visible.

6. Vidrios electrocrómicos

Sin duda la solución óptima para el tratamiento de la entrada de la luz diurna en edificios consiste en ventanas y fachadas de vidrio que permitan regular la luz y el calor que entra. Los materiales con esta función se conocen generalmente como "cromogénicos". El cambio óptico se puede inducir con diferentes estímulos en diferentes materiales, y así existen materiales fotocromáticos, termocromáticos, gasocromáticos y electrocrómicos (EC), entre otros. Los materiales EC son muy fáciles de controlar por el usuario, mediante voltaje eléctrico, y por lo tanto tienen la mayor gama de posibles aplicaciones.

Los materiales EC se conocen desde hace más de 30 años y han adquirido recientemente mucha atención debido al gran número de sus aplicaciones, aunque en áreas marginales. Algunas de ellas son su uso como espejos retrovisores antideslumbrantes, ventanas inteligentes en vehículos y edificios, gafas de sol, paneles informativos, indicadores de temperatura y filtros ópticos. De todas ellas, dos están siendo ya comercializadas. Una es su uso como espejos retrovisores, cuyo principal fabricante es Gentex Corporation (USA). La segunda es su uso como ventanas inteligentes o EC, que permiten reducir la intensidad de luz exterior que entra en las habitaciones, logrando reducir parte del calor introducido desde el exterior, y aumentar la privacidad de la sala o del vehículo y reducir el gasto energético en aire acondicionado.

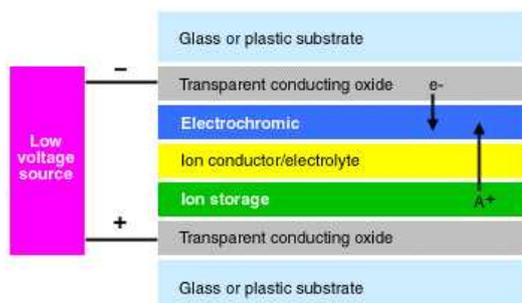
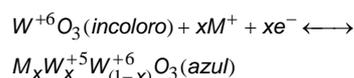


Fig. 16. Capas que forman un dispositivo electrocrómico (Ref. D.R. Rosseinski, R.J. Mortimer, Adv. Mater. 13 (2001) 783).

En general un dispositivo electrocrómico consta de varias capas empaquetadas entre dos sustratos como muestra la Fig. 16. Los sustratos normalmente

son vidrios, aunque a veces son de plástico. Sobre ellos se deposita una capa de ITO, el material conductor transparente que sirve como contacto. Luego se deposita el material EC. A continuación se necesita un conductor iónico (disolución electrolítica o electrolito sólido). Después se completa con el contraelectrodo, que consiste en una capa de un material capaz de intercalar iones (polímero conductor, óxido metálico...) depositado sobre el soporte de vidrio conductor (vidrio con la capa de ITO).

Los materiales EC presentan un cambio reversible en sus propiedades ópticas cuando son oxidados o reducidos electroquímicamente. Numerosos materiales, tanto de carácter orgánico como inorgánico, presentan electrocromismo. Como inorgánicos destacan los óxidos metálicos (WO_3 , V_2O_5 , MoO_3 ...), siendo el WO_3 el más ampliamente estudiado. Sus propiedades electrocrómicas fueron descubiertas por Deb en 1969. El mecanismo que produce la coloración del WO_3 se describe mediante el proceso de intercalación,



Aquí M^+ es un catión metálico (normalmente Li^+), o un protón H^+ , que se intercala en la red del WO_3 cuando éste es reducido mediante un voltaje externo aplicado. Este proceso produce diversos cambios en el espectro UV-visible del WO_3 . Dentro de los materiales orgánicos son EC los polímeros conductores como la polianilina y el poli(3,4-etilendioxitiofeno), entre otros.

Los viológenos son compuestos orgánicos que al ser reducidos pasan de ser incoloros a presentar una intensa coloración azul o verde. Son dicaciones de 4,4'-bipiridinas 1,1'-disustituidas. La primera reducción es altamente reversible y conduce a la formación del catión radical coloreado. En los dispositivos EC, los viológenos pueden estar o bien disueltos en disolución o adsorbidos sobre la superficie de un electrodo nanoporoso como el TiO_2 . Estas moléculas presentan una alta velocidad de transferencia de carga con el electrodo nanoporoso, aumentando la rapidez en el cambio de coloración respecto a otros tipos de

dispositivos. Además, debido a la naturaleza nanocristalina del electrodo, que proporciona una gran área de trabajo, el fenómeno óptico se amplifica 2 ó 3 órdenes de magnitud. Esta tecnología fue descubierta por Michael Grätzel y Donald Fitzmaurice a principios de los años 1990. La multinacional Ntera ha adquirido los derechos de explotación y ha anunciado su próximo desarrollo a gran escala para realizar *displays* electrónicos de alta definición.

El electrocromismo está avanzando en productos como *displays*, retrovisores y techos de coches de lujo, como el Ferrari Super America, un modelo limitado a 550 coches, que lleva un techo electrocromático. Pero las "ventanas inteligentes" para edificios no se han realizado a gran escala.¹⁰ Muchas compañías compiten para encontrar soluciones que permitan realizar la ventana inteligente, controlable con un interruptor o un sensor, a un coste razonable. Pero muchos de estos desarrollos son inaccesibles ya que las compañías buscan soluciones exclusivas.

También se han propuesto las ventanas inteligentes auto-alimentadas, compuestas de una capa EC integrada en una célula solar (Fig. 17) que proporciona el voltaje que modula el vidrio EC. Se

puede mantener muy finas todas las capas, de modo que sean transparentes. La transmitancia del dispositivo disminuye cuando se ilumina y puede aumentar en condiciones de corto-circuito. Por lo tanto, no hay fuente externa de voltaje para colorear o blanquear el dispositivo fotoelectrocromático.

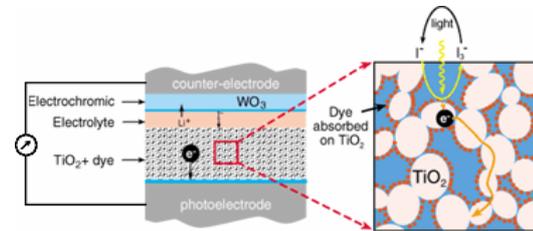


Fig. 17. Un dispositivo fotoelectrocromático emplea una capa de TiO_2 nanoporoso recubierta de colorante (tipo célula de Grätzel) para generar electrones, que crean el voltaje necesario para colorear la capa electrocromática (Esquema: NREL).

7. Contribuciones científicas del autor

LEDs orgánicos

Nuestro trabajo en OLEDs se desarrolla en varias direcciones [1-5]. En primer lugar estudiamos el proceso de inyección de carga electrónica en los contactos metálicos. Los materiales que se usan actualmente para los cátodos son metales con función de trabajo muy baja que generan problemas de reactividad y estabilidad. Para simplificar los procesos de deposición y el encapsulado, y mejorar la estabilidad, es esencial entender el fenómeno de inyección y optimizar los materiales y la interfase. En general los procesos dinámicos que se dan en la interfase metal/semiconductor orgánico no están todavía muy bien comprendidos. Los semiconductores orgánicos se caracterizan por un elevado grado de desorden estructural y energético, que complica bastante la descripción de los procesos electrónicos en la interfase. Investigamos el proceso de inyección en OLEDs mediante técnicas eléctricas en dominio de frecuencia (espectroscopia de impedancia) y medidas estacionarias (curvas corriente-voltaje, espectros de luminiscencia). Realizamos modelos cinéticos para describir los resultados y entender las diferentes etapas del proceso de inyección. Utilizamos OLEDs formados con PPV (*Poly(p-phenylene vinylene)*) y sus derivados, en colaboración principalmente con Merck, que nos suministra polímeros luminiscentes de última generación.

Por otra parte estudiamos los procesos de transporte de portadores en capas orgánicas. Principalmente investigamos los modelos de corriente por carga espacial, que comprobamos usando técnicas estacionarias y de impedancia. Combinando los procesos de transporte y recombinación, estamos desarrollando un modelo integral del dispositivo. Este modelo lo aplicaremos para estudiar el papel de las capas de inyección. Estas capas permitirán regular la inyección de los dos tipos de portadores (electrones y huecos) a la capa emisora de luz, con el fin de optimizar la generación de luz. Estos modelos se investigan sobre diversas configuraciones de capa inyectora que preparamos en colaboración con el Dr. Henk Bolink, del Instituto de Ciencia Molecular de Valencia.

Vidrios electrocrómicos

Nuestro trabajo con materiales electrocrómicos [6-18] comenzó dentro de un estudio general de la dinámica de iones en estado sólido durante el proceso de intercalación. Esta dinámica es común en los materiales para electrocrómicos y baterías de ion litio. Hemos desarrollado diversos modelos de impedancia

electroquímica para tratar el fenómeno de difusión que acompaña a la intercalación. Estos modelos han tenido después bastante aplicación y son muy utilizados en la bibliografía.

Posteriormente hemos estudiado de forma más específica el arquetipo de material electrocrómico, WO_3 , aunque en su versión amorfa (no cristalino), en colaboración con Germà Garcia Belmonte, de nuestro equipo investigador, y con científicos de la Universidad de Barcelona (Isidre Porqueras, Carles Person) y de la Universidad Técnica de Minsk, Bielorusia (Vyacheslav Vikhrenko). La reacción de intercalación indicada anteriormente conlleva la reorganización de la estructura del film. Así por ejemplo se observa una serie de transiciones de fase en las muestras cristalinas en función del grado de inserción de iones Li^+ . Estas reorganizaciones estructurales tienen asociados efectos de degradación cuando las películas se ven sometidas a ciclos repetidos de carga y descarga. Para superar el problema de la degradación estructural se está investigando últimamente la respuesta de estructuras amorfas de WO_3 . Las estructuras amorfas tienen la facultad de acomodar paulatinamente la distorsión causada por las especies intercaladas sin llegar a producir una transición de fase macroscópica. Nuestro principal objetivo es investigar los efectos que tiene la distorsión mecánica que conlleva la intercalación sobre la cinética de transporte difusivo de iones Li^+ dentro de dichas estructuras. Nuestro estudio emplea técnicas de modulación en frecuencia con las que adquirir nuevo conocimiento para establecer relaciones con la estructura de las películas y, consiguientemente, optimizar la eficiencia de coloración y estabilidad de los dispositivos.

Recientemente hemos establecido claramente que existe una correlación entre el voltaje que proporciona el dispositivo y el cambio de volumen asociado a la intercalación de iones de litio. El cambio relativo de volumen se ha evaluado alrededor del 10% (40 nm de expansión para películas de aproximadamente 400 nm). Estos cambios de volumen están relacionados con la degradación de los electrodos sometidos a ciclos repetidos de carga/descarga por la aparición de fracturas en la superficie de las películas. También se ha observado que el cambio de volumen desaparece en el caso de películas con grosores por debajo de 100 nm, lo cual indica un efecto de escala en el mecanismo de intercalación de iones. Así se abre una vía de preparación de electrodos de intercalación que ha de aprovechar este efecto de escala (nanométrica) para suprimir los cambios volumétricos.

| | |
|-----|---|
| 1. | A. Pitarch, G. Garcia-Belmonte, J. Bisquert, H. J. Bolink Impedance of space-charge-limited currents in organic light-emitting diodes with double-injection and strong recombination <i>Journal of Applied Physics</i> , aceptado (2006). |
| 2. | J. Bisquert, J. M. Montero, H. J. Bolink, E. M. Barea and G. Garcia-Belmonte Thickness scaling of space-charge-limited currents in organic layers with field- or density-dependent mobility <i>Physica Status Solidi a</i> , aceptado (2006). |
| 3. | J. Bisquert, G. Garcia-Belmonte, J. M. Montero, H. J. Bolink Charge injection in organic light emitting diodes governed by interfacial states, <i>Proceedings SPIE Int. Soc. Opt. Eng.</i> 6192 , 619210 (2006). |
| 4. | J. Bisquert, G. Garcia-Belmonte, A. Pitarch, H. J. Bolink Negative capacitance caused by electron injection through interfacial states in organic light-emitting diodes <i>Chemical Physics Letters</i> , 422 , 184-191 (2006). |
| 5. | A. Pitarch, G. Garcia-Belmonte, J. Bisquert Impedance model of two-carrier space-charge limited current in organic light-emitting diodes <i>Proceedings SPIE Int. Soc. Opt. Eng.</i> , 5519 , 307-313 (2004). |
| 6. | G. Garcia-Belmonte, J. García-Cañadas, J. Bisquert Correlation between volume change and cell voltage variation with composition for lithium intercalated amorphous films <i>Journal of Physical Chemistry B</i> , 110 , 4514-4518 (2006). |
| 7. | G. Garcia-Belmonte, J. García-Cañadas, J. Bisquert, C. Person Jump diffusion coefficient of different cations intercalated into amorphous WO ₃ <i>Solid State Ionics</i> , in press (2006). |
| 8. | L. Gracia, J. García-Cañadas, G. Garcia-Belmonte, A. Beltrán, J. Andrés, J. Bisquert Composition dependence of the energy barrier for lithium diffusion in WO ₃ <i>Electrochemistry and Solid-State Letters</i> 8 , J21 (2005). |
| 9. | J. García-Cañadas, G. Garcia-Belmonte, J. Bisquert, I. Porqueras and C. Person Transition from ideal statistics to interactions by host distortion in the intercalation thermodynamics of Li into amorphous WO ₃ films of varying thickness <i>Solid State Ionics</i> , 176 , 1701-1704 (2005). |
| 10. | G. Garcia-Belmonte, P. R. Bueno, F. Fabregat-Santiago, J. Bisquert Relaxation processes in the coloration of amorphous WO ₃ films studied by combined impedance and electro-optical measurements <i>Journal of Applied Physics</i> , 96 , 853-859 (2004). |
| 11. | G. Garcia-Belmonte, V. S. Vikhrenko, J. García-Cañadas, J. Bisquert Interpretation of variations of jump diffusion coefficient of lithium intercalated into amorphous WO ₃ electrochromic films <i>Solid State Ionics</i> , 170 , 123-127 (2004). |
| 12. | J. Garcia-Cañadas, F. Fabregat-Santiago, I. Porqueras, C. Person, J. Bisquert and G. Garcia-Belmonte. Charging and diffusional aspects of Li ⁺ insertion in electrochromic a-WO ₃ <i>Solid State Ionics</i> , 175 , 521-525 (2004). |
| 13. | J. Garcia-Cañadas, I. Mora-Seró, F. Fabregat-Santiago, J. Bisquert and G. Garcia Belmonte. Analysis of cyclic voltammograms of electrochromic a-WO ₃ films from voltage-dependent equilibrium capacitance measurements. <i>Journal of Electroanalytical Chemistry</i> , 565 , 329-334 (2004). |
| 14. | J. García-Cañadas, F. Fabregat-Santiago, J. Kapla, J. Bisquert, G. Garcia Belmonte, I. Mora-Seró and M. O. M. Edwards. Dynamic behaviour of viologen-activated nanostructured TiO ₂ : Correlation between kinetics of charging and colouration. <i>Electrochimica Acta</i> , 49 , 745-752 (2004). |
| 15. | J. Bisquert Analysis of the kinetics of ion intercalation. Ion trapping approach to solid-state relaxation processes. <i>Electrochimica Acta</i> , 47 , 2435-2449 (2002). |
| 16. | J. Bisquert and V. S. Vikhrenko Analysis of the kinetics of ion intercalation. Two state model describing the coupling of ion diffusion and ion binding processes <i>Electrochimica Acta</i> , 47 , 3977-3988 (2002). |
| 17. | J. Bisquert Impedance of diffusion of inserted ions. Simple and advanced models. In <i>New Trends in Intercalation Compounds for Energy Storage</i> , NATO ASI Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, v. 61. Eds. C. Julien, J. P. Pereira-Ramos and A. Momchilov, pp. 405-412, Kluwer, (2002). |
| 18. | F. Fabregat-Santiago, G. Garcia-Belmonte, J. Bisquert, N. S. Ferriols, P. R. Bueno, E. Longo, J. Suay Antón and S. Castro-García Dynamic processes in the coloration of WO ₃ by lithium insertion <i>J. Electrochem. Soc.</i> 148 , E302-E309 (2001). |

8. Acrónimos

| | |
|-----|-------------------------------|
| CRI | <i>Colour Rendering Index</i> |
| EC | Electrocromico |
| I+D | Investigación y desarrollo |
| IES | Iluminación de estado sólido |
| IR | Infrarojo |
| LCD | <i>Liquid Crystal Display</i> |

| | |
|------|---|
| LED | Diodo emisor de luz (<i>Light-emitting diode</i>) |
| OLED | LED orgánico (<i>Organic LED</i>) |
| RGB | <i>Red-Green-Blue</i> |
| UV | Ultravioleta |

9. Bibliografía

- ¹ Optoelectronics Industry Development Association (OIDA), "The Promise of Solid State Lighting", Report (2002).
- ² J. Y. Tsao, "Solid State Lighting: lamps, chips and materials for tomorrow", *IEEE Circuits and Devices*, **20**, 28-37 (2004)
- ³ G. G. Lister, J. E. Lawyer, W. P. Lapatovich and V. A. Godyak, "The physics of discharge lamps" *Reviews of Modern Physics*, **76**, 541 (2004).
- ⁴ E. F. Schubert, "Light-Emitting Diodes", 2nd ed., Cambridge University Press (2006).
- ⁵ T. Drennen, R. Haitz, J. Tsao, "A market diffusion and energy impact model for Solid-State Lighting", Report SAND2001-283J (2001).
- ⁶ A. Mills, "LED 2005 illuminates" *The Advanced Semiconductor Magazine*, **18**, 30 (2005).
- ⁷ F. K. Yam, Z. Hassan, "Innovative advances in LED technology", *Microelectronics Journal*, **36**, 129-137 (2005).
- ⁸ R. Sprengard, P. Visser, "OLED for lighting and signage", *KunstStoff Trens* 05 (2005).
- ⁹ H. Boerner, "OLEDs for lighting", *Proc. SPIE*, Vol 6192, 61920U (2006).
- ¹⁰ C.-G. Granqvist, "Electrochromics materials", *Nature Materials*, **5**, 89-90 (2006).