

Diodos emisores de luz para la irradiación de plantas

P. Martín-Ramos^{1,2}, L.M. Navas-Gracia¹, S. Hernández-Navarro¹, A. Corrêa-Guimarães¹, J. Martín-Gil¹, E. Martín Bravo¹, P. Chamorro-Posada² y J.M. Durán-Altisent³

¹Grupo de Investigación GIR-TADRUS. ETSI Agrarias, Universidad de Valladolid, Campus Universitario de Palencia. Avenida de Madrid, 44, 34004-Palencia.

²Departamento de Teoría de la Señal e Ingeniería Telemática. ETSI Telecomunicación, Universidad de Valladolid, Campus Miguel Delibes. Camino del Cementerio, s/n, 47011-Valladolid

³Departamento de Producción Vegetal: Fitotecnia. ETSI Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria, s/n, 28040-Madrid

Resumen

Los recientes desarrollos conseguidos en el área de la iluminación con diodos emisores de luz (LEDs, cuando son inorgánicos, y OLEDs, cuando son orgánicos) resultan de gran interés en horticultura, al permitir manipular el espectro radiante que va a incidir sobre las plantas, con el objetivo de aumentar su producción o de generar determinados efectos fisiológicos, sobre todo en invernaderos. Puesto que los vegetales crecen mejor cuando son iluminados (irradiados) en las regiones roja y azul del espectro, resulta aconsejable sustituir los sistemas de iluminación fotosintética actuales, fundamentalmente mediante lámparas de descarga en gases (vapor de sodio a alta presión y, en menor medida, halogenuros metálicos), por LEDs comerciales que emiten separadamente en esas regiones o por OLEDs susceptibles de emisión conjunta. Además, estos dispositivos son más eficientes que las lámparas incandescentes (consumen mucha menor energía eléctrica y poseen una vida media de uso mucho más larga), no generan exceso de calor (y por tanto no dañan a plantas térmicamente sensibles), e incluso, en el caso de los LEDs rojos, repelen insectos, por lo que contribuyen a la disminución en el uso de agrotóxicos. En el presente artículo, se revisan las últimas contribuciones en Fitofotónica relacionadas con los diodos emisores de luz, se aporta la experiencia existente sobre la aplicación de LEDs a invernaderos y se divulga el estado de las investigaciones que algunos grupos de investigación estamos realizando sobre OLEDs emisores bien en el rojo o bien en las regiones del rojo y el azul.

Palabras clave: LEDs, OLEDs, Fitofotónica, invernaderos, irradiación.

Summary

Recent achievements in irradiation using light emission diodes have major implications in horticulture to permit the spectral manipulation for improved plant production and other physiological effects, mainly in greenhouses. Because the plants grow better with the red and blue parts of the visible spectrum, it result more efficient to substitute the high-pressure sodium or metal halide lamps that currently use the industrial greenhouses by red and blue LEDs or OLEDs. In addition, these devices are more efficient than incandescent lamps (ensuring longer semi-permanent lamp life); they do not generate excess heat (and thus cause no temperature damage to sensible plants) and, in the red LEDs case, they repel insect pests (and so less agrochemicals are used). In this article we review the latter contributions in Phytophotonics on light emitter diodes; we report the experience on application of LEDs to greenhouses; and finally, we gave the state of art in research on architecture of new red and red and blue OLEDs.

Key words: LEDs, OLEDs, Phytophotonics, greenhouses, irradiation

1. Influencia del espectro electromagnético en el desarrollo vegetal

La luz o radiación visible (región del espectro electromagnético comprendido entre los 380 y 760 nm) es fundamental para el crecimiento de las plantas [1–3]. Los vegetales presentan una sensibilidad a la radiación muy diferente de la del ojo humano (con máximo de sensibilidad a 555 nm); y sus fotosensores, en las regiones del espectro electromagnético comprendidas desde el UV hasta los 740 nm, controlan varios aspectos de su crecimiento y desarrollo.

Los vegetales utilizan la luz desde los 400 hasta los 700 nm para la fotosíntesis (conocida como radiación PAR, radiación fotosintéticamente activa -*Photosynthetic Active Radiation*- o luz de crecimiento), variando el efecto de la longitud de onda según las horas del día y los estadios de crecimiento de la planta. El espectro de la radiación recibida puede afectar propiedades como el aspecto y el momento de la floración, y, por ejemplo para plantas con aplicaciones medicinales, puede afectar al sabor, al olor y al valor farmacéutico y/o nutricional. En la Figura 1 se recogen los efectos que las distintas longitudes de onda de la radiación recibida producen sobre los vegetales, resumidos básicamente en intensificar la fotosíntesis, desencadenar fenómenos fotomorfogénicos (alargamiento de entrenudos, activación de fitocromos, entre otros) y provocar reacciones fotoperiódicas (inducción de la floración en función de la duración del período de luz). Es preciso indicar que, en el estudio de la irradiación fotosintética con radiación PAR, es fundamental conocer la cantidad de fotones (medida mediante el flujo fotosintético de fotones (PPF, *Photosynthetic Photon Flux*) responsables de la excitación de la clorofila, y que ésta depende de la longitud de onda. Así, la cantidad de fotones es mayor en la franja roja del espectro que en la azul, por lo que los vegetales emplean de forma más eficiente la radiación de la región del rojo. De esta manera surge la curva de sensibilidad fotosintética de las plantas (Figura 2).

Hasta ahora, la tecnología para la irradiación de plantas en horticultura ha sido la correspondiente a las descargas eléctricas en gases metálicos, por lo que las lámparas más empleadas han sido (Figura 3) las de vapor de sodio a alta presión, las de halogenuros metálicos y las lámparas fluorescentes con luminóforos especiales para modificar el espectro de emisión. Pero tales lámparas proporcionan tanto luz para fotosíntesis como luz control, que añade coste energético innecesario. Otro inconveniente es que las características espectrales de la emisión son bastante anchas, por lo que los efectos fisiológicos en los vegetales son menos específicos.

La manipulación espectral en el entorno de crecimiento de las plantas también puede ser conseguida mediante el empleo de plásticos con propiedades ópticas modificadas mediante el empleo de aditivos. Así los revestimientos plásticos de reflectancia se usan como acolchado reflector sobre el suelo o las mesas/bandejas de cultivo donde crecen las plantas. Por ejemplo, el acolchado blanco puede aumentar la intensidad luminosa en el vegetal por absorción UV. El acolchado rojo se utiliza para mejorar el sabor en frutos blandos. También se ha constatado que el acolchado de color plata refleja a lo largo de las regiones UV cercano, visible e IR-cercano, y, por ejemplo, es utilizado en Francia para mejorar la calidad de la uva. En esta misma línea de actuación de la modificación espectral destacan los últimos avances en la producción de filmes de plásticos con propiedades selectivas [4], empleados en la cubierta de invernaderos (Figura 4):

- Filmes con bloqueo UV (anti-plagas). Este tipo de filmes fotoselectivos protegen los cultivos de diferentes enfermedades y plagas por lo que se conocen como filmes anti- plagas, anti-botrytis o anti-virus, lo que permite una menor utilización de pesticidas químicos. Este tipo de películas fotoselectivas basan su modo de acción en el bloqueo de la transmisión de radiación UV (290-380 nm) al interior del invernadero. Este proceso dificulta, ralentiza o disminuye el desarrollo de plagas o enfermedades causadas por hongos o por virus transmitidos por insectos que por algún motivo sean sensibles a la disminución o ausencia de este tipo de radiación.
- Filmes con bloqueo en el NIR (anti-térmicos). Son también filmes fotoselectivos que bloquean, en este caso, la parte infrarroja del espectro solar, evitando el sobrecalentamiento diurno del invernadero y permitiendo cultivos en zonas tropicales o desérticas, o en épocas calurosas, en otras zonas donde eran imposibles con otras tecnologías.
- Filmes fluorescentes. Modifican la luz solar en la parte UV y visible del espectro, absorbiendo longitudes de onda poco útiles para la planta (UV y verde) y emitiéndola en otras más aprovechables para la fotosíntesis (azul y roja), con lo que se conseguirían aumentos de producción y mejora de la calidad.
- Filmes ultratérmicos. Presentan una opacidad excepcional a la parte IR del espectro de emisión de la Tierra, manteniendo la temperatura del invernadero durante la noche y permitiendo un menor uso de la calefacción. Permiten, por tanto, cultivos en zonas frías, donde con otros materiales no serían rentables.

2. Iluminación de crecimiento y diodos emisores de luz

La mayor parte de la luz solar que captan las plantas es convertida en calor y solamente la luz roja y la luz azul son esenciales para su crecimiento (iluminación o irradiación de crecimiento) [5]. Cuando para estimular el crecimiento se utiliza un suplemento de luz artificial, esta debe cumplir la condición de que la irradiación de crecimiento resulte eficiente. Las fuentes de luz más revolucionarias para cumplir este objetivo son los diodos emisores de luz (*light-emitting-diodes, LEDs*). Para agricultores e investigadores, la gran ventaja de los LEDs es que permiten eliminar aquellas longitudes de onda de la luz normal que son inactivas para la fotosíntesis, consiguiendo, entre otros efectos, un ahorro energético respecto a las lámparas tradicionales para el crecimiento de las plantas.

En la última década, se ha alcanzado un desarrollo espectacular de los LEDs y su optimización ha permitido que resulten económicos como fuentes de irradiación para el crecimiento de las plantas, tanto en invernaderos como en cámaras de crecimiento controlado, para aplicaciones de cultivos hidropónicos, aeropónicos o de cultivo en suelo o sustrato.

3. Aplicaciones de los LEDs en iluminación de invernaderos

3.1. Experiencias destacadas en iluminación de invernaderos industriales y de investigación

Desde el año 2002, la Nippon Keiki Kagoshima Works, Ltd., una compañía fabricante de LEDs en Japón ha venido experimentando con el cultivo de crisantemos con iluminación mediante LEDs emisores en el rojo. En enero de 2007 publicó que para un pequeño invernadero, la utilización de dos LEDs rojos de 75 W (un total de 150 W) tenía el mismo efecto que 50 lámparas incandescentes de 75 W (un total de 3750 W). El resultado fue una disminución del coste de la energía eléctrica consumida en 25 veces.

En la Copenmind's Cleantech Conference celebrada en septiembre de 2008, J.E. Ostergaard y colaboradores, de la University of Southern Denmark, informaron que la utilización de LEDs rojos y azules resultaba más eficiente en invernaderos industriales que la iluminación fluorescente de alta potencia, alcanzando la conclusión que los gastos de instalación (tres veces superiores para LEDs que para sistemas fluorescentes) resultan compensadas por las reducciones de coste de funcionamiento (un 80% de ahorro en energía eléctrica). Actualmente, este grupo de trabajo ha constituido una empresa llamada Fionia para comercializar tales aplicaciones.

En otro orden de observaciones relativas a la utilidad de la luz LED como complemento de la luz natural para conseguir efectos concretos en plantas (modificaciones de color y olor de flores, fundamentalmente), investigadores del Departamento de Física y Astronomía de la University of St. Andrews, en el Reino Unido, han concluido que bastan intensidades LED del orden de 1 W/m^2 para conseguir efectos claros en la precocidad y calidad de la floración de cineraria (Figura 5).

Por su parte, empresas como Philips u Osram disponen ya de aplicaciones comerciales de LEDs para irradiación de plantas, en color rojo, azul y rojo-lejano (Figura 6).

3.2. Aplicación exitosa de los LED en iluminación de plantas de interior

En los últimos meses en España se ha observado un aumento espectacular de la utilización de LEDs en iluminación de plantas de interior, aplicaciones en las que se vienen precisando 1000 W de potencia para lámparas de sodio de alta presión, 1300 W para lámparas fluorescentes compactas (CFL) o 400 W para LEDs. Se suelen utilizar combinaciones de solo bulbos (CFL para el azul y LEDs para el rojo) o de bulbos (CFL o LED) y pantallas LED. Aunque alguna casa comercial preconiza la utilización de iluminación LED de 45 W/m^2 , existe consenso en admitir que para que la floración vaya bien hay que proporcionar alrededor de 160 W/m^2 en tecnología LED. Un ejemplo de combinación sería 110 W de CFL (dos lámparas CFL de 55 W) y unos 60 W de LED (4 bulbos LEDs de 15 W). Otra posible combinación serían dos bulbos LEDs de 15 W con una pantalla LED de 120 W. Estas pantallas (Figura 7), fabricadas en Shenzhen y comercializadas por *Changtian Technology HK Co Ltd*, vienen equipadas con 112 LEDs (72 rojos de 660 nm, 12 rojos de 630 nm, 26 azules de 430 nm y 8 amarillos de 590 nm). Una tercera combinación podría ser una luminaria *Led's*

Grow de 90 LEDs de 1 W (rojos de 630 nm y azules de 455 nm, en relación 8:1; o mezcla 652 nm) y 4 bulbos LEDs de 15 W.

4. Las experiencias de la NASA con LEDs y OLEDs

No obstante el interés de las contribuciones anteriores, las de mayor importancia son las procedentes de la NASA. Investigadores del Centro Espacial Kennedy de la NASA han venido trabajando, desde hace tres años, sobre la utilización de LEDs en un sistema de provisión de hortalizas capaz de cultivar y cosechar vegetales en el espacio. En este sistema, se comenzó utilizando LEDs inorgánicos cada uno de los cuales emitía un espectro estrecho e incoherente y cuyo color dependía de la composición del material semiconductor utilizado. Para convertir estas fuentes puntuales de luz en lámparas de iluminación de estado sólido (*solid-state lighting lamps, SSL*) capaces de producir una salida luminosa uniforme y homogénea, se precisó utilizar componentes ópticos. Tales componentes presentaron la desventaja de un aumento del peso y el espacio requerido para el equipo de iluminación en el sistema, con lo que se hizo preciso arbitrar una mejor solución. Esta solución fue la utilización de diodos orgánicos emisores de luz (*organic light emission diodes, OLEDs*). Estos diodos son dispositivos que se basan en una capa electroluminiscente formada por una película de componentes orgánicos que reaccionan, a una determinada estimulación eléctrica, generando y emitiendo luz por sí mismos. (Figura 8). Los OLEDs para SSL constituyen una fuente difusa de luz y de este modo resultan adecuados para cumplir los requerimientos de irradiación amplia y general necesarios para el crecimiento de las plantas.

5. El futuro de la Fitofotónica: Los OLEDs miméticos de la fotosíntesis

La distribución espectral de la luz incidente sobre un vegetal es una de las variables más importantes para optimizar su crecimiento. Por consiguiente, la característica más deseable de la irradiación para estimular la asimilación fotosintética de plantas con LEDs es la de combinar bandas de emisión en el azul y el rojo del modo más mimético posible al espectro de absorción de la clorofila, responsable de la fotosíntesis. Las emisiones monómero y excímero de emisores dopantes con propiedades fluorescentes han probado ser efectivas en la creación de tales espectros de emisión de dos bandas [6–8]. En el presente trabajo expresamos nuestra experiencia particular y la de otros grupos de trabajo en crear dopantes generadores de bandas de emisión simultánea en el rojo y azul, esenciales para la irradiación de las plantas (Figuras 9 y 10).

6. Diseños de OLEDs para irradiación de plantas

6.1. Diseño de Fattori

Este diseño (Figura 11), propuesto por Fattori y sus colaboradores [9], consta de un ánodo de vidrio recubierto de óxido de estaño e indio (ITO), transparente a la luz generada en la capa emisora (EML), que consta de TCTA dopado con una mezcla de PtL22/23Cl. Los huecos son inyectados desde el ánodo ITO y pasan a través de las capas transportadoras de huecos TPD:PC y TCTA, y se recombinan en la EML con electrones que han sido inyectados desde un cátodo Al/LiF y transportados a través de la capa de TAZ, transportadora de electrones. La delgada capa de TCTA de 10 nm,

caracterizada por una energía excitón triplete (ET) de 2,85 eV, ha sido utilizada para bloquear la transferencia excitón triplete desde los complejos de Pt (ET = 2.60–2.65 eV) hasta el triplete no radiativo de TPD (ET = 2.45 eV). La también delgada capa de 30 nm de TAZ (ET = 2.75 eV) cumple un papel similar inhibiendo el apagamiento de los excitones triplete de los complejos de Pt en el cátodo mientras simultáneamente bloquea los huecos, ambas propiedades deseables que permiten que el proceso de recombinación sea confinado en una capa EML de 30 nm [10]).

6.2. Diseño de los autores de este artículo

El diseño que proponemos consta de dos capas emisoras: Una de PVK dopada con un complejo octadentado de erbio (*Tfdknp*) a base de tres ligandos dicetonato fluorado y uno de 5-nitro-1,10-fenantrolina (Figura 12), y otra, de OXD-7 dopada con un complejo hexadentado de iridio a base de tres ligandos bidentados fluorados, conocido como *firpic*. El ánodo es vidrio recubierto de ITO. Los huecos, inyectados desde el ánodo, atraviesa la capa transportadora de huecos PEDOT:PSS para recombinarse en las capas emisoras con electrones que han sido inyectados desde un cátodo Al/Ca (Figura 13).

7. Eficiencia de los OLEDs

En mayo de 2007, el proyecto OLLA (*Organic LED technology for Lighting Applications*) del sector TIC del Sexto Programa Marco de Investigación de la Unión Europea, puso a punto OLEDs cuya eficiencia luminosa fue de 25 lm/W, el doble de la de una lámpara de incandescencia estándar. En mayo de 2008, Mark Thompson y Stephan Forrest construyeron OLEDs que producían 70 lm/W, y afirman que aún podrían conseguir más. Para lograr esa eficiencia tan impresionante, utilizan una red combinada con microlentes, todo ello a nano escala (las lentes tienen 5 μm de ancho).

8. Previsiones sobre la comercialización de OLEDs

Aunque la fabricación de OLEDs es enteramente accesible en estos momentos a escalas de laboratorio e industrial, existen problemas para su comercialización.

Los procedimientos de trabajo a escalas de laboratorio y piloto no son especialmente dificultosos y aparecen recogidos por los autores de este artículo en una monografía publicada en el verano de 2008 [11]. El problema fundamental que presentan estos dispositivos está en su labilidad frente a los factores ambientales y la necesidad imperiosa de proceder a su encapsulamiento si se quiere asegurar su funcionamiento con una duración de tiempo competitiva. En el reciente congreso de NanoSpain, celebrado en Zaragoza, en marzo de 2009, divulgamos la fabricación de un OLED eficiente en su emisión en el rojo y con aplicaciones potenciales en irradiación de plantas (Figura 14). No obstante, hasta la fecha, no hemos conseguido optimizar su funcionamiento el tiempo suficiente para conferirle esta aplicación.

A escala industrial, varias multinacionales están fabricando prototipos para poner en el mercado OLEDs con aplicaciones múltiples, incluida la de iluminación de vegetales en invernaderos (Figura 15).

Como método de fabricación, se está utilizando una técnica similar a la que se sigue en la producción de células fotovoltaicas de capa delgada (*thin films*) y que recuerda al

sistema de impresión de los periódicos. Este exitoso método ha supuesto a algunas de estas empresas cuatro años de trabajo y una inversión de 13 millones de dólares. No obstante, persiste la dificultad asociada al importante coste de los materiales de encapsulado, que repercute en el precio final y, por tanto, en su competitividad respecto a los sistemas de iluminación existentes actualmente.

Pese a los inconvenientes, el tiempo previsto de introducción de los productos OLED en el mercado no puede ser más breve: General Electric pretende conseguirlo en los primeros meses de 2010.

Referencias

- [1] J.W. Hart, *Light and Plant Growth (Topics in Plant Physiology)*, Springer, Berlin, 1988.
- [2] T.H. Attridge, *Light and Plant Responses*, Edward Arnold, London, 1990, ISBN: 0-7131-2973-5.
- [3] H. Mohr, P. Schopfer, P.H. Quail, *Plant Physiology*, Springer, Berlin, 1995.
- [4] E. Espí, Y. García, Documento Cotec de Oportunidades Tecnológicas: El Invernadero de Plástico, REPSOL y Cotec (Fundación para la Innovación Tecnológica), Móstoles (Madrid), 2008.
- [5] Philips, *Artificial Lighting in Horticulture*, Philips, The Netherlands, 1992.
- [6] E. L. Williams, K. Haavisto, J. Li, G.E. Jabbour, *Adv.Mater.* , 2007, 19: 197.
- [7] M. Cocchi, J. Kalinowski, D. Virgili, V. Fattori, S. Develay, J.A.G. Williams, *Appl. Phys. Lett.* , 2007, 90: 163508.
- [8] M. Cocchi, J. Kalinowski, D. Virgili, J.A.G. Williams, *Appl. Phys. Lett.* 2008, 92: 113302.
- [9] V. Fattori, J.A. G.Williams, L. Murphy, M. Cocchi, J. Kalinowski. *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Application*, 2008, 6: 225.
- [10] J. Kalinowski, *Organic Light Emitting Diodes: Principles, Characteristics and Processes*, Marcel Dekker, NewYork, 2005.
- [11] P. Chamorro-Posada, J. Martín Gil, P. Martín-Ramos y L.M. Navas-Gracia. *Fundamentos de la Tecnología OLED*. Dpto. de Teoría de la Señal e Ingeniería Telemática, y Dpto. de Ingeniería Agrícola y Forestal, Universidad de Valladolid, 2008, D Legal: VA-932-2008; ISBN:978-84-936644-0-4.

LEYENDA:

Figura 1. Efecto de la longitud de onda de la radiación sobre los vegetales. Ejemplos de efectos fotomorfogénicos (Cortesía de Philips).

Figura 2. Curva de sensibilidad de la fotosíntesis en función de la longitud de onda de la radiación recibida (Cortesía de Philips).

Figura 3. Aplicación de iluminación fotosintética con lámparas de vapor de sodio a alta presión.

Figura 4. Empleo de films de plástico fotoselectivos en aplicaciones de agricultura intensiva.

Figura 5. Aspecto de tres plantas de cineraria cuyo crecimiento ha sido inducido por la luz solar y suplementado, en el caso de las situadas en los extremos, por iluminación LED. Las iluminadas con LED han adelantado la floración dos semanas antes que las del centro. Las situadas a la izquierda, iluminadas con un LED de emisión en el IR cercano presentan un aspecto más pálido que las iluminadas con un LED azul (derecha de la figura) que, además, resultan más compactas.

Figura 6. LEDs comercializados por la empresa Philips para irradiación de plantas: Imagen izquierda en formato cadena, e imagen derecha en formato módulo (Cortesía de Philips).

Figura 7. Pantalla LED de 120 W.

Figura 8. OLED transparente.

Figura 9. Requerimientos espectrales de OLEDs para irradiación de plantas en invernaderos.

Figura 10. Irradiación de plantas mimética de la fotosíntesis, con luz en las bandas del azul y el rojo (Cortesía de Philips).

Figura 11. OLED a base de complejos de platino en TCTA, con emisión en el rojo y azul, diseñado por Fattori et al. [9] para iluminación de plantas en invernaderos.

Figura 12. Complejo Tfdknper.

Figura 13. Diseño de un OLED con emisiones en el rojo y el azul, propuesto para irradiación de plantas en invernaderos.

Figura 14. OLED emisor en el rojo, de fabricación propia.

Figura 15. Disposición seriada de OLEDs en una banda horizontal, cuya comercialización está prevista por General Electric (Fotografía divulgada por el Centro de investigación de GE en Niskayuna, Nueva York, EE.UU.)

COLOR	λ (nm)	EFEECTO
UV	< 315	Letal
	315 - 400	Anormalidades
AZUL		Fotosíntesis (+)
	400 - 500	Fotomorfogénesis
		Fototropismo
VERDE	500 - 600	Fotomorfogénesis
ROJO		Fotosíntesis (+++)
	600 - 700	Fotomorfogénesis Alargamiento (+)
ROJO LEJANO	700 - 750	Fotomorfogénesis Alargamiento (++)
INFRA ROJO	> 750	Temperatura (+)



Figura 1. Efecto de la longitud de onda de la radiación sobre los vegetales. Ejemplos de efectos fotomorfogénicos (Cortesía de Philips).

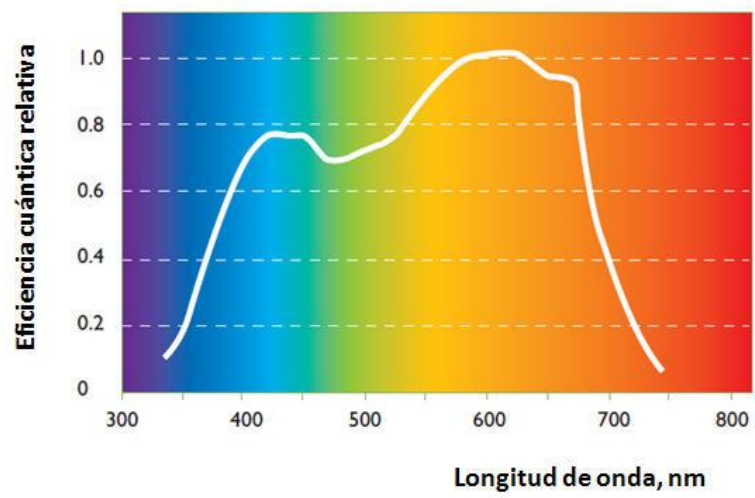
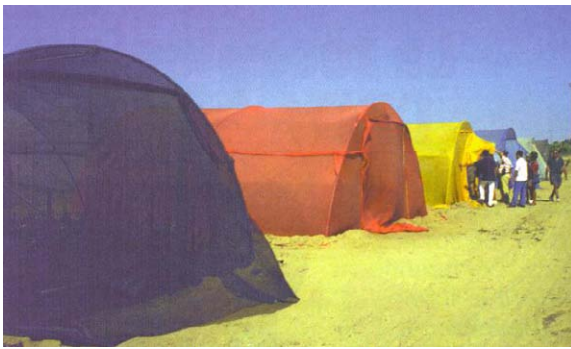


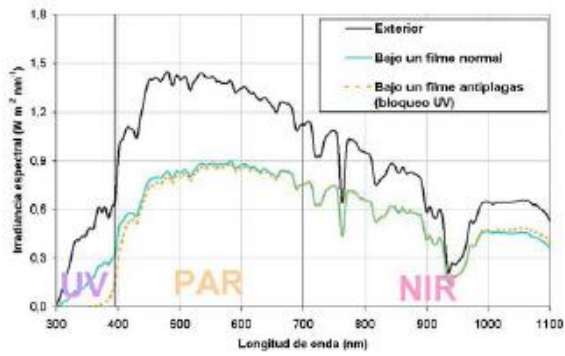
Figura 2. Curva de sensibilidad de la fotosíntesis en función de la longitud de onda de la radiación recibida (Cortesía de Philips).



Figura 3. Aplicación de iluminación fotosintética con lámparas de vapor de sodio a alta presión.



FILMS ANTI-PLAGAS



FILMS FLUORESCENTES

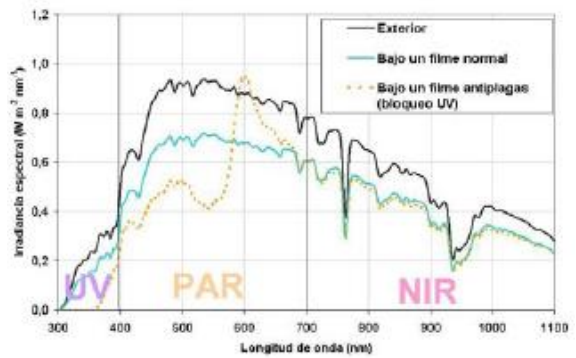


Figura 4. Empleo de films de plástico fotoselectivos en aplicaciones de agricultura intensiva.



Figura 5. Aspecto de tres plantas de cineraria cuyo crecimiento ha sido inducido por la luz solar y suplementado, en el caso de las situadas en los extremos, por iluminación LED. Las iluminadas con LED han adelantado la floración dos semanas antes que las del centro. Las situadas a la izquierda, iluminadas con un LED de emisión en el IR cercano presentan un aspecto más pálido que las iluminadas con un LED azul (derecha de la figura) que, además, resultan más compactas.



Figura 6. LEDs comercializados por la empresa Philips para irradiación de plantas: Imagen izquierda en formato cadena, e imagen derecha en formato módulo (Cortesía de Philips).

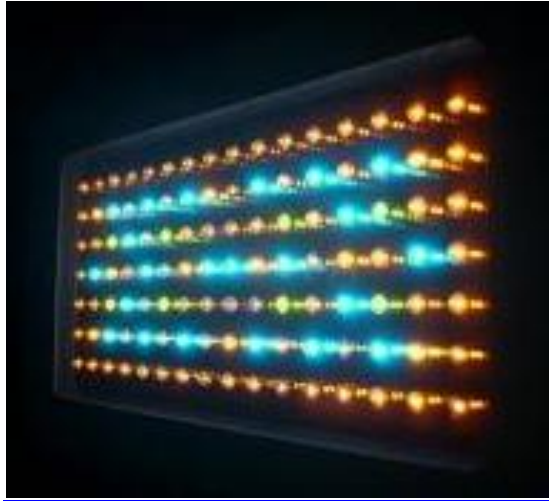


Figura 7. Pantalla LED de 120 W

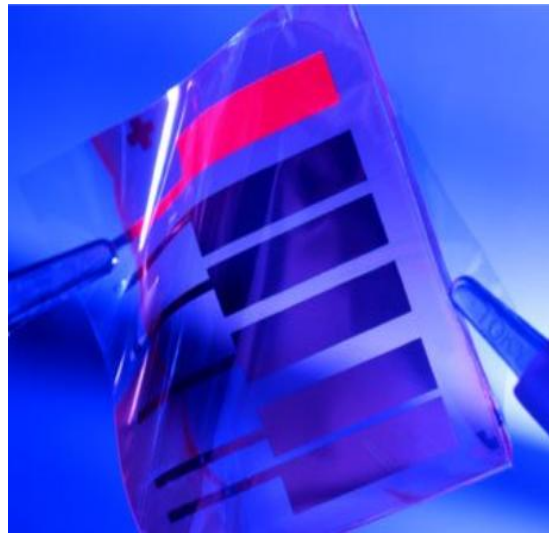


Figura 8. OLED transparente.

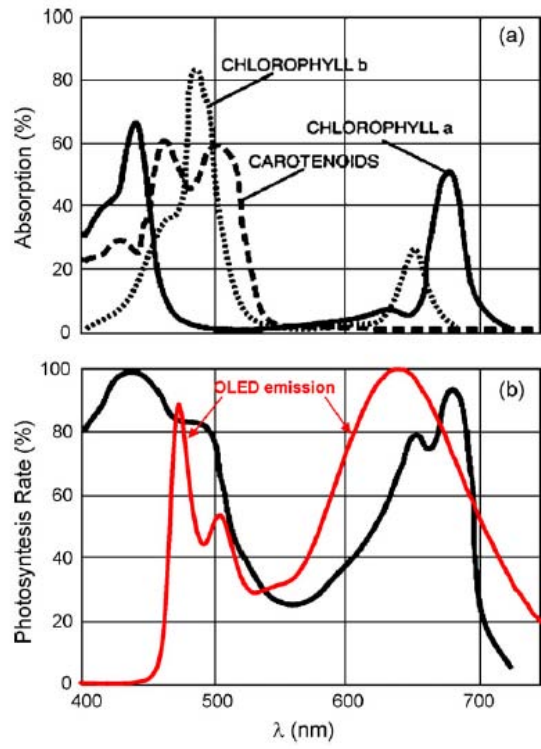


Figura 9. Requerimientos espectrales de OLEDs para irradiación de plantas en invernaderos.



Figura 10. Irradiación de plantas mimética de la fotosíntesis, con luz en las bandas del azul y el rojo (Cortesía de Philips).

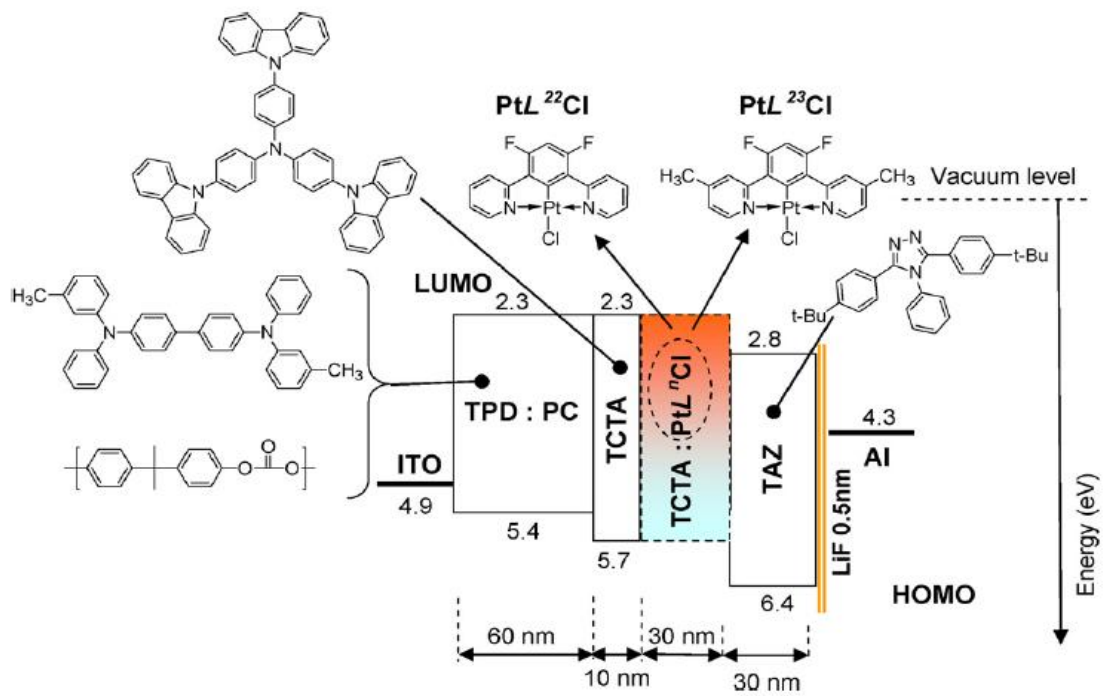


Figura 11. OLED a base de complejos de platino en TCTA, con emisión en el rojo y azul, diseñado por Fattori et al. [9] para iluminación de plantas en invernaderos.

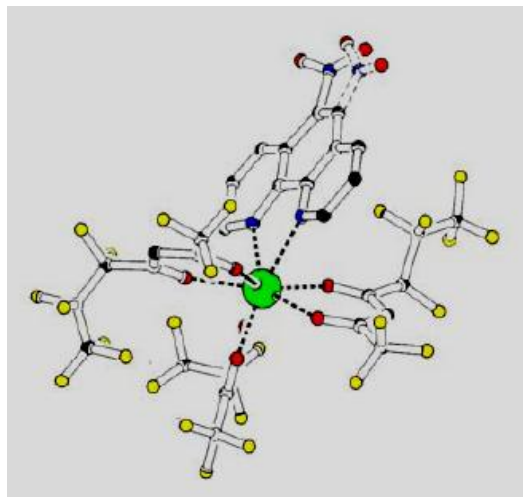


Figura 12. Complejo Tfdknper.

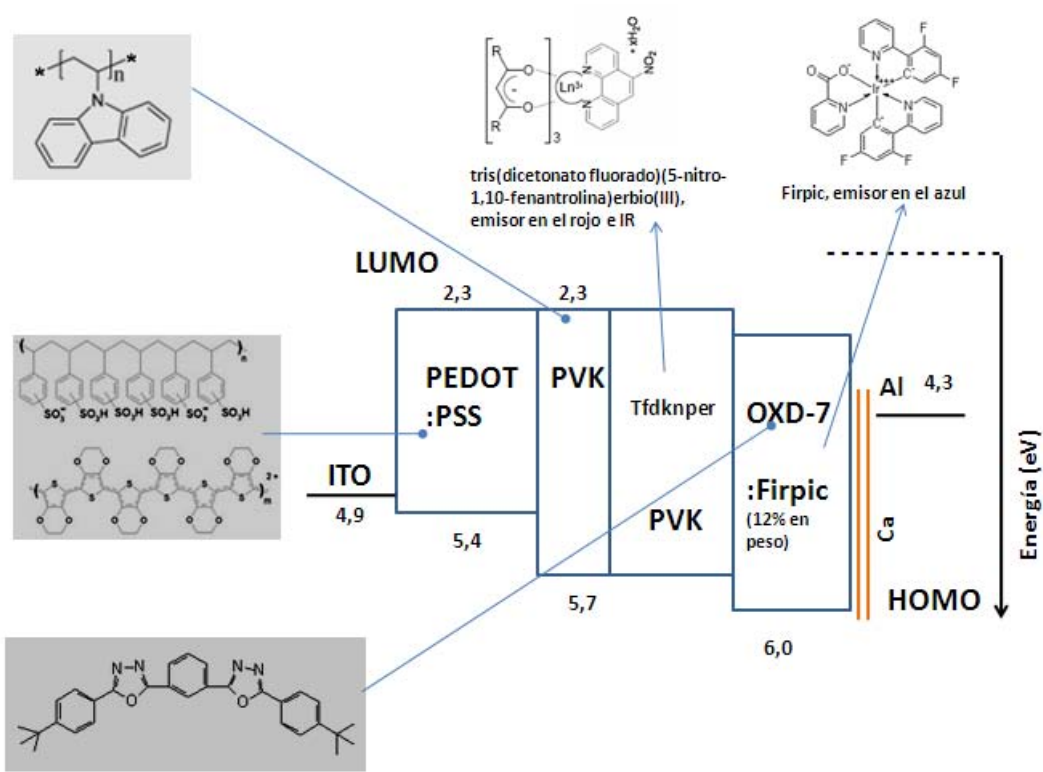


Figura 13. Diseño de un OLED con emisiones en el rojo y el azul, propuesto para irradiación de plantas en invernaderos.



Figura 14. OLED emisor en el rojo, de fabricación propia.

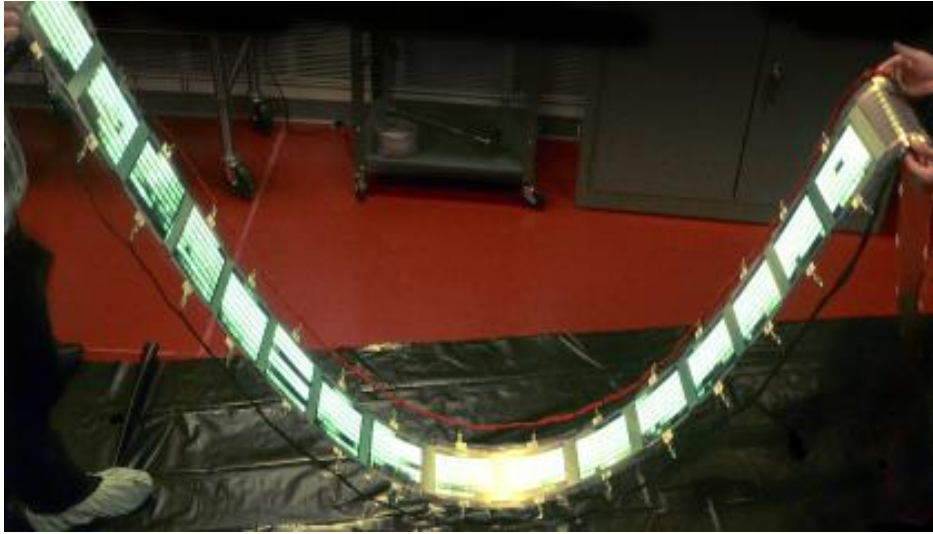


Figura 15. Disposición seriada de OLEDs en una banda horizontal, cuya comercialización está prevista por General Electric (Fotografía divulgada por el Centro de investigación de GE en Niskayuna, Nueva York, EE.UU.)