

La química detrás de las pantallas OLED The Chemistry behind in the OLED screens

Guerra-Poot Cristian Giovani^a, Salazar-Pereda Verónica^b, Suárez Escobar Andrés^c, Cristóbal Gasga Crispín Silvano^d, Mendoza Espinosa Daniel^e, Zúñiga Estrada Erick Alfredo^f

Abstract:

Organic Light-Emitting Diodes (OLEDs) are a cutting-edge display technology used in smartphones, TVs, laptops, and other devices. Unlike LCDs, OLEDs emit light independently each pixel, enabling deeper blacks, more vibrant colors, and greater energy efficiency. Since their inception in 1987 by Kodak, OLEDs have evolved through three key generations: fluorescent (low efficiency), phosphorescent (using heavy metals for higher efficiency), and thermally activated delayed fluorescence (TADF, metal-free and eco-friendly). Each generation has improved external quantum efficiency (EQE) and color accuracy, though challenges such as blue emitter stability persist. Recent advances, such as hyperfluorescence, suggest the emergence of a fourth generation. OLEDs exemplify the synergy between chemistry and engineering, offering superior display performance while addressing sustainability concerns.

Keywords:

OLED, Chemistry, Fluorescence, Phosphorescence, TADF, Hyperfluorescence, External quantum efficiency(EQE)

Resumen:

Los diodos orgánicos emisores de luz (OLED) son una tecnología de vanguardia utilizada en pantallas de celulares inteligentes, televisores, computadoras portátiles y otros dispositivos. A diferencia de las pantallas LCD, los OLED emiten luz de forma independiente en cada píxel, lo que permite negros más profundos, colores más vibrantes y una mayor eficiencia energética. Desde su creación en 1987 por Kodak, los OLED han evolucionado a través de tres generaciones clave: Fluorescentes (baja eficiencia), fosforescentes (utilizan metales pesados para mayor eficiencia) y fluorescencia térmicamente activada retardada (TADF, libre de metales y amigable con el medio ambiente). Cada generación ha mejorado la eficiencia cuántica externa (EQE) y la precisión del color, aunque persisten desafíos como la estabilidad de los emisores azules. Avances recientes, como la hiperfluorescencia, sugieren el surgimiento de una cuarta generación. Los OLED ejemplifican la sinergia entre la química y la ingeniería, ofreciendo un rendimiento de la pantalla superior, al mismo tiempo que abordan preocupaciones sobre la sostenibilidad.

Palabras Clave:

OLED, Química, fluorescencia, Fosforescencia, TADF, Hiperfluorescencia, Eficiencia cuántica externa (ECE)

^a Autor de correspondencia, Cristian Giovani Guerra Poot, Universidad autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Básica e Ingeniería | Mineral de la Reforma-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0001-8157-1726>, Email: gu397495@uaeh.edu.mx

^b Verónica Salazar Pereda, Universidad autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Básica e Ingeniería | Mineral de la Reforma-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0005-3830-0142>, Email: salazar@uaeh.edu.mx

^c Andrés Suárez Escobar, Instituto de Investigaciones Químicas (CSIC-Universidad de Sevilla) | Sevilla | España, <https://orcid.org/0000-0002-0487-611X>, Email: andres.suarez@iq.csic.es

^d Crispín Silvano Cristóbal Silvano, Universidad de Guanajuato | Departamento de Química, División de CNE, Sede Noria Alta | Noria Alta s/n, C.P. 36050 Guanajuato | México, <https://orcid.org/0000-0002-7337-3567>, Email: cs.cristobal@ugto.mx

^e Daniel Mendoza Espinosa, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Básica e Ingeniería | Mineral de la Reforma-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0001-9170-588X>, Email: daniel_mendoza@uaeh.edu.mx

^f Erick Alfredo Zúñiga Estrada, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Básica e Ingeniería | Mineral de la Reforma-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0001-7174-0255>, Email: erick_zuniga@uaeh.edu.mx



Introducción

OLED son las siglas en inglés de diodo emisor de luz orgánico, es un recurso lumínico y tecnológico que es usado en pantallas de celulares inteligentes, laptops, televisores, consolas de videojuegos portátiles, entre otros. Esta tecnología ayuda en diferentes ámbitos como trabajo y educación, así mismo como medio de entretenimiento (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Detrás de cada pantalla OLED, hay una historia de investigación y desarrollo que inició en 1987 con el equipo de investigación de Kodak [1], y su evolución ha permitido obtener pantallas con tonos de color son cada vez más fieles a la realidad.



Figura 1. Aplicación de las pantallas OLED en varios dispositivos.

¿Qué es un OLED?

Un emisor de luz orgánico (OLED) es un tipo de material orgánico que al aplicarle una corriente eléctrica emite luz. Lo anterior quiere decir que, a diferencia de otras tecnologías de pantalla, cada píxel de un OLED se ilumina de forma independiente, sin necesidad de una fuente de luz en el fondo, como es el caso de la tecnología LCD. [2] En la Figura 2 se muestra un esquema básico del funcionamiento de un OLED, en términos simples está constituido por un cátodo y ánodo, entre estos dos hay varias intercapas.

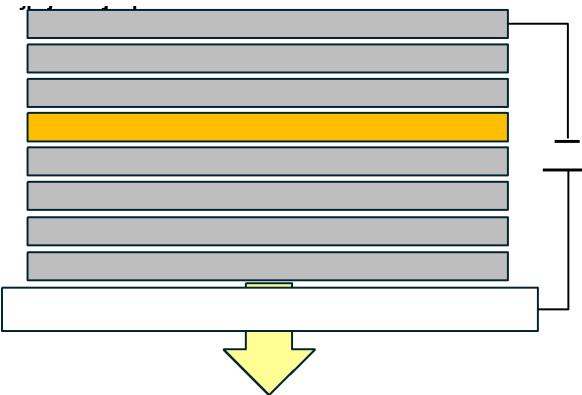


Figura 2. Representación de una estructura apilada de un OLED.

El funcionamiento inicia con la capa de inyección de carga: al encender el dispositivo hay una corriente que recorre el material hasta llegar a la capa emisiva que es donde se encuentran las moléculas orgánicas. Al aplicar un potencial en la capa emisiva se forman los excitones, electrones en estado de mayor energía que regresan a su estado basal y emiten energía lumínica (electroluminiscencia) [3]. La energía lumínica emitida tiene una longitud de onda específica que cae en la región visible [4] y es así como cada píxel de una pantalla puede emitir un color específico (Figura 3) y de forma independiente.

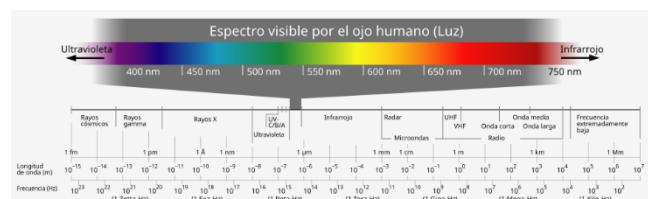


Figura 3. Espectro electromagnético de la luz visible. Adaptado de Jailbird, H. F. [4]

La tecnología OLED tiene muchas ventajas como las siguientes:

- **Colores más vibrantes.** Al no requerir de un fondo de luz luminoso, y que cada uno de los píxeles emita su propia luz, permite obtener negros más profundos al igual que colores más vívidos.
- **Mayor eficiencia energética.** Como cada píxel se ilumina cuando es necesario, reduce el consumo energético, ya que hay algunos que se encienden y otros no, caso contrario con las pantallas LCD (siglas en inglés de pantalla de cristal líquido) que siempre tienen una iluminación constante en toda la pantalla.

- **Flexibilidad y ultra delgadez.** Debido a la naturaleza orgánica de las capas OLED, permite que se puedan fabricar pantallas muy delgadas y flexibles, lo que resulta en dispositivos curvos o incluso plegables, mientras que con la tecnología LCD se obtienen pantallas pesadas y rígidas.



Figura 4. Comparativa de una pantalla OLED con una pantalla LCD.

La química de los OLED

Esta química desempeña un papel fundamental en la investigación y desarrollo de los OLED. Los investigadores basándose en sus conocimientos, tanto, en síntesis, purificación, elucidación estructural y en la realización de pruebas fotoquímicas pertinentes, pueden diseñar moléculas emisoras de luz.

Este enfoque resulta crucial para comprender la naturaleza y propiedades de dichos compuestos, como sus colores intensos, estabilidad frente a la degradación y flexibilidad, lo que permite proponer su aplicación en dispositivos OLED.

La fluorescencia se define como el proceso de absorción de energía luminosa seguida de la emisión rápida y breve de la luz. Desde el punto de vista cuántico, cuando se excita uno de sus electrones de una molécula en estado fundamental (o basal), este transita a un estado de mayor energía (o excitado), a este electrón se le denomina excitón. Al relajarse, el excitón regresa a su estado fundamental sin modificar su espín (espín singulete; $S_1 \rightarrow S_0$), lo que explica la rapidez del proceso (típicamente en nanosegundos). Durante esta transición, el electrón emite un fotón de menor energía, cuya longitud de onda se sitúa en la región de luz visible. Cabe destacar que solo el 25% de los excitones formados presentan fluorescencia (Figura 5).

La fosforescencia se define como la absorción de energía que provoca la transición del estado fundamental (S_0) a un estado excitado (S_1). Sin embargo, durante este proceso se produce un entrecruzamiento intersistema, en el cual el

electrón cambia su multiplicidad del espín pasando de un estado singulete (S_1) a un estado triplete (T_1). Dado que esta transición está prohibida por las reglas de selección cuánticas, el retorno del electrón a su estado fundamental se realiza de forma más lenta (llega a ser de microsegundos a segundos). Cabe mencionar que el 75% de los excitones formados se encuentran en estado triplete ($T_1 \rightarrow S_0$). [5]

Los compuestos utilizados en dispositivos OLED pueden presentar diferentes rangos de color, dependiendo de la aplicación para la que han sido diseñados. Para determinar la idoneidad de un compuesto en estos dispositivos, es crucial evaluar diversos parámetros, tales como:

- *Rendimiento cuántico* (eficiencia interna para convertir energía absorbida en luz emitida).
- *Desplazamiento de Stokes* (diferencia entre las longitudes de onda de absorción y de emisión, lo cual ayuda a minimizar la reabsorción de la luz).
- *Bandas de emisión y niveles de energía* (determinantes para la pureza del color y la correcta inyección y recombinación de portadores).
- *Tiempo de vida de los excitones* (influye en la eficiencia de la emisión y en la probabilidad de procesos de quenching).
- *Estabilidad térmica y fotoestabilidad* (garantizan que las propiedades lumínicas y estructurales del compuesto se mantengan en condiciones de operación prolongadas).

Adicionalmente, la eficiencia cuántica externa (EQE por sus siglas en inglés) es otro valor fundamental. La EQE mide la capacidad de un dispositivo para transformar los electrones injectados en fotones emitidos, siendo la relación entre el número de fotones emitidos y el número de electrones injectados; un valor elevado de EQE indica un mejor rendimiento del OLED.

Esta información es esencial para el desarrollo de sistemas que permitan diseñar dispositivos OLED más duraderos y económicos.

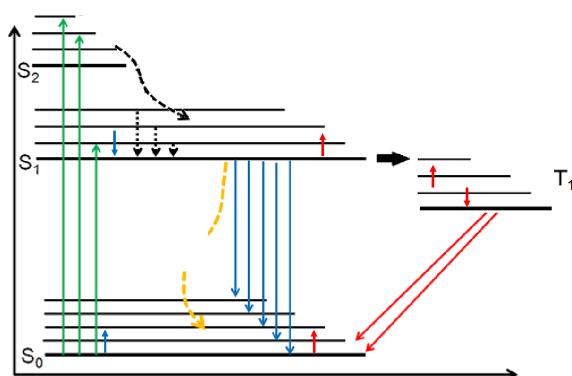


Figura 5. Diagrama de Jablonski donde se comparan los procesos de fluorescencia y fosforescencia al excitar un electrón.
Adaptado de Crichley. [6]

Generaciones de los OLED

La evolución de los dispositivos OLED ha pasado por varias generaciones. La primera generación se fundamentó en compuestos fluorescentes, caracterizada por su baja eficiencia cuántica externa (EQE), mientras que la segunda generación introdujo emisores fosforescentes, que aprovechan estados triplete para mejorar la EQE. Finalmente, tecnologías más recientes como la fluorescencia tardía activada térmicamente (TADF) han permitido una mayor optimización de la eficiencia y estabilidad de los dispositivos.

La **primera generación** de OLED se basó en moléculas fluorescentes, los cuales emplean tintes orgánicos para generar emisión de luz.

El primer dispositivo OLED bien establecido en el mercado fue la 8-hidroxiquinolina de aluminio (Alq_3) reportado por Tang y VanSlyke en 1987 (Figura 6a). [7] Este compuesto se utilizó como un emisor en un dispositivo de vacío. Este compuesto emitió luz verde en la región de luz visible de 550 nm dentro del espectro visible, operando un voltaje de 10 V y con una EQE = 1%. A partir de esta implementación, el campo de los OLED comenzó a adquirir mayor relevancia en el desarrollo de nuevas tecnologías de emisión de luz.

En 1989, el equipo de investigación liderado por Chen reportó el primer OLED rojo. Este dispositivo se basó en derivados de 4-(dicinomileno)-2-metil-6-[4(dimetilaminonisotri]-4H-pirano], los cuales exhibieron una emisión de luz roja con una longitud de onda de emisión entre 570-620 nm, alcanzando un EQE = 2.3% (Figura 6b). [8]

En 1990, el grupo de Adachi reportó el primer OLED azul. Este compuesto se basó en el antraceno, con posiciones sustituidas con grupos voluminosos en 9 y 10 como se muestra en la Figura 6a. Denominado 2Pan, este compuesto mostró un color de emisión azul profundo con una longitud de onda de emisión fue de 452 nm y una EQE del 2.82% (Figura 6c). [9]

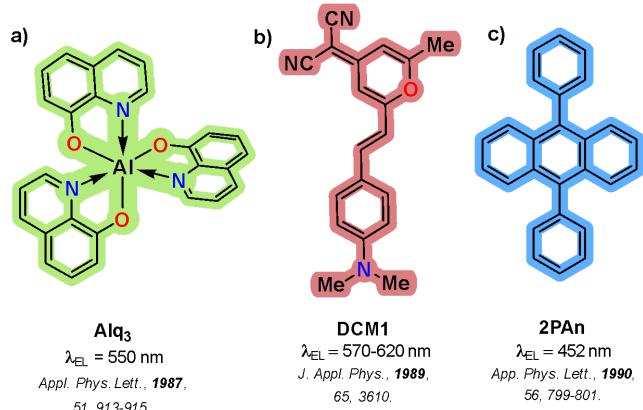


Figura 6. Ejemplos de emisores OLED de primera generación basado en moléculas fluorescentes.

La **segunda generación** de OLED surge como una solución para aprovechar el 75% restante de excitones en estado triplete. Para alcanzar este objetivo, se desarrollaron emisores de luz basados en complejos de metales pesados. Según investigaciones previas [10], átomos pesados como el iridio y el platino forman complejos capaces de acelerar la desactivación radiativa a través de la fosforescencia. Con esta estrategia, basada en el uso del estado triplete y su vía de relajación, los emisores de metales pesados alcanzan una eficiencia cuántica del 100%, un aspecto crucial para desarrollar dispositivos con altos valores de EQE.

Watts y colaboradores fueron pioneros al reportar, en 1991, el compuesto *fac*-tris(2-fenilpiridina)iridio(III). Este material ha sido ampliamente utilizado como dopante emisor verde en dispositivos OLED debido a su capacidad para mejorar la transferencia de energía y su alta estabilidad térmica. Su emisión tiene una longitud de onda de 510 nm [11].

Además del emisor verde basado en *fac*-tris(2-fenilpiridina)iridio(III), en 2018, el equipo de investigación de Chang sintetizó un compuesto dinuclear de iridio con características avanzadas. [12] Este material incorpora fragmentos 2-pirazolil-6-fenilpiridina y un quelato bidentado fenilimidazolilideno (Figura 7a). Estos compuestos exhiben propiedades fotofísicas destacadas,

alcanzando una EQE = 27.6%, lo cual demuestra su potencial para aplicaciones en OLED de alto rendimiento. Había pocos reportes de emisores rojos de segunda generación, esto debido a la dificultad de suprimir la aniquilación triplete-triplete y lograr una descomposición radiativa en los estados MLCT (transferencia de carga metal-ligante, por sus siglas in inglés). Entre los primeros reportes de emisores rojos OLED de segunda generación, Forrest y sus colaboradores documentaron en 1988 el compuesto

2,3,7,8,12,13,17,18-octaetil-21H-23H-porfirinaplatino(II) (PtOEP). Con el tiempo, se desarrollaron nuevos complejos de iridio. En 2018, Wong y colaboradores diseñaron un complejo heteroléptico de iridio(III), incorporando un grupo diarioboro y ligantes acetilacetonato (acac) [13], como se muestra en la Figura 7b. Este compuesto emitía una longitud de onda de 604 nm y una EQE = 28%, un gran paso para la obtención de emisores OLED rojos.

Dentro de la segunda generación de emisores azules OLED, el compuesto Bis[2-(4,6-difluorofenil)piridinato-C₂,N](picolinato)iridio (FIrpic) fue reportado en 2001 por Forrest, marcando un hito en la fabricación de OLED fosforescentes azules. Este material presentó una EQE = 5.7% y con una longitud de emisión de 475 nm [14]. Consolidándose como un grupo de investigación pionero en el desarrollo e implementación de estos emisores.

El desarrollo de carbenos tipo NHC impulsó su aplicación en complejos de iridio(III), permitiendo su integración en dispositivos OLED. En 2018, Zysman-Colman en 2018 reportó un compuesto meridional homoléptico iridio(III), en el cual el NHC estaba sustituido por ligantes CF₃ con fuerte efecto electroatractor, como se visualiza en la Figura 7c. Este compuesto exhibió una longitud de onda de emisión de 412 nm y con una EQE del 12.5% [15].

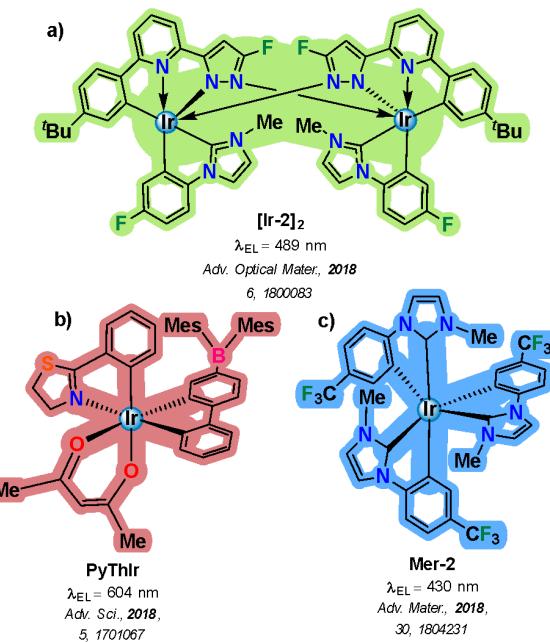


Figura 7. Emisores OLED de segunda generación basados en moléculas fosforescentes.

Los emisores de luz basados en complejos de metales pesados han demostrado mejoras respecto a sus predecesores, ya que aumentan la EQE, además de ofrecer una amplia variedad de longitudes de onda de emisión. Sin embargo, el uso de metales preciosos (iridio, platino, oro, entre otros) tiene efectos negativos sobre el medio ambiente, además de que su investigación y producción tiene un costo elevado.

Lo anterior mencionado, sirvió de premisa para el desarrollo de la **tercera generación** de OLED, orientada a reducir costos y ser más amigable con el medio ambiente. Una solución ante esta problemática fue la fluorescencia retardada activada térmicamente (TADF por sus siglas del inglés), una tecnología que optimiza la eficiencia de los OLED al aprovechar estados excitados que, de manera convencional, no generarían emisión de luz. Esto aumenta el rendimiento de los dispositivos sin utilizar complejos de metales preciosos como el iridio. [16]

Las moléculas TADF se caracterizan por tener un pequeño gap energético (ΔE_{ST}) entre el estado excitado más bajo singulete (S_1) y estado más bajo triplete (T_1), lo que facilita la conversión de excitones triplete en emisiones útiles.

En 2011, el equipo de Adachi reportó el primer OLED, utilizando una molécula TADF orgánica pura como emisor [17]. Este compuesto presentó una EQE del 5.3 %, marcando el inicio del uso de moléculas orgánicas en dispositivos OLED.

El desarrollo de este nuevo concepto continuó, en 2020 Hatakeyama reportó una solución OLED procesable con un EQE = 21.8% y una emisión verde pura de 505 nm, mediante la molécula OAB-ABP-1, la cual tiene un esqueleto extendido π y con sustituyentes voluminosos, como se muestra en la Figura 8a.

El primer reporte sobre la tercera generación de emisores rojos OLED fue realizado por Adachi y colaboradores en el 2012, quienes documentaron el compuesto 2,3,5,6-tetrakis(3,6-difenilcarbazol-9-il)-1,4-dicianobenceno) nombrado 4CzTPN-Ph [18], el cual presentó una longitud de emisión de 580 nm y una EQE de 11.9 %. Con estos antecedentes, en 2020 Cheng y colaboradores reportaron un emisor rojo basado en el 9,10-dibromoantraceno, denominado DmACDbA, el cual presentó un EQE del 24.9% y con una longitud de emisión de 583 nm. [19] Una característica de este compuesto es que los grupos metilo sobre los espaciadores fenilos inducen grandes ángulos de torsión, como se muestra en la Figura 8b.

Los compuestos aplicados en dispositivos OLED con emisión roja y verde han tenido un gran éxito. No obstante, desde la segunda generación, los emisores azules OLED han enfrentado grandes desafíos, ya que, al ser más energéticos que los emisores verdes y rojos, experimentan una rápida degradación, lo que afecta su tiempo de vida operativo.

Por ello, desarrollar un emisor OLED azul estable, especialmente en el espectro azul profundo, sigue siendo un gran desafío para la investigación en este campo.

El grupo de investigación de Adachi desarrolló múltiples compuestos para su aplicación en dispositivos OLED, incluyendo emisores azules. En 2012, reportaron la primera clase de emisores basados en moléculas orgánicas TADF con emisión en el espectro del azul profundo.

Entre ellos se encuentran el emisor TADF azul cielo, presentado por Bräse en 2020 [20]. Este compuesto es una molécula lineal denominado ICzTRZ (Figura 8c), con un núcleo de indolcarbazol difuncionalizado, que presentó un alto rendimiento con una EQE del 22.1% y una longitud de emisión de 483 nm.

Se han logrado grandes avances en el desarrollo de los OLED de tercera generación; sin embargo, los recientes desarrollos y conceptos marcan el inicio de la cuarta generación de OLED.

Esta nueva generación requiere mejoras en eficiencia, pureza del color y aumento en el tiempo de vida útil, entre otros factores clave. Entre los conceptos emergentes destaca el reportado en 2019 por Endo y colaboradores: la

hiperfluorescencia, una tecnología que podría representar una solución para los dispositivos OLED [21].

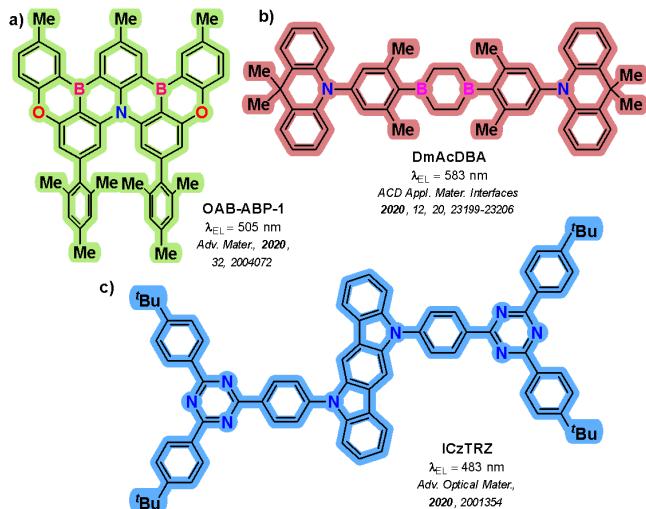


Figura 8. Emisores OLED de tercera generación basados en moléculas TADF

Conclusiones

La tecnología OLED ha evolucionado significativamente desde su inicio en 1987, pasando por tres generaciones clave: fluorescentes, fosforescentes (con metales pesados) y TADF (fluorescencia retardada activada térmicamente). Cada avance ha permitido mejorar la eficiencia cuántica externa (EQE), la pureza del color y la sostenibilidad, minimizando la dependencia de metales costosos y contaminantes.

La química ha sido fundamental en el diseño de materiales orgánicos e inorgánicos, permitiendo colores vibrantes, dispositivos flexibles y una mayor eficiencia energética. No obstante, persisten desafíos como la estabilidad de los emisores azules y los costos de producción.

Innovaciones como la hiperfluorescencia han impulsado el desarrollo de una cuarta generación de OLED, orientada a mejorar la estabilidad, la durabilidad y el rendimiento lumínico.

En resumen, la tecnología OLED representa un éxito interdisciplinario entre la ciencia de materiales y la electrónica, con un potencial continuo para revolucionar pantallas y dispositivos, siempre que los avances técnicos se equilibren con la sostenibilidad ambiental.

Referencias

- [1] S. A. VasSlyke, C. W. Tang y L. C. Roberts, «Electroluminescent device with organic luminescent medium». Estados Unidos Patente 4720432, 19 Enero 1988.
- [2] IUPAC, «OLEDs», 11 mayo 2025. [En línea]. Available: <https://iupac.org/materialschemistryedu/computing/oleds/#:~:text=Organic%20light%20emitting%20diodes%2C%20or,have%20very%20limited%20commercial%20use..> [Último acceso: 11 Mayo 2025].
- [3] G. Hong, X. Gan, C. Leonhardt, Z. Zhang, J. Seibert, J. Busch y S. Bräse, «A Brief History of OLEDs—Emitter Development», Advanced Materials, vol. 33, nº 9, p. 20005630, 18 enero 2021.
- [4] H. F. Jailbird, «Wikimedia Commons», Wikimedia Commons, 16 marzo 2007. [En línea]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum-es.svg. [Último acceso: 2025 mayo 11].
- [5] B. Valeur y M. N. Berberan-Santos, «A Brief History of Fluorescence and Phosphorescence before the», Journal of chemical education, vol. 88, pp. 731-738, 2011.
- [6] Critchley, «What is the Difference Between Fluorescence and Phosphorescence?», Azo optics, 4 Abril 2018. [En línea]. Available: <https://www.azooptics.com/Article.aspx?ArticleID=1326>.
- [7] C. W. Tang y S. A. VanSlyke, «Organic electroluminescent diodes», Applied Physics Letters, vol. 51, nº 12, pp. 913-915, 21 Septiembre 1987.
- [8] C. W. Tang, S. A. VanSlyke y C. H. Chen, «Electroluminescence of doped organic thin films», Jornal of Applied Physics, vol. 65, pp. 3610-3616, 1989.
- [9] C. Adachi, T. Tustsui y S. Saito, «Blue light-emitting organic electroluminescent devices», Applied Pysics Letters, vol. 56, pp. 799-801, 1990.
- [10] M. A. Baldo, M. E. Thompson y S. R. Forrest, «High-efficiency fluorescent organic light-emitting devices using a phosphorescent sensitizer», Nature, vol. 403, pp. 750-753, 2000.
- [11] K. Dedeian, P. I. Djurovich, F. O. Garces, G. Carlson y R. J. Watts, «A new synthetic route to the preparation of a series of strong photoreducing agents: fac-tris-ortho-metallated complexes of iridium(III) with substituted 2-phenylpyridines», Inorganic Chemistry, vol. 30, nº 8, pp. 1685-1687, 1991.
- [12] J. Liao, P. Rajakanuu, P. Gnanasekaran, S. Tsai, C. Lin, s. Liu, C. H. Chang, G. H. Lee, P. T. Chou, Z. N. Chen y Y. Chi, «Luminescent Diiridium Complexes with Bridging Pyrazolates: Characterization and Fabrication of OLEDs Using Vacuum Thermal Deposition», Advanced Optical Materials, vol. 6, p. 1800083, 2018.
- [13] X. Yang, H. Guo, B. Liu, J. Zhao, G. Zhou, Z. Wu y W. Y. Wong, «Diarylboron-Based Asymmetric Red-Emitting Ir(III) Complex for Solution-Processed Phosphorescent Organic Light-Emitting Diode with External Quantum Efficiency above 28%», Advanced Science, vol. 5, nº 7, p. 1800950, 2018.
- [14] C. Adachi, M. A. Baldo, S. R. Forrest, S. Lamansky, M. E. Thompson y R. C. Kwong, «High-efficiency red electrophosphorescence devices», Applied Physics Letters, vol. 78, nº 11, pp. 1662-1624, 2001.
- [15] A. K. Pal, S. Krotkus, M. Fontani, C. F. Mackenzie, D. F. Cordes, A. Z. Slawin, D. W. Samuel y E. Zysman-Colman, «High-Efficiency Deep-Blue-Emitting Organic Light-Emitting Diodes Based on Iridium(III) Carbene Complexes», Advances Materials, vol. 30, nº 50, p. 1804231, 2018.
- [16] V. Ferraro, C. Bizarri y S. Bräse, «Thermally Activated Delayed Fluorescence (TADF) Materials Based on Earth-Abundant Transition Metal Complexes: Synthesis, Design and Applications», Advanced Science, vol. 11, nº 34, p. 2404866, 2024.
- [17] A. Endo, K. Sato, K. Yoshimura, T. Kai, A. Kawada, H. Miyazaki y C. Adachi, «Efficient up-conversion of triplet excitons into a singlet state and its application for organic light emitting diodes», Applied Physics Letters, vol. 98, nº 8, p. 083302, 2011.
- [18] H. Uoyama, K. Goushi, K. Shizu, H. Nomura y C. Adachi, «Highly efficient organic light-emitting diodes from delayed fluorescence», Nature, vol. 492, pp. 234-238, 2012.
- [19] C. M. Hsieh, T. L. Wu, J. Jayakumar, Y. C. Wang, C. L. Ko, W. Y. Hung, T. C. Lin, H. H. Wu, K. H. Lin, C. H. Lin, S. Hsieh y C. H. Cheng, «Diboron-Based Delayed Fluorescent Emitters with Orange-to-Red Emission and Superior Organic Light-Emitting Diode Efficiency», Applied materials & interfaces, vol. 12, nº 20, pp. 23199-23206, 2020.
- [20] Z. Zhang, E. Crovini , P. L. dos Santos, B. A. Naqvi, D. B. Cordes, A. M. Slawin, P. Sahay, W. Brüttling, I. D. Samuel, S. Bräse y E. Zysman-Colman, «Efficient Sky-Blue Organic Light-Emitting Diodes Using a Highly Horizontally Oriented Thermally Activated Delayed Fluorescence Emitter», Advanced Optical Materials, vol. 8, nº 23, p. 2001354, 2020.
- [21] J. Adachi, H. Kakizoe, P. K. Tsang y A. Endo, «10.1: Invited Paper: Hyperfluorescence™; a Game Changing Technology of OLED Display», Symposium Digest of Technical Papers, vol. 50, nº S1, pp. 95-98, 2019.