

El LED blanco un verdadero hito en la historia de la tecnología de la iluminación

Dr. Ulises Caldiño García
*Departamento de Física,
Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Iztapalapa*

Abstract

When Dr. Nicholas Holonyak developed the first visible light-emitting diode (LED) in 1962, nobody imagined that half century later these very small light devices would replace the Edison's century-old incandescent light bulb. In those years, a LED was only the power indicator light in electronic devices. The LED technology has changed our environment, the way we light it, but what is behind the LED story? Let's discover the origins of the technology that has revolutionized completely the lighting market.

Palabras clave: Diodo emisor de luz (LED), Tecnología de la iluminación, Luz blanca, Luz ecológica.

Keywords: Light-emitting diode (LED), Illumination technology, White light, Ecological light.

Actualmente, la luz blanca puede ser generada mediante **diodos emisores de luz (LEDs)**, por sus siglas en inglés), que a diferencia de los focos incandescentes que generan luz mediante el calentamiento de un filamento metálico al rojo vivo, o de las lámparas fluorescentes que la generan por el choque caótico de electrones para excitar a los átomos en movimiento de un gas, tal que se dispersa buena parte de la energía, el proceso en los **LEDs** es basado en la **electroluminiscencia de un semiconductor**. En pocas palabras, un **LED** es un dispositivo de iluminación de estado sólido, y por lo tanto no se daña fácilmente con golpes externos, a diferencia de las lámparas fluorescentes e incandescentes que son sumamente frágiles.

¿Qué es la electroluminiscencia?

La electroluminiscencia, es un proceso eléctrico-óptico, por el que un material

fosforescente puede emitir luz al aplicarle electricidad. Este proceso lo observó por primera vez, en 1907, el capitán inglés Henry Joseph Round (1881-1966), de los laboratorios Marconi, usando cristales de carburo de silicio y un detector de bigotes de gato (Round, 1907).

¿Qué es un semiconductor?

Un semiconductor es un material sólido compuesto de tres capas. Una **capa n** con excedente de electrones, una **capa p** con excedente de huecos positivos, es decir con déficit de electrones, y una **capa activa** que se encuentra entre las capas p y n, hacia la cual son impulsados los electrones y los huecos positivos cuando se aplica una diferencia de potencial (tensión eléctrica) al semiconductor, ver Figura 1. Cuando los electrones y los huecos se recombinan, se genera emisión de luz, cuya longitud de onda depende del material semiconductor. La emisión de luz es entonces generada por el proceso de electroluminiscencia.

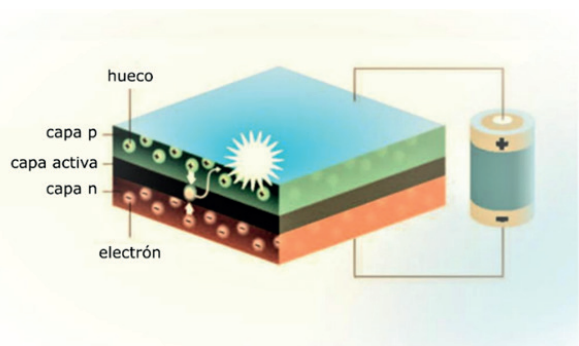


Figura 1. Diagrama esquemático de un LED semiconductor. (Fotografía: © Real Academia de las Ciencias de Suecia).

El primer LED en el visible

Después de más de medio siglo que se observó por primera vez el fenómeno de la electroluminiscencia, el **primer semiconductor con emisión en el infrarrojo** (900 nm) fue presentado por Texas

Instruments Incorporated en 1961. Este **dispositivo** fue desarrollado por el ingeniero electricista, e inventor con 73 patentes, **James Robert Biard** (1931-2022) y el químico Gary Edmund Pittman (1930-2013), usando un semiconductor de **arseniuro de galio (GaAs)**. Actualmente los semiconductores con emisión en el infrarrojo se siguen utilizando como elementos transmisores en circuitos de control remoto, tales como los mandos a distancia. Al año siguiente, en 1962, el estadounidense de origen ruso, el **Dr. Nicholas Holonyak** (1928-), empleado de General Electric, logró obtener el primer **LED visible**, en el rojo, usando **fosfoarseniuro de galio (GaAsP)** como semiconductor y la técnica de emisión estimulada (Holonyak, 1962). La invención de este primer láser semiconductor visible (rojo) está catalogado entre los logros más destacados del siglo XX dado su popularidad en gran infinidad de aparatos y dispositivos electrónicos.

El largo camino para llegar a la invención del LED blanco

Diez años después, en 1972, el ingeniero eléctrico estadounidense **George Crawford** (1938-), empleado del gigante Monsanto y exestudiante de posgrado del **Dr. Holonyak**, inventó el primer **LED amarillo**, mediante la combinación de luz verde y luz roja, usando **fosfuro de arseniuro de galio dopado con Nitrógeno (GaAsP:N)** (Sato, 2002). Con el **LED amarillo** solo faltaba encontrar un semiconductor que produjera luz azul para obtener el blanco. Sin embargo, encontrar el **LED azul** fue un verdadero calvario para la industria y la academia, quienes lo consideraron como una tarea imposible después de 27 años de múltiples intentos con infinidad de materiales semiconductores, entre ellos el **nitruro de galio**. No obstante, la obstinada per-

severancia del ingeniero y físico japonés, **Isamu Akasaki** (1929-2021), durante cerca de 3 décadas de persistente investigación, y al final junto con su estudiante de doctorado **Hiroshi Amano** (1960-), de la Universidad de Nagoya (Japón), lograron obtener el primer **LED azul de alto brillo** en 1989, usando películas semiconductoras de **nitruro de galio dopado con Mg (GaN:Mg)** (Amano, 1989). Posteriormente, en el año de 1993, el estadounidense de origen japonés **Shuji Nakamura** (1954-), un ingeniero investigador que trabajaba para la compañía japonesa Nichia, desarrolló mediante un método más sencillo y mucho menos costoso las películas **GaN** con una vida útil de más de 1000 horas, por lo que se pudo fabricar el **LED azul** a gran escala. Un año después, el ingeniero Nakamura lograría crear un **LED azul**, cien veces más brillante que cualquiera otro fabricado hasta entonces, empleando semiconductores de **nitruro de indio y galio (InGaN)** (Nakamura, 1994). Por fin, en 1996, llegó el **LED blanco**, cuando la empresa Nichia, a petición del ingeniero Nakamura, lo produjo agregando al **LED de InGaN** una capa de fósforo amarillo (**granate de aluminio-ytrio activado con iones de cerio trivalente: $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$, YAG:Ce³⁺**) al **LED azul** (Bando, 1998). Es importante mencionar que al referirnos a un material fósforo no es que contenga el elemento químico fósforo, sino más bien nos referimos a su capacidad de producir luz. En 2005 el ingeniero Nakamura, laborando en ese entonces como profesor de ingeniería en la Universidad de California, Santa Bárbara, recibió una indemnización de alrededor de 8.1 millones de dólares por parte de la compañía Nichia, para la que trabajó hasta 1999, por el desarrollo de los LEDs azules, dado que solamente había percibido un bono de 200 dólares por su

trabajo. Finalmente, los tres investigadores involucrados en la invención del **LED azul de alto brillo**, **Isamu Akasaki**, **Hiroshi Amano** y **Shuji Nakamura**, fueron galardonados en octubre de 2014 con el **premio Nobel de Física** por su invención de un eficiente LED azul, y su repercusión en el gran auge de fuentes de luz blanca brillante. Sin embargo, el Dr. Holonyak calificó esta decisión como *insultante* dado que sus colegas expresaron la creencia de que el Premio Nobel recaería en el Dr. Holonyak por su invención del LED rojo.

Las grandes bondades del LED blanco en la tecnología de la iluminación

El **LED azul** ha permitido el desarrollo de fuentes de luz blanca brillante más sustentables, al no usar mercurio como las lámparas fluorescentes, y reducirse el gasto energético a tal grado que pueden funcionar usando sólo fuentes renovables, como la luz solar, y de esta manera se podría llevar la luz a más de 1,500 millones individuos que carecen de acceso a las redes de suministro eléctrico. Los **LEDs blancos** pueden producir hasta 300 lúmenes por vatio eléctrico, por lo que se han podido utilizar como fuente de iluminación a gran escala. Ellos son mucho más difíciles de fundirse porque casi no se calientan, emitiendo muy poca radiación infrarroja que pudiera dañar objetos o tejidos sensibles. De hecho, su encendido inmediato, en menos de un microsegundo, es porque no requieren de un tiempo de calentamiento como las lámparas fluorescentes. La poca energía perdida desaparece en forma de calor en la base del LED. Por lo tanto, los **LEDs** son hasta más de 3-6 veces más durables, (10-20 años o cincuenta-cien mil horas) que las lámparas fluorescentes de bajo consumo (quince mil horas). Por consiguiente, la tecnología de

la iluminación mediante **LEDs** podría ser una de las soluciones para reducir el gasto energético a nivel mundial, considerando que su emisión de luz se genera consumiendo aproximadamente el 50% de la energía que utiliza, en comparación del 5% de las bombillas incandescentes (90% menos), y del 35% de la mayoría de las lámparas fluorescentes (30% menos). Por lo tanto, la iluminación por **LEDs** es preferida como fuente de luz muy eficiente en el consumo de energía, y además de muy compactos (hasta de 2 mm²), amigables del medio ambiente, que por no ser contaminantes pueden entonces ser completamente reciclados. Además, la reducción en el consumo de energía eléctrica ha representado una notable disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero.

La gran invasión de los LEDs blancos

Actualmente, los **LEDs blancos** se encuentran en todas partes, desde las pantallas de nuestros teléfonos celulares, cuadros de mandos de los automóviles, anuncios publicitarios, computadoras portátiles, tabletas, televisores LCD (conocidos como televisores LED), hasta la iluminación pública, semáforos, faros delanteros de los automóviles, luz de navegación de los aviones e iluminación doméstica. De hecho, la Unión Europea está tratando de liderar la transición a fuentes de luz no contaminante, al dejar de comercializar las bombillas incandescentes desde el año 2012 y las bombillas de halógeno-tungsteno desde septiembre del 2018.

Tres tipos de luz blanca de los LEDs blancos

Es importante notar que hay tres tipos de luz blanca, dependiendo de su **temperatura de color correlacionada (CCT**, por sus siglas en inglés) expresada en kelvin (K). La **CCT** de una fuente de luz

se define comparando su color de emisión con aquel de la luz que emitiría un cuerpo negro calentado a una temperatura determinada. Por lo tanto, la CCT no es realmente una medida de temperatura, dado que solo es una medida relativa. El cuerpo negro a temperatura ambiente (300 K) emite radiación en el infrarrojo, y emitirá radiación en una longitud de onda cada vez más corta conforme aumenta su temperatura, hasta emitir en el visible, en color rojizo, a 1000 K. Si el cuerpo negro continúa aumentando su temperatura, éste irá sumando los colores del espectro en su orden: rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, índigo y violeta. A una temperatura de 5780 K, la temperatura de la fotosfera solar (superficie del sol), el cuerpo negro emitirá en todo el espectro visible, generando luz blanca, y a partir de este momento irá sumando radiación ultravioleta. En la Fig. 2 se puede apreciar la CCT de la luz emitida por un cuerpo negro. Así, en astronomía es posible determinar la temperatura de una estrella. Las estrellas menos calientes tienden a ser rojizas y las más calientes tienden a ser azuladas.G



Figura 2. Temperatura de color correlacionada de la luz emitida por un cuerpo negro.



Figura 3. Luz Blanca Cálida vs Luz Blanca de Día.

De acuerdo a la temperatura de color existen 3 colores principales de luz blanca LED (ver Figura 2):

- **Blanco cálido** (2,200-3,900 K).
- **Blanco neutral o natural** (4,000-5,000 K).
- **Blanco frío o de día** (5000-7000 K).

En la Figura 3 se puede apreciar la diferencia entre la **luz blanca cálida** y la **luz blanca fría o de día**, donde las temperaturas de color de las bombillas LEDs en las lámparas son de **3,000** y **6,500 K**. Es importante mencionar que el tipo de luz blanca puede incidir sobre nuestro estado de ánimo, concentración y rendimiento, de modo que la luz blanca cálida es más recomendable para ambientes relajados y de descanso.

Desarrollos recientes en la tecnología del LED blanco

Tomando como base la invención del **LED blanco** obtenido por el ingeniero **Nakamura**, mediante la combinación de **LED azul** con una capa de fósforo amarillo, recientemente, el **Dr. Ulises Caldiño**

(1960-) et al, de la Universidad Autónoma Metropolitana, lograron obtener emisión de **luz blanca fría** (o de día) de **5250 K** a través de un fósforo vítreo de **fosfato de zinc activado con iones Ce^{3+} y Dy^{3+}** , debido a la combinación de las emisiones azul (482 nm) y amarillo (573 nm) del Dy^{3+} , con excitación del fósforo en 280 nm (Caldíño, 2012). Esta longitud de onda de excitación en el cercano ultravioleta (NUV, por sus siglas en inglés) se puede obtener mediante un **LED (NUV) de nitruro de aluminio y galio (AlGaN)**. También se logró obtener **luz blanca cálida de 2700 K co-dopando con Mn^{2+}** el fosfato de zinc activado con Dy^{3+} y Ce^{3+} , con excitación del fósforo en 280 nm, debido a la emisión adicional roja (610 nm) del Mn^{2+} (Caldíño, 2012). El papel primordial del Ce^{3+} es ser un excelente sensibilizador de la radiación de 280 nm para los iones Dy^{3+} y Mn^{2+} . Figura 4 muestra una fotografía de la luz blanca de día y luz blanca cálida generadas por el fosfato de zinc activado con iones Ce^{3+}/Dy^{3+} y $Ce^{3+}/Dy^{3+}/Mn^{2+}$, respectivamente. Así, una nueva alternativa del **LED blanco** que está adquiriendo cada vez más interés, debido a su mayor flexibilidad y gran potencial de sintonizar

el color de emisión, es mediante el uso de un **fósforo para convertir la luz de un LED (NUV) a luz blanca**. Estos **LEDs blancos convertidos por un fósforo (pc-WLEDs por sus siglas en inglés)** han alcanzado una eficacia luminosa de 265 lm/W, la cual implica alrededor del triple de aquella (70-90 lm/W) de las lámparas fluorescentes (Narukawa, 2010).

Conclusión

Podemos concluir que la **tecnología del LED** ha pasado de ser algo que no parecía tener ninguna aplicación práctica a ser la **opción más eficiente y ecológica para iluminar nuestro entorno**. Está transformando en todo el mundo la industria de la iluminación, y ha dado origen a una diversidad de aplicaciones en otros ámbitos, tal como el de los aparatos electrónicos. Recientemente la Real Academia de Ciencias de Suecia declaró: *Las bombillas incandescentes iluminaron el siglo XX, ahora las lámparas LED iluminarán el siglo XXI*. El dinamismo tecnológico y comercial actual de los **LEDs**, más eficientes, más duraderos y que no generan tanto calor como el que desprendían las bombillas incandescentes, sugiere que la fiesta



Figura 4. Generación de luz blanca de día de 5250 K (izquierda) y cálida de 2700 K (derecha) a través de fósforos vítreos de fosfato de zinc activados con Ce^{3+}/Dy^{3+} , y $Ce^{3+}/Dy^{3+}/Mn^{2+}$, respectivamente, bombeados con radiación NUV de 280 nm (LED de AlGaN).

está lejos de terminar, sino es que recién haya comenzado con uno de los mayores inventos de la historia de la tecnología con más de 50 años de vida.

Referencias

Amano, H.; Kito, M.; Hiramatsu, K. y Akasaki, I., P-Type Conduction in Mg-Doped GaN Treated with Low-Energy Electron Beam Irradiation (LEEBI), *Jpn. J. Appl. Phys.*, 28[12], pp. L2112-L2114, 1989. doi:10.1143/jjap.28.l2112

Bando, K.; Sakano, K.; Noguchi, Y. y Shimizu, Y, Development of High-bright and Pure-white LED Lamps, *J. Light Vis. Environ.*, 22[1], pp. 2-5, 1998. doi.org/10.2150/jlve.22.1_2

Caldiño, U.; Álvarez, E.; Speghini, A. y Bettinelli, M., Cold and warm white light generation using $Zn(PO_3)_2$ glasses activated by Ce^{3+} , Dy^{3+} and Mn^{2+} , *J. Lumin.*, 132, pp. 2077-2081, 2012. doi.org/10.1016/j.jlumin.2012.03.045

Holonyak, N. y Bevacqua, S.F., Coherent (visible) light emission from $Ga(As_{1-x}P_x)$ junctions, *Appl. Phys. Lett.*, 1[4], pp. 82-83, 1962. doi.org/10.1063/1.1753706

Nakamura, S.; Mukai, T. y Senoh, M. (1994), Candela-Class High-Brightness InGaN/AlGaN Double-Heterostructure Blue-Light-Emitting-Diodes, *Appl. Phys. Lett.*, 64[13], pp. 1687-1689, 1994. doi:10.1063/1.111832

Narukawa, Y.; Ichikawa, M.; Sanga, D.; Sano, M. y Mukai, T., White light emitting diodes with super-high luminous efficacy, *J. Phys. D*, 43[35], 354002, 2010. doi:10.1088/0022-3727/43/35/354002

Round, H.J., A note on carborundum, *Electrical World*, 49, p. 309, 1907.

Sato, T. y Imai, M., Characteristics of Nitrogen-Doped GaAsP Light-Emitting Diodes, *Jpn. J. Appl. Phys.* 41[10R], 5995, 2002. doi: 10.1143/JJAP.41.5995