

# Led


Un **diodo emisor de luz** o **led**<sup>6 n 1</sup> (también conocido por la sigla LED, del inglés *light-emitting diode*) es una fuente de luz constituida por un material semiconductor dotado de dos terminales. Se trata de un diodo de unión p-n, que emite luz cuando está activado.<sup>7</sup> Si se aplica una tensión adecuada a los terminales, los electrones se recombinan con los huecos en la región de la unión p-n del dispositivo, liberando energía en forma de fotones. Este efecto se denomina electroluminiscencia, y el color de la luz generada (que depende de la energía de los fotones emitidos) viene determinado por la anchura de la banda prohibida del semiconductor. Los ledes son normalmente pequeños (menos de 1 mm²) y se les asocian algunos componentes ópticos para configurar un patrón de radiación.<sup>8</sup>

Los primeros ledes fueron fabricados como componentes electrónicos para su uso práctico en 1962 y emitían luz infrarroja de baja intensidad. Estos ledes infrarrojos se siguen empleando como elementos transmisores en circuitos de control remoto, como son los mandos a distancia utilizados dentro de una amplia variedad de productos de electrónica de consumo. Los primeros ledes de luz visible también eran de baja intensidad y se limitaban al espectro rojo. Los ledes modernos pueden abarcar longitudes de onda dentro de los espectros visible, ultravioleta e infrarrojo, y alcanzar luminosidades muy elevadas.

Los primeros ledes se emplearon en los equipos electrónicos como lámparas indicadoras en sustitución de las bombillas incandescentes. Pronto se asociaron para las presentaciones numéricas en forma de indicadores alfanuméricos de siete segmentos, al mismo tiempo que se incorporaron en los relojes digitales. Los recientes desarrollos ya permiten emplear los ledes para la iluminación ambiental en sus diferentes aplicaciones. Los ledes han permitido el desarrollo de nuevas pantallas de visualización y sensores, y sus altas velocidades de conmutación permiten utilizarlos también para tecnologías avanzadas de comunicaciones.

Hoy en día, los ledes ofrecen muchas ventajas sobre las fuentes convencionales de luces incandescentes o fluorescentes, destacando un menor consumo de energía, una vida útil más larga, una robustez física mejorada, un tamaño más pequeño así como la posibilidad de fabricarlos en muy diversos colores del espectro visible de manera mucho más definida y controlada; en el caso de ledes multicolores, con una frecuencia de conmutación rápida.


Led  
(diodo emisor de luz)



Ledes azul, verde y rojo en un encapsulamiento de difusión de 5 mm

Tipo	Semiconductor
Principio de funcionamiento	Electroluminiscencia
Inventión	H. J. Round (1907) <sup>1</sup> Oleg Losev (1927) <sup>2</sup> James R. Biard (1961) <sup>3</sup> Nick Holonyak (1962) <sup>4</sup> Shuji Nakamura (1994) <sup>5</sup>
Primera producción	octubre de 1962

Símbolo electrónico



Terminales

Ánodo y Cátodo

Estos diodos se utilizan ahora en aplicaciones tan variadas que abarcan todas las áreas tecnológicas actuales, desde la Bioingeniería, la Medicina y la Sanidad,<sup>9</sup> pasando por la nanotecnología y la computación cuántica,<sup>10</sup> los dispositivos electrónicos o la iluminación en la ingeniería de Minas; entre los más populares están la retroiluminación de pantallas de TV y ordenador, así como de dispositivos móviles<sup>11 12</sup> la luz de navegación de los aviones, los faros delanteros de los vehículos, los anuncios publicitarios, la iluminación en general, los semáforos, las lámparas de destellos y los papeles luminosos de pared. Desde el comienzo de 2017, las lámparas led para la iluminación de las viviendas son tan baratas o más que las lámparas fluorescentes compacta de comportamiento similar al de los ledes.<sup>13</sup> También son más eficientes energéticamente y, posiblemente, su eliminación como desecho provoque menos problemas ambientales.<sup>14 15</sup>

## Índice

### Historia

Descubrimiento y primeros dispositivos

Desarrollo comercial inicial

Led azul

Led blanco y evolución

### Principio de funcionamiento

#### Tecnología

Fundamento físico

Índice de refracción

Revestimientos de transición

La eficiencia y los parámetros operacionales

Pérdida de eficiencia

Posibles soluciones

Vida media y análisis de fallos

### Colores y materiales

Azul y ultravioleta

RGB

Sistemas RGB

Ledes basados en fósforo

Otros ledes blancos

Ledes orgánicos (OLED)

Ledes de puntos cuánticos

### Tipos

Miniatura

Alta Potencia

Accionados por corriente alterna

Aplicaciones. Variantes

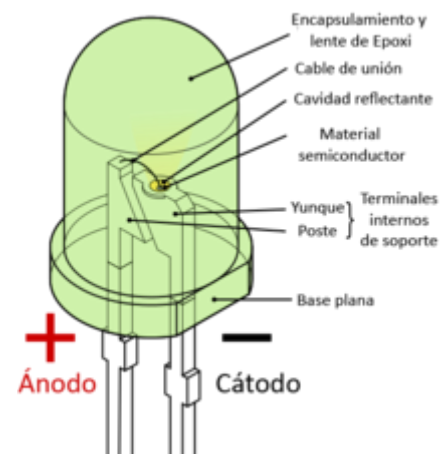
De destellos intermitentes

Bicolores

Tricolores

RGB

Multicolores decorativos



Partes de un led convencional. Las superficies planas del yunque y del poste dentro del encapsulamiento de epoxi actúan como anclajes para evitar que los conductores se desplacen por un esfuerzo mecánico o por vibraciones.

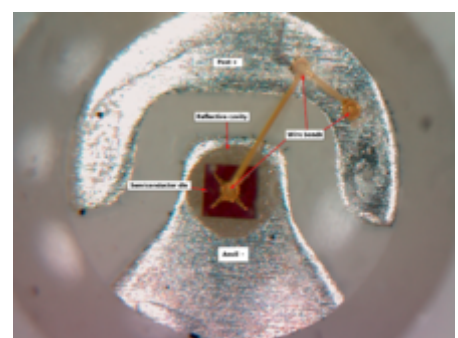


Imagen ampliada de un led de montaje en superficie

Alfanuméricos

RGB Digitales

Filamentos

### **Consideraciones de uso**

Fuentes de alimentación

Polaridad eléctrica

Salud y seguridad

Ventajas

Inconvenientes

### **Aplicaciones**

Indicadores y lámparas de señales

Iluminación

Comunicaciones ópticas. Transferencia de datos y otras comunicaciones

Iluminación sostenible

Consumo de energía

Fuentes de luz para sistemas de visión artificial

Medicina y biología

Diagnóstico y visión

Terapia

Industria

Otras aplicaciones

### **Notas**

### **Véase también**

### **Referencias**

### **Enlaces externos**

## **Historia**

---

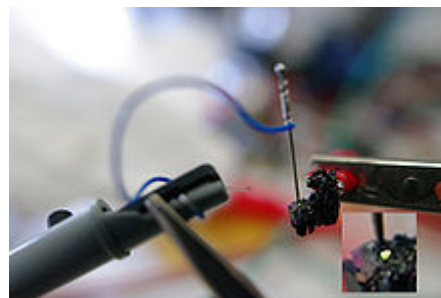
### **Descubrimiento y primeros dispositivos**

El fenómeno de la electroluminiscencia fue descubierto en 1907 por el experimentador británico Henry Joseph Round, de los laboratorios Marconi, usando un cristal de carburo de silicio y un detector de bigotes de gato.<sup>16 17</sup> El inventor soviético Oleg Lósev informó de la construcción del primer led en 1927. Su investigación apareció en revistas científicas soviéticas, alemanas y británicas, pero el descubrimiento no se llevó a la práctica hasta varias décadas más tarde. Kurt Lehovec, Carl Accardo y Edward Jamgochian interpretaron el mecanismo de estos primeros diodos led en 1951, utilizando un aparato que empleaba cristales de carburo de silicio, con un generador de impulsos y con una fuente de alimentación de corriente, y en 1953 con una variante pura del cristal.

Rubin Braunstein, de la RCA, informó en 1955 sobre la emisión infrarroja del arseniuro de galio (GaAs) y de otras aleaciones de semiconductores. Braunstein observó que esta emisión se generaba en diodos contruidos a partir de aleaciones de antimoniuro de galio (GaSb), arseniuro de galio (GaAs), fosfuro de indio (InP) y silicio-germanio (SiGe) a temperatura ambiente y a 77 kelvin.

En 1957, Braunstein también demostró que estos dispositivos rudimentarios podían utilizarse para establecer una comunicación no radiofónica a corta distancia. Como señala Kroemer, Braunstein estableció una línea de comunicaciones ópticas muy simple:<sup>18</sup> tomó la música procedente de un tocadiscos y la procesó mediante la adecuada electrónica para modular la corriente directa producida por un diodo de GaAs Arseniuro de Galio. La luz emitida por el diodo de GaAs fue capaz de sensibilizar un diodo de PbS Sulfuro de Plomo situado a una cierta distancia. La señal así generada por el diodo de PbS fue introducida en un amplificador de audio y se transmitió por un altavoz. Cuando se interceptaba el rayo luminoso entre los dos ledes, cesaba la música. Este montaje ya presagiaba el empleo de los ledes para las comunicaciones ópticas.

En septiembre de 1961, James R. Biard y Gary Pittman, que trabajaban en Texas Instruments (TI) de Dallas (Texas), descubrieron una radiación infrarroja (de 900 nm) procedente de un diodo túnel que habían construido empleando un sustrato de arseniuro de galio (GaAs).<sup>19</sup> En octubre de 1961 demostraron la existencia de emisiones de luz eficientes y el acoplamiento de las señales entre la unión p-n de arseniuro de galio emisora de luz y un fotodetector aislado eléctricamente y construido con un material semiconductor.<sup>20</sup> Con base en sus descubrimientos, el 8 de agosto de 1962 Biard y Pittman produjeron una patente de título “Semiconductor Radiant Diode” (Diodo radiante semiconductor)<sup>21</sup> que describía cómo una aleación de zinc difundida durante el crecimiento del cristal que forma el sustrato de una unión p-n led con un contacto del cátodo lo suficientemente separado, permitía la emisión de luz infrarroja de manera eficiente en polarización directa.



La electroluminiscencia verde de un punto de contacto en un cristal de SiC reproduce el experimento original que realizó Round en 1907.

A la vista de la importancia de sus investigaciones, tal como figuraban en sus cuadernos de notas de ingeniería y antes incluso de comunicar sus resultados procedentes de los laboratorios de General Electric, Radio Corporation of America, IBM, Laboratorios Bell o las del Laboratorio Lincoln del Instituto Tecnológico de Massachusetts, la Oficina de Patentes y Marcas de Estados Unidos les concedió una patente por la invención de los diodos emisores de luz infrarroja de arseniuro de galio (patente US3293513A de los EE. UU.),<sup>22</sup> que son considerados como los primeros ledes de uso práctico. Inmediatamente después de la presentación de la patente, la TI inició un proyecto para la fabricación de los diodos infrarrojos. En octubre de 1962, Texas Instruments desarrolló el primer led comercial (el SNX-100), que empleaba un cristal puro de arseniuro de galio para la emisión de luz de 890 nm. En octubre de 1963, TI sacó al mercado el primer led semiesférico comercial, el SNX-110.<sup>23</sup>

El primer led con emisión en el espectro visible (rojo) fue desarrollado en 1962 por Nick Holonyak Jr cuando trabajaba en la General Electric. Holonyak presentó un informe en la revista Applied Physics Letters el 1 de diciembre de 1962.<sup>24</sup> En 1972 M. George Craford,<sup>25</sup> un estudiante de grado de Holonyak, inventó el primer led amarillo y mejoró la luminosidad de los ledes rojo y rojo-naranja en un factor de diez. En 1976, T. P. Pearsall construyó los primeros ledes de alto brillo y alta eficiencia para las telecomunicaciones a través de fibras ópticas. Para ello descubrió nuevos materiales semiconductores expresamente adaptados a las longitudes de onda propias de la citada transmisión por fibras ópticas.<sup>26</sup>

## Desarrollo comercial inicial

Los primeros ledes comerciales fueron generalmente usados para sustituir a las lámparas incandescentes y las lámparas indicadoras de neón así como en los visualizadores de siete segmentos.<sup>27</sup> Primero en equipos costosos tales como equipos electrónicos y de ensayo de laboratorio, y más tarde en otros dispositivos eléctricos como televisores, radios, teléfonos, calculadoras, así como relojes de pulsera. Hasta 1968, los

ledes visibles e infrarrojos eran extremadamente costosos, del orden de 200 dólares por unidad, por lo que tuvieron poca utilidad práctica.<sup>28</sup> La empresa Monsanto Company fue la primera que produjo de manera masiva ledes visibles, utilizando fosfuro de arseniuro de galio (GaAsP) en 1968 para producir ledes rojos destinados a los indicadores.<sup>28</sup>

Hewlett-Packard (HP) introdujo los ledes en 1968, inicialmente utilizando GaAsP suministrado por Monsanto. Estos ledes rojos eran lo suficientemente brillantes como para ser utilizados como indicadores, puesto que la luz emitida no era suficiente para iluminar una zona. Las lecturas en las calculadoras eran tan débiles que sobre cada dígito se depositaron lentes de plástico para que resultaran legibles. Más tarde, aparecieron otros colores que se usaron ampliamente en aparatos y equipos. En la década de los 70 Fairchild Optoelectronics fabricó con éxito comercial dispositivos led a menos de cinco centavos cada uno. Estos dispositivos emplearon chips de semiconductores compuestos fabricados mediante el proceso planar inventado por Jean Hoerni de Fairchild Semiconductor.<sup>29 30</sup> El procesado planar para la fabricación de chips combinado con los métodos innovadores de encapsulamiento permitió al equipo dirigido por el pionero en optoelectrónica, Thomas Brandt, lograr las reducciones de coste necesarias en Fairchild.<sup>31</sup> Estos métodos siguen siendo utilizados por los fabricantes de los ledes.<sup>32</sup>

La mayoría de los ledes se fabricaron en los encapsulamientos típicos T1¾ de 5 mm y T1 de 3 mm, pero con el aumento de la potencia de salida, se ha vuelto cada vez más necesario eliminar el exceso de calor para mantener la fiabilidad.<sup>33</sup> Por tanto ha sido necesario diseñar encapsulamientos más complejos ideados para conseguir una eficiente disipación de calor. Los encapsulamientos empleados actualmente para los ledes de alta potencia tienen poca semejanza con los de los primeros ledes.



Pantalla led de una calculadora científica TI-30 (aprox. 1978) que utiliza lentes de plástico para aumentar el tamaño visible de los dígitos

## Led azul

Los ledes azules fueron desarrollados por primera vez por Henry Paul Maruska de RCA en 1972 utilizando nitruro de Galio (GaN) sobre un sustrato de zafiro.<sup>34 35</sup> Se empezaron a comercializar los de tipo SiC (fabricados con carburo de silicio) por la casa Cree, Inc., Estados Unidos en 1989.<sup>36</sup> Sin embargo, ninguno de estos ledes azules era muy brillante.

El primer led azul de alto brillo fue presentado por Shuji Nakamura de la Nichia Corp. en 1994 partiendo del material Nitruro de Galio-Indio (InGaN).<sup>37 38</sup> Isamu Akasaki y Hiroshi Amano en Nagoya trabajaban en paralelo, en la nucleación cristalina del Nitruro de Galio sobre sustratos de zafiro, obteniendo así el dopaje tipo-p con dicho material. Como consecuencia de sus investigaciones, Nakamura, Akasaki y Amano fueron galardonados con el Premio Nobel de Física.<sup>39 40</sup> En 1995, Alberto Barbieri del laboratorio de la Universidad de Cardiff (RU) investigaba la eficiencia y fiabilidad de los ledes de alto brillo y como consecuencia de la investigación obtuvo un led con el electrodo de contacto transparente utilizando óxido de indio y estaño (ITO) sobre fosfuro de aluminio-galio-indio y arseniuro de galio.

En 2001<sup>41</sup> y 2002<sup>42</sup> se llevaron a cabo procesos para hacer crecer ledes de nitruro de galio en silicio. Como consecuencia de estas investigaciones, en enero de 2012 Osram lanzó al mercado ledes de alta potencia de nitruro de galio-indio crecidos sobre sustrato de silicio.<sup>43</sup>

## Led blanco y evolución

El logro de una alta eficiencia en los ledes azules fue rápidamente seguido por el desarrollo del primer led blanco. En tal dispositivo un “fósforo” (material fluorescente) de recubrimiento  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$  (conocido como YAG o granate de itrio y aluminio) absorbe algo de la emisión azul y genera luz amarilla por fluorescencia. De forma similar es posible introducir otros “fósforos” que generen luz verde o roja por fluorescencia. La mezcla resultante de rojo, verde y azul se percibe por el ojo humano como blanco; por otro lado, no sería posible apreciar los objetos de color rojo o verde iluminándolos con el fósforo YAG puesto que genera solo luz amarilla junto con un remanente de luz azul.

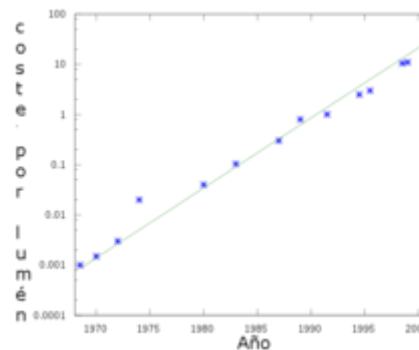


Ilustración de la Ley de Haitz donde se muestra la mejoría de la  $\text{a}$  lo largo del tiempo, empleando para ello una escala logarítmica en el eje vertical.

Los primeros ledes blancos eran caros e ineficientes. Sin embargo, la intensidad de la luz producida por los ledes se ha incrementado exponencialmente, con un tiempo de duplicación que ocurre aproximadamente cada 36 meses desde la década de los 1960 (de acuerdo con la ley de Moore). Esta tendencia se atribuye generalmente a un desarrollo paralelo de otras tecnologías de semiconductores y a los avances de la óptica y de la ciencia de los materiales, y se ha convenido en llamar la ley de Haitz en honor a Roland Haitz.<sup>44</sup>

La emisión luminosa y la eficiencia de los ledes azul y ultravioleta cercano aumentaron a la vez que bajó el coste de los dispositivos de iluminación con ellos fabricados, lo que condujo a la utilización de los ledes de luz blanca para iluminación. El hecho es que están sustituyendo a la iluminación incandescente y la fluorescente.<sup>45 46</sup>

Los ledes blancos pueden producir 300 lúmenes por vatio eléctrico a la vez que pueden durar hasta 100 000 horas. Comparado con las bombillas de incandescencia esto supone no solo un incremento enorme de la eficiencia eléctrica sino también un gasto similar o más bajo por cada bombilla.<sup>47</sup>

## Principio de funcionamiento

Una unión P-N puede proporcionar una corriente eléctrica al ser iluminada. Análogamente una unión P-N recorrida por una corriente directa puede emitir fotones luminosos. Son dos formas de considerar el fenómeno de la electroluminiscencia. En el segundo caso esta podría definirse como la emisión de luz por un semiconductor cuando está sometido a un campo eléctrico. Los portadores de carga se recombinan en una unión P-N dispuesta en polarización directa. En concreto, los electrones de la región N cruzan la barrera de potencial y se recombinan con los huecos de la región P. Los electrones libres se encuentran en la banda de conducción mientras que los huecos están en la banda de valencia. De esta forma, el nivel de energía de los huecos es inferior al de los electrones. Al recombinarse los electrones y los huecos una fracción de la energía se emite en forma de calor y otra fracción en forma de luz.

El fenómeno físico que tiene lugar en una unión PN al paso de la corriente en polarización directa, por tanto, consiste en una sucesión de recombinaciones electrón-hueco. El fenómeno de la recombinación viene acompañado de la emisión de energía. En los diodos ordinarios de Germanio o de Silicio se producen fonones o vibraciones de la estructura cristalina del semiconductor que contribuyen, simplemente, a su calentamiento. En el caso de los diodos led, los materiales semiconductores son diferentes de los anteriores tratándose, por ejemplo, de aleaciones varias del tipo III-V como son el arseniuro de galio (AsGa), el fosfuro de galio (PGa) o el fosfoarseniuro de galio (PAsGa).



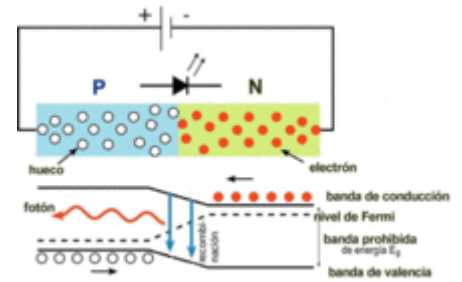
En estos semiconductores, las recombinaciones que se desarrollan en las uniones PN eliminan el exceso de energía emitiendo fotones luminosos. El color de la luz emitida depende directamente de su longitud de onda y es característico de cada aleación concreta. En la actualidad se fabrican aleaciones que producen fotones luminosos con longitudes de onda en un amplio rango del espectro electromagnético dentro del visible, infrarrojo cercano y ultravioleta cercano. Lo que se consigue con estos materiales es modificar la anchura en energías de la banda prohibida, modificando así la longitud de onda del fotón emitido. Si el diodo led se polariza inversamente no se producirá el fenómeno de la recombinación por lo que no emitirá luz. La polarización inversa puede llegar a dañar al diodo.

El comportamiento eléctrico del diodo led en polarización directa es como sigue. Si se va incrementando la tensión de polarización, a partir de un cierto valor (que depende del tipo de material semiconductor), el led comienza a emitir fotones, se ha alcanzado la tensión de encendido. Los electrones se pueden desplazar a través de la unión al aplicar a los electrodos diferentes tensiones; se inicia así la emisión de fotones y conforme se va incrementando la tensión de polarización, aumenta la intensidad de luz emitida. Este aumento de intensidad luminosa viene emparejado al aumento de la intensidad de la corriente y puede verse disminuida por la recombinación Auger. Durante el proceso de recombinación, el electrón salta de la banda de conducción a la de valencia emitiendo un fotón y accediendo, por conservación de la energía y momento, a un nivel más bajo de energía, por debajo del nivel de Fermi del material. El proceso de emisión se llama recombinación radiativa, que corresponde al fenómeno de la emisión espontánea. Así, en cada recombinación radiativa electrón-hueco se emite un fotón de energía igual a la anchura en energías de la banda prohibida:

$$E_g = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

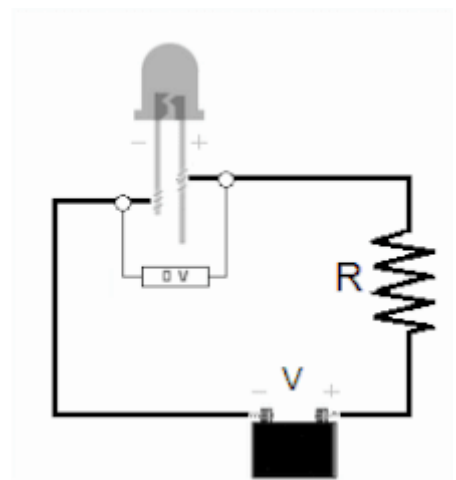
siendo  $c$  la velocidad de la luz y  $f$  y  $\lambda$  la frecuencia y la longitud de onda, respectivamente, de la luz que emite. Esta descripción del fundamento de la emisión de radiación electromagnética por el diodo led se puede apreciar en la figura donde se hace una representación esquemática de la unión PN del material semiconductor junto con el diagrama de energías, implicado en el proceso de recombinación y emisión de luz, en la parte baja del dibujo. La longitud de onda de la luz emitida, y por lo tanto su color, depende de la anchura de la banda prohibida de energía. Los substratos más importantes disponibles para su aplicación en emisión de luz son el GaAs y el InP. Los diodos led pueden disminuir su eficiencia si sus picos de absorción y emisión espectral en función de su longitud de onda están muy próximos, como ocurre con los ledes de GaAs:Zn (arseniuro de galio dopado con zinc) ya que parte de la luz que emiten la absorben internamente.

Los materiales utilizados para los ledes tienen una banda prohibida en polarización directa cuya anchura en energías varía desde la luz infrarroja, al visible o incluso al ultravioleta próximo. La evolución de los ledes comenzó con dispositivos infrarrojos y rojos de arseniuro de galio. Los avances de la ciencia de materiales han permitido fabricar dispositivos con longitudes de onda cada vez más cortas, emitiendo luz en una



Diodo LED - Diagrama de energía

Polarización directa de la unión P-N en un diodo led. Producción de fotones como consecuencia de la recombinación entre electrones y huecos (parte superior). El fenómeno de la recombinación observado en un diagrama de bandas de energía (parte inferior).



Esquema del circuito led alimentado con tensión continua incrementada gradualmente hasta que el led comienza a lucir.

amplia gama de colores. Los ledes se fabrican generalmente sobre un sustrato de tipo N, con un electrodo conectado a la capa de tipo P depositada en su superficie. Los sustratos de tipo P, aunque son menos comunes, también se fabrican.

## Tecnología

---

### Fundamento físico

Un led comienza a emitir cuando se le aplica una tensión de 2-3 voltios. En polarización inversa se utiliza un eje vertical diferente al de la polarización directa para mostrar que la corriente absorbida es prácticamente constante con la tensión hasta que se produce la ruptura.

El led es un diodo formado por un chip semiconductor dopado con impurezas que crean una unión PN. Como en otros diodos, la corriente fluye fácilmente del lado p, o ánodo, al n, o cátodo, pero no en el sentido opuesto. Los portadores de carga (electrones y huecos) fluyen a la unión desde dos electrodos puestos a distintos voltajes. Cuando un electrón se recombina con un hueco, desciende su nivel de energía y el exceso de energía se desprende en forma de un fotón. La longitud de onda de la luz emitida, y por tanto el color del led, depende de la anchura en energía de la banda prohibida correspondiente a los materiales que constituyen la unión pn.

En los diodos de silicio o de germanio los electrones y los huecos se recombinan generando una transición no radiativa, la cual no produce ninguna emisión luminosa ya que son materiales semiconductores con una banda prohibida indirecta. Los materiales empleados en los ledes presentan una banda prohibida directa con una anchura en energía que corresponde al espectro luminoso del infrarrojo-cercano (800 nm - 2500 nm), el visible y el ultravioleta-cercano (200-400 nm). El desarrollo de los ledes dio comienzo con dispositivos de luz roja e infrarroja, fabricados con arseniuro de galio (GaAs). Los avances en la ciencia de materiales han permitido construir dispositivos con longitudes de onda cada vez más pequeñas, emitiendo luz dentro de una amplia gama de colores.

Los ledes se suelen fabricar a partir de un sustrato de tipo n, con uno de los electrodos unido a la capa de tipo p depositada sobre su superficie. Los sustratos de tipo p también se utilizan, aunque son menos comunes. Muchos ledes comerciales, en especial los de GaN/InGaN, utilizan también el zafiro (óxido de aluminio) como sustrato.

La mayoría de los materiales semiconductores usados en la fabricación de los ledes presentan un índice de refracción muy alto. Esto implica que la mayoría de la luz emitida en el interior del semiconductor se refleja al llegar a la superficie exterior que se encuentra en contacto con el aire por un fenómeno de reflexión total interna. La extracción de la luz constituye, por tanto, un aspecto muy importante y en constante investigación y desarrollo a tomar en consideración en la producción de ledes.

### Índice de refracción

La mayoría de los materiales semiconductores usados en la fabricación de los ledes presentan un índice de refracción muy elevado con respecto al aire. Esto implica que la mayoría de la luz emitida en el interior del semiconductor se va a reflejar al llegar a la superficie exterior que se encuentra en contacto con el aire por un fenómeno de reflexión total interna.

Este fenómeno afecta tanto a la eficiencia en la emisión luminosa de los ledes como a la eficiencia en la absorción de la luz de las células fotovoltaicas. El índice de refracción del silicio es 3.96 (a 590 nm),<sup>48</sup> mientras que el del aire es 1,0002926.<sup>48</sup> La extracción de la luz constituye, por tanto, un aspecto muy



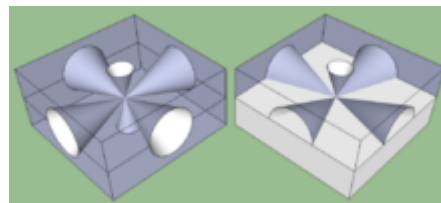
importante y en constante investigación y desarrollo a tomar en consideración en la producción de ledes.

En general, un chip semiconductor led de superficie plana sin revestir emitirá luz solamente en la dirección perpendicular a la superficie del semiconductor y en unas direcciones muy próximas, formando un cono llamado cono de luz<sup>49</sup> o cono de escape.<sup>50</sup> El máximo ángulo de incidencia que permite escapar a los fotones del semiconductor se conoce como ángulo crítico. Cuando se sobrepasa este ángulo, los fotones ya no se escapan del semiconductor pero en cambio son reflejados dentro del cristal del semiconductor como si existiese un espejo en la superficie exterior.<sup>50</sup>

Debido a la reflexión interna, la luz que ha sido reflejada internamente en una cara puede escaparse a través de otras caras cristalinas si el ángulo de incidencia llega a ser ahora suficientemente bajo y el cristal es suficientemente transparente para no reflejar nuevamente la emisión de fotones hacia el interior. Sin embargo, en un simple led cúbico con superficies externas a 90 grados, todas las caras actúan como espejos angulares iguales. En este caso, la mayor parte de la luz no puede escapar y se pierde en forma de calor dentro del cristal semiconductor.<sup>50</sup>

Un chip que presente en su superficie facetas anguladas similares a las de una joya tallada o a una lente fresnel puede aumentar la salida de la luz al permitir su emisión en las orientaciones que sean perpendiculares a las facetas exteriores del chip, normalmente más numerosas que las seis únicas de una muestra cúbica.<sup>51</sup>

La forma ideal de un semiconductor para obtener la máxima salida de luz sería la de una microesfera con la emisión de los fotones situada exactamente en el centro de la misma, y dotada de electrodos que penetraran hasta el centro para conectar con el punto de emisión. Todos los rayos de luz que partieran del centro serían perpendiculares a la superficie de la esfera, lo que daría lugar a que no hubiera reflexiones internas. Un semiconductor semiesférico también funcionaría correctamente puesto que la parte plana actuaría como un espejo para reflejar los fotones de forma que toda la luz se podría emitir completamente a través de la semiesfera.<sup>52</sup>



Ejemplo idealizado de los conos de luz producidos en una pieza de material semiconductor para una emisión procedente de un solo punto. La luz emitida por fuera de estos conos no puede salir fuera de la pieza. La ilustración de la izquierda representa una pieza formada por dos capas completamente traslúcidas mientras que la de la derecha muestra los "medios conos" formados cuando la capa superior es traslúcida y la capa del fondo es completamente opaca. Realmente, la luz se emite de igual forma en todas las direcciones del espacio desde la fuente, por lo que los espacios existentes entre los conos muestran que gran parte de la energía luminosa emitida por la fuente es atrapada dentro de la muestra y se pierde en forma de calor.

## Revestimientos de transición

Después de construir una oblea de material semiconductor, se corta en pequeños fragmentos. Cada fragmento se denomina chip y pasa a constituir la pequeña parte activa de un diodo led emisor de luz.

Muchos chips semiconductores led se encapsulan o se incorporan en el interior en carcasas de plástico moldeado. La carcasa de plástico pretende conseguir tres propósitos:

1. Facilitar el montaje del chip semiconductor en los dispositivos de iluminación.
2. Proteger de daños físicos al frágil cableado eléctrico asociado al diodo.
3. Actuar de elemento intermediario a efecto de la refracción entre el elevado índice del semiconductor y el del aire.

La tercera característica contribuye a aumentar la emisión de luz desde el semiconductor actuando como una lente difusora, permitiendo que la luz sea emitida al exterior con un ángulo de incidencia sobre la pared exterior mucho mayor que la del estrecho cono de luz procedente del chip sin recubrir.

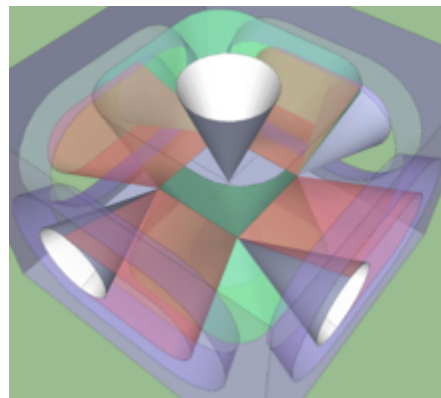
## La eficiencia y los parámetros operacionales

Los ledes están diseñados para funcionar con una potencia eléctrica no superior a 30-60 milivatios (mW). En torno a 1999, Philips Lumileds introdujo ledes más potentes capaces de trabajar de forma continua a una potencia de un vatio. Estos ledes utilizaban semiconductores de troquelados mucho más grandes con el fin de aceptar potencias de alimentación mayores. Además, se montaban sobre varillas de metal para facilitar la eliminación de calor.

Una de las principales ventajas de las fuentes de iluminación a base de ledes es la alta eficiencia luminosa. Los ledes blancos igualaron enseguida e incluso superaron la eficiencia de los sistemas de iluminación incandescentes estándar. En 2002, Lumileds fabricó ledes de cinco vatios, con una eficiencia luminosa de 18-22 lúmenes por vatio (lm/W). A modo de comparación, una bombilla incandescente convencional de 60-100 vatios emite alrededor de 15 lm/W, y las lámparas fluorescentes estándar emiten hasta 100 lm/W.

A partir de 2012, Future Lighting Solutions había alcanzado las siguientes eficiencias para algunos colores.<sup>53</sup> Los valores de la eficiencia muestran la potencia luminosa de salida por cada vatio de potencia eléctrica de entrada. Los valores de la eficiencia luminosa incluyen las características del ojo humano y se han deducido a partir de la función de luminosidad.

	Color	Longitud de onda (nm)	Coefficiente de eficiencia	Eficiencia Luminosa $\eta$ (Lm/W)
	<u>Rojo</u>	$620 < \lambda < 645$	0.39	72
	<u>Rojo anaranjado</u>	$610 < \lambda < 620$	0.29	98
	<u>Verde</u>	$520 < \lambda < 550$	0.15	93
	<u>Cian</u>	$490 < \lambda < 520$	0.26	75
	<u>Azul</u>	$460 < \lambda < 490$	0.35	37



La mayoría de los materiales empleados en la producción de los led presentan índices de refracción muy elevados. Esto significa que mucha de la luz emitida es reflejada hacia el interior en la superficie externa del material en contacto con el aire. Por lo tanto, el aspecto de la extracción de la luz de los ledes es motivo de una gran dedicación en cuanto a investigación y desarrollo. Los conos de emisión de luz para las muestras reales de ledes son bastante más complejos que los producidos a partir de una sola fuente puntual. La zona de emisión de la luz es normalmente un plano bidimensional definido entre las dos capas de semiconductor. Cada átomo situado en este plano presenta un conjunto de conos de emisión análogos a los de la figura anterior. La figura es un esquema simplificado que muestra el efecto combinado de algunos conos de emisión. Los grandes conos laterales han sido cortados para mostrar las características del interior y reducir la complejidad de la imagen; en realidad, estos conos se deberían extender hasta los bordes opuestos dentro del plano bidimensional de emisión.

En septiembre de 2003, Cree Inc. fabricó un nuevo tipo de led azul que consumía 24 milivatios (mW) a 20 miliamperios (mA). Esto permitió un nuevo encapsulamiento de luz blanca que producía 65 lm/W a 20 miliamperios, convirtiéndose en el led blanco más brillante disponible en el mercado; además resultaba ser

más de cuatro veces más eficiente que las bombillas incandescentes estándar. En 2006 presentaron un prototipo de led blanco con una eficiencia luminosa récord de 131 lm/W para una corriente de 20 miliamperios. Nichia Corporation ha desarrollado un led blanco con una eficiencia luminosa de 150 lm/W y una corriente directa de 20 mA.<sup>54</sup> Los ledes de la empresa Cree Inc. denominados xlamp xm-L, salieron al mercado en 2011, produciendo 100 lm/W a la potencia máxima de 10 W, y hasta 160 lm/W con una potencia eléctrica de entrada de unos 2 W. En 2012, Cree Inc. presentó un led blanco capaz de producir 254 lm/W,<sup>55</sup> y 303 lm/W en marzo de 2014.<sup>56</sup> Las necesidades de iluminación general en la práctica requieren ledes de alta potencia, de un vatio o más. Funcionan con corrientes superiores a 350 miliamperios.

Estas eficiencias se refieren a la luz emitida por el diodo mantenido a baja temperatura en el laboratorio. Dado que los ledes, una vez instalados, operan a altas temperaturas y con pérdidas de conducción, la eficiencia en realidad es mucho menor. El Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) ha realizado pruebas para sustituir las lámparas incandescentes o los LFC por las lámparas led, mostrando que la eficiencia media conseguida es de unos 46 lm/W en 2009 (el comportamiento durante las pruebas se mantuvo en un margen de 17 lm/W a 79 lm/W).<sup>57</sup>

## **Pérdida de eficiencia**

Cuando la corriente eléctrica suministrada a un led sobrepasa unas decenas de miliamperios, disminuye la eficiencia luminosa a causa de un efecto denominado pérdida de eficiencia.

Al principio, se buscó una explicación atribuyéndolo a las altas temperaturas. Sin embargo, los científicos pudieron demostrar lo contrario, que si bien la vida del led puede acortarse, la caída de la eficiencia es menos severa a temperaturas elevadas.<sup>58</sup> En 2007, la causa del descenso en la eficiencia se atribuyó a la recombinación Auger la cual da origen a una reacción mixta.<sup>59</sup> Finalmente, un estudio de 2013 confirmó definitivamente esta teoría para justificar la pérdida de eficiencia.<sup>60</sup>

Además de disminuir la eficiencia, los ledes que trabajan con corrientes eléctricas más altas generan más calor lo que compromete el tiempo de vida del led. A causa de este incremento de calor a corrientes altas, los ledes de alta luminosidad presentan un valor patrón industrial de tan solo 350 mA, corriente para la que existe un equilibrio entre luminosidad, eficiencia y durabilidad.<sup>59 61 62 63</sup>

## **Posibles soluciones**

Ante la necesidad de aumentar la luminosidad de los ledes, esta no se consigue a base de incrementar los niveles de corriente sino mediante el empleo de varios ledes en una sola lámpara. Por ello, resolver el problema de la pérdida de eficiencia de las lámparas led domésticas consiste en el empleo del menor número posible de ledes en cada lámpara, lo que contribuye a reducir significativamente los costes.

Miembros del Laboratorio de Investigación Naval de los Estados Unidos han encontrado una forma de disminuir la caída de la eficiencia. Descubrieron que dicha caída proviene de la recombinación Auger no radiativa producida con los portadores inyectados. Para resolverlo, crearon unos pozos cuánticos con un potencial de confinamiento suave para disminuir los procesos Auger no radiativos.<sup>64</sup>

Investigadores de la Universidad Central Nacional de Taiwán y de Epistar Corp están desarrollando un método para disminuir la pérdida de eficiencia mediante el uso de sustratos de cerámica de nitruro de aluminio, que presentan una conductividad térmica más alta que la del zafiro usado comercialmente. Los efectos de calentamiento se ven reducidos debido a la elevada conductividad térmica de los nuevos sustratos.<sup>65</sup>

## Vida media y análisis de fallos

Los dispositivos de estado sólido tales como los ledes presentan una obsolescencia muy limitada si se opera a bajas corrientes y a bajas temperaturas. Los tiempos de vida son de 25 000 a 100 000 horas, pero la influencia del calor y de la corriente pueden aumentar o disminuir este tiempo de manera significativa.<sup>66</sup>

El fallo más común de los ledes (y de los diodos láser) es la reducción gradual de la emisión de luz y la pérdida de eficiencia. Los primeros ledes rojos destacaron por su corta vida. Con el desarrollo de los ledes de alta potencia, los dispositivos están sometidos a temperaturas de unión más altas y densidades de corriente más elevadas que los dispositivos tradicionales. Esto provoca estrés en el material y puede causar una degradación temprana de la emisión de luz. Para clasificar cuantitativamente la vida útil de una manera estandarizada, se ha sugerido utilizar los parámetros L70 o L50, que representan los tiempos de vida (expresados en miles de horas) en los que un led determinado alcanza el 70 % y el 50 % de la emisión de luz inicial, respectivamente.<sup>67</sup>

Así como en la mayoría de las fuentes de luz anteriores (lámparas incandescentes, lámparas de descarga, y aquellas que queman un combustible, por ejemplo las velas y las lámparas de aceite) la luz se generaba por un procedimiento térmico, los ledes solo funcionan correctamente si se mantienen suficientemente fríos. El fabricante especifica normalmente una temperatura máxima de la unión entre 125 y 150 °C, y las temperaturas inferiores son recomendables en interés de alcanzar una larga vida para los ledes. A estas temperaturas, se pierde relativamente poco calor por radiación, lo que significa que el haz de luz generado por un led se considera frío.

El calor residual en un led de alta potencia (que a partir de 2015 puede considerarse inferior a la mitad de la potencia eléctrica que consume) es transportado por conducción a través del sustrato y el encapsulamiento hasta un disipador de calor, que elimina el calor en el ambiente por convección. Es por tanto esencial realizar un diseño térmico cuidadoso, teniendo en cuenta las resistencias térmicas del encapsulamiento del led, el disipador de calor y la interfaz entre ambos. Los ledes de potencia media están diseñados normalmente para ser soldados directamente a una placa de circuito impreso que dispone de una capa de metal térmicamente conductora. Los ledes de alta potencia se encapsulan en paquetes cerámicos de gran superficie diseñados para ser conectados a un disipador de calor metálico, siendo la interfaz un material de una alta conductividad térmica (pasta térmica, material de cambio de fase, almohadilla térmica conductora o pegamento termofusible).

Si se instala una lámpara de ledes en un aparato luminoso sin ventilación, o el ambiente carece de una circulación de aire fresco, es probable que los ledes se sobrecalienten, lo que reduce su vida útil o, incluso, produzca el deterioro anticipado del aparato luminoso. El diseño térmico se suele proyectar para una temperatura ambiente de 25 °C (77 °F). Los ledes utilizados en las aplicaciones al aire libre, como las señales de tráfico o las luces de señalización en el pavimento, y en climas donde la temperatura dentro del aparato de iluminación es muy alta, pueden experimentar desde una reducción de la emisión luminosa hasta un fallo completo.<sup>68</sup>

Puesto que la eficiencia de los ledes es más alta a temperaturas bajas, esta tecnología es idónea para la iluminación de los congeladores de supermercado.<sup>69 70 71</sup> Debido a que los ledes producen menos calor residual que las lámparas incandescentes,<sup>68</sup> su uso en congeladores también puede ahorrar costes de refrigeración. Sin embargo, pueden ser más susceptibles a la helada y a la acumulación de escarcha que las lámparas incandescentes, por lo que algunos sistemas de iluminación led han sido dotados de un circuito de calefacción. Además, se han desarrollado las técnicas de los disipadores de calor de manera que pueden transferir el calor producido en la unión a las partes de los equipos de iluminación que puedan interesar.<sup>72</sup>

## Colores y materiales

---

Los ledes convencionales están fabricados a partir de una gran variedad de materiales semiconductores inorgánicos. En la siguiente tabla se muestran los colores disponibles con su margen de longitudes de onda, diferencias de potencial de trabajo y materiales empleados.

	Color	Longitud de Onda [nm]	Diferencia de potencial [ $\Delta V$ ]	Material semiconductor
	<u>Radiación infrarroja</u>	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1.63$	Arseniuro de Galio (GaAs) Arseniuro de galio-aluminio (AlGaAs)
	<u>Rojo</u>	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	Arseniuro de galio-aluminio (AlGaAs) Fosfuro de galio y arsénico (GaAsP) Fosfuro de aluminio-galio-indio (AlGaInP) Fosfato de galio (GaP)
	<u>Naranja</u>	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta V < 2.10$	Fosfuro de galio y arsénico (GaAsP) Fosfuro de aluminio-galio-indio (AlGaInP) Fosfato de galio (GaP)
	<u>Amarillo</u>	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta V < 2.18$	Fosfuro de galio y arsénico (GaAsP) Fosfuro de aluminio-galio-indio (AlGaInP) Fosfato de galio (GaP)
	<u>Verde</u>	$500 < \lambda < 570$	$1.9^{73} < \Delta V < 4.0$	Verde clásico: Fosfato de galio (GaP) Fosfuro de aluminio-galio-indio (AlGaInP) Fosfuro de galio-aluminio (AlGaP) Verde puro: Nitruro de galio-indio (InGaN) / Nitruro de galio (GaN)
	<u>Azul</u>	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Seleniuro de zinc (ZnSe) Nitruro de galio-indio (InGaN) Carburo de silicio (SiC) como sustrato Silicio (Si) como sustrato (en desarrollo) <sup>74</sup>
	<u>Violeta</u>	$400 < \lambda < 450$	$2.76 < \Delta V < 4.0$	Nitruro de galio-indio (InGaN)
	<u>Púrpura</u>	Combinación de distintos tipos	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Ledes duales azul/rojo, azul con fósforo rojo, o blanco con plástico púrpura.
	<u>Ultravioleta</u>	$\lambda < 400$	$3 < \Delta V < 4.1$	Nitruro de galio-indio (InGaN) (385-400 nm)  Diamante (C) (235 nm) <sup>75</sup> Nitruro de boro (BN) (215 nm) <sup>76 77</sup> Nitruro de aluminio (AlN) (210 nm) <sup>78</sup> Nitruro de galio-aluminio (AlGaIn) Nitruro de aluminio-galio-indio (AlGaInN) hasta 210 nm <sup>79</sup>
	<u>Rosa</u>	Combinación de distintos tipos	$\Delta V \sim 3.3^{80}$	Azul con una o dos capas de fósforo, amarillo con fósforo rojo, naranja o rosa, blanco con plástico rosa, o fósforo blanco con tinte rosa por encima. <sup>81</sup>
	<u>Blanco</u>	Espectro amplio	$2.8 < \Delta V < 4.2$	Blanco puro: Led azul o UV con fósforo amarillo Blanco cálido: Led azul con fósforo naranja.

## Azul y ultravioleta

El primer led azul-violeta utilizaba cloro dopado con magnesio y lo desarrollaron Herb Maruska y Wally Rhines en la Universidad de Stanford en 1972, estudiantes de doctorado en ciencia de materiales e ingeniería.<sup>82 83</sup> En aquel entonces Maruska estaba trabajando en los laboratorios de RCA, donde colaboraba con Jacques Pankove. En 1971, un año después de que Maruska se fuera a Stanford, sus compañeros de RCA Pankove y Ed Miller demostraron la primera electroluminiscencia azul procedente del zinc dopado con nitruro de galio; sin embargo el dispositivo que construyeron Pankove y Miller, el primer diodo emisor de luz de nitruro de galio real, emitía luz verde.<sup>84</sup> En 1974 la Oficina de Patentes estadounidense concedió a Maruska, Rhines y al profesor de Stanford David Stevenson una patente (patente US3819974 A de los EE. UU.)<sup>85</sup> de su trabajo de 1972 sobre el dopaje de nitruro de galio con magnesio que hoy sigue siendo la base de todos los ledes azules comerciales y de los diodos láser. Estos dispositivos construidos en los 70 no tenían suficiente rendimiento luminoso para su uso práctico, por lo que la investigación de los diodos de nitruro de galio se ralentizó. En agosto de 1989 Cree introdujo el primer led azul comercial con una transición indirecta a través de la banda prohibida en un semiconductor de carburo de silicio (SiC).<sup>86 87</sup> Los ledes de SiC tienen una eficiencia luminosa muy baja, no superior al 0,03%, pero emiten en la región del azul visible.

A finales de los 80, los grandes avances en crecimiento epitaxial y en dopaje tipo-p<sup>88</sup> en GaN marcaron el comienzo de la era moderna de los dispositivos opto-electrónicos de GaN. Basado en lo anterior, Theodore Moustakas patentó un método de producción de ledes azules en la Universidad de Boston utilizando un novedoso proceso de dos pasos.<sup>89</sup> Dos años más tarde, en 1993, los ledes azules de alta intensidad fueron retomados por Shuji Nakamura de la Nichia Corporation utilizando procesos de síntesis de GaN similares al de Moustakas.<sup>90</sup> A Moustakas y a Nakamura se les asignaron patentes separadas, lo que generó conflictos legales entre Nichia y la Universidad de Boston (sobre todo porque, pese a que Moustakas inventó su proceso primero, Nakamura registró el suyo antes).<sup>91</sup> Este nuevo desarrollo revolucionó la iluminación con ledes, rentabilizando la fabricación de las fuentes de luz azul de alta-potencia, conduciendo al desarrollo de tecnologías como el Blu-ray, y propiciando las pantallas brillantes de alta resolución de las tabletas y teléfonos modernos.

Nakamura fue laureado con el Premio de Tecnología del Milenio por su contribución a la tecnología de los ledes de alta potencia y su alto rendimiento.<sup>92</sup> Además se le concedió, junto a Hiroshi Amano y Isamu Akasaki, el Premio Nobel de Física en 2014 por su decisiva contribución a los ledes de alto rendimiento y al led azul.<sup>93 94 95 96</sup> En 2015 un juzgado estadounidense dictaminó que tres empresas (o sea las mismas compañías demandantes que no habían resuelto sus disputas previamente) y que disponían de las patentes de Nakamura para la producción en EE. UU., habían vulnerado la patente previa de Moustakas y les ordenó pagar unos derechos de licencia por un valor de 13 millones de dólares.<sup>97</sup>

A finales de los 90 ya se disponía de los ledes azules. Estos presentan una región activa que consta de uno o más pozos cuánticos de InGa<sub>x</sub>N intercalados entre láminas más gruesas de GaN, llamadas vainas. Variando la fracción de In/Ga en los pozos cuánticos de InGa<sub>x</sub>N, la emisión de luz puede, en teoría, modificarse desde el violeta hasta el ámbar. El nitruro de aluminio y galio AlGa<sub>x</sub>N con un contenido variable de la fracción de Al/Ga se puede usar para fabricar la vaina y las láminas de los pozos cuánticos para los diodos ultravioletas, pero estos dispositivos aún no han alcanzado el nivel de eficiencia ni la madurez tecnológica de los dispositivos de InGa<sub>x</sub>N/GaN azul/verde. Si el GaN se usa sin dopar, para formar las capas activas de los pozos cuánticos el dispositivo emite luz próxima al ultravioleta con un pico centrado en una longitud de onda alrededor de los 365 nm. Los ledes verdes fabricados en la modalidad InGa<sub>x</sub>N/GaN son mucho más eficientes y brillantes que los ledes producidos con sistemas sin nitruro, pero estos dispositivos todavía presentan una eficiencia demasiado baja para las aplicaciones de alto brillo.

Utilizando nitruros de aluminio, como AlGa<sub>x</sub>N y AlGa<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>N, se consiguen longitudes de ondas aún más cortas. Una gama de ledes ultravioletas para diferentes longitudes de onda están empezando a encontrarse disponibles en el mercado. Los ledes emisores próximos al UV con longitudes de onda en torno a 375-395 nm ya resultan suficientemente baratos y se pueden encontrar con facilidad, por ejemplo para sustituir las

lámparas de luz negra en la inspección de las marcas de agua anti-falsificación UV en algunos documentos y en papel moneda. Los diodos de longitudes de onda más cortas (hasta 240 nm),<sup>98</sup> están actualmente en el mercado, aunque son notablemente más caros.

Como la fotosensibilidad de los microorganismos coincide aproximadamente con el espectro de absorción del ADN (con un pico en torno a los 260 nm) se espera utilizar los ledes UV con emisión en la región de 250-270 nm en los equipos de desinfección y esterilización. Investigaciones recientes han demostrado que los ledes UV disponibles en el mercado (365 nm) son eficaces en los dispositivos de desinfección y esterilización.<sup>99</sup> Las longitudes de onda UV-C se obtuvieron en los laboratorios utilizando nitruro de aluminio (210 nm), nitruro de boro (215 nm) y diamante (235 nm).

## RGB

Los ledes RGB consisten en un led rojo, uno azul y otro verde. Ajustando independientemente cada uno de ellos, los ledes RGB son capaces de producir una amplia gama de colores. A diferencia de los ledes dedicados a un solo color, los ledes RGB no producen longitudes de ondas puras. Además, los módulos disponibles comercialmente no suelen estar optimizados para hacer mezclas suaves de color.

## Sistemas RGB

### Los sistemas RGB

Existen dos formas básicas para producir luz blanca. Una consiste en utilizar ledes individuales que emitan los tres colores primarios (rojo, verde y azul) y luego mezclar los colores para formar la luz blanca. La otra forma consiste en utilizar un fósforo para convertir la luz monocromática de un led azul o UV en un amplio espectro de luz blanca. Es importante tener en cuenta que la blancura de la luz producida se diseña esencialmente para satisfacer al ojo humano y dependiendo de cada caso que no siempre puede ser apropiado pensar que se trata de luz estrictamente blanca. Sirva como punto de referencia la gran variedad de blancos que se consiguen con los tubos fluorescentes.

Hay tres métodos principales para producir luz blanca con los ledes.

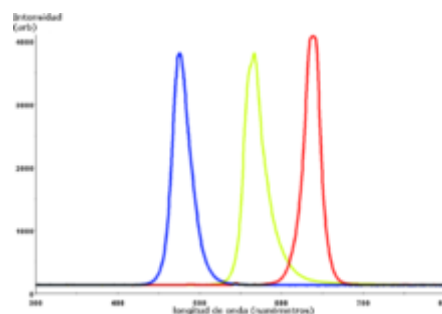
- Led azul + led verde + led rojo (mezcla de colores; si bien se puede utilizar como luz de fondo para las pantallas) para iluminación resultan muy pobres debido a los intervalos vacíos en el espectro de frecuencias).
- Led UV cercano o UV + fósforo RGB (una luz led que genera una longitud de onda más corta que el azul se utiliza para excitar un fósforo RGB).
- Led azul + fósforo amarillo (dos colores complementarios se combinan para producir la luz blanca; es más eficiente que los primeros dos métodos y, por tanto está más utilizado en la práctica).



RGB-SMD-LED. Led RGB montado en superficie (surface mounted device). Este dispositivo muestra los tres colores complementarios rojo, verde y azul. Existen otros tipos de dispositivos como el Led COB (montado en placa) o el microled que por su geometría y distribución en la placa de montaje, son más eficientes energéticamente.



Debido al metamerismo, es posible disponer de diferentes espectros que parezcan blancos. Sin embargo, la apariencia de los objetos iluminados por esa luz puede modificarse a medida que el espectro varía. Este fenómeno óptico se conoce como ejecución del color, es diferente a la temperatura del color, y que hace que un objeto realmente naranja o cian pueda parecer de otro color y mucho más oscuro como el led o el fósforo asociado no emiten esas longitudes de onda. La mejor reproducción de color con CFL y led se consigue utilizando una mezcla de fósforos, lo que proporciona una menor eficiencia pero una mejor calidad de luz. Aunque el halógeno con mayor temperatura de color es el naranja, sigue siendo la mejor fuente de luz artificial disponible en términos de ejecución de color.



Espectro resultante de la combinación de los ledes semiconductores de estado sólido azul, amarillo-verde y rojo de alto brillo. El ancho de banda espectral es de aproximadamente 24-27 nm para los tres colores.

La luz blanca se puede producir mediante la adición de luces de diferentes colores; el método más común es el uso de rojo, verde y azul (RGB). De ahí que el método se denomine ledes de blanco multicolor (a veces conocido como ledes RGB). Debido a que necesitan circuitos electrónicos para controlar la mezcla y la difusión de los diferentes colores, y porque los ledes de color individuales presentan patrones de emisión ligeramente diferentes (lo que conduce a la variación del color en función de la dirección de observación), incluso si se fabrican en una sola unidad, rara vez se utilizan para producir luz blanca. Sin embargo, este método tiene muchas aplicaciones por la flexibilidad que presenta para producir la mezcla de colores<sup>100</sup> y, en principio, por ofrecer una mayor eficiencia cuántica en la producción de luz blanca.



Led RGB para generar luz blanca

Hay varios tipos de ledes blancos multicolor: ledes blancos di-, tri- y tetracromático. Varios factores clave influyen en estas diferentes realizaciones, como son la estabilidad del color, el índice de reproducción del color natural y la eficiencia luminosa. Con frecuencia, una mayor eficiencia luminosa implicará una menor naturalidad del color, surgiendo así una compensación entre la eficiencia luminosa y la naturalidad de los colores. Por ejemplo, los ledes blancos dicromáticos presentan la mejor eficiencia luminosa (120 lm / W), pero la capacidad de representación cromática más baja. Por otro lado, los ledes blancos tetracromáticos ofrecen una excelente capacidad de representación de color pero a menudo se acompañan de una pobre eficiencia luminosa. Los ledes blancos tricromáticos se encuentran en una posición intermedia, poseen una buena eficiencia luminosa ( $> 70 \text{ lm / W}$ ) y una razonable capacidad para la reproducción de color.

Uno de los desafíos pendientes de resolver consiste en el desarrollo de ledes verdes más eficientes. El máximo teórico para los ledes verdes es de 683 lúmenes por vatio, pero a partir de 2010 tan solo unos pocos ledes verdes superaron los 100 lúmenes por vatio. Los ledes azul y rojo, sin embargo, se están acercando a sus límites teóricos.

Los ledes multicolores ofrecen la posibilidad no solo de producir luz blanca sino también de generar luces de diferentes colores. La mayoría de los colores perceptibles se pueden formar mezclando diferentes proporciones de los tres colores primarios. Esto permite un control dinámico preciso del color. A medida que se dedica más esfuerzo en investigación el método de los ledes multicolor presenta una mayor influencia como método fundamental utilizado para producir y controlar el color de la luz.

Si bien este tipo de ledes puede jugar un buen papel en el mercado, antes hay que resolver algunos problemas técnicos. Por ejemplo, la potencia de emisión de estos ledes disminuye exponencialmente al aumentar la temperatura, produciendo un cambio sustancial de la estabilidad del color. Estos problemas pueden imposibilitar su empleo en la industria. Por ello, se han efectuado muchos diseños nuevos de

encapsulamientos y sus resultados se encuentran en fase de estudio por los investigadores. Evidentemente, los ledes multicolores sin fósforos nunca pueden proporcionar una buena iluminación debido a que cada uno de ellos emite una banda muy estrecha de color. Así como los ledes sin fósforos constituyen una solución muy pobre para iluminación, ofrecen la mejor solución para pantallas de iluminación de fondo para LCD o de iluminación directa con píxeles de ledes.

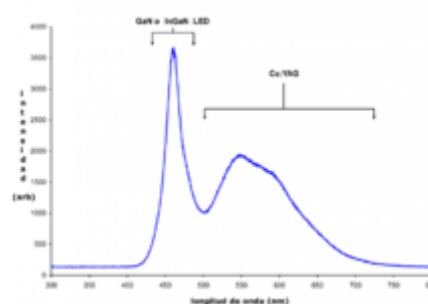
En la tecnología Led, la disminución de la temperatura de color correlacionada (CCT) es una realidad difícil de evitar debido a que, junto con la vida útil y los efectos de la variación de la temperatura de los ledes, se acaba modificando el color real definitivo de los mismos. Para corregirlo, se utilizan sistemas con bucle de realimentación provistos, por ejemplo, de sensores de color y así supervisar, controlar y mantener el color resultante de la superposición de los ledes monocolor.<sup>101</sup>

## Ledes basados en fósforo

Este método implica el recubrimiento de los ledes de un color (principalmente ledes azules de InGaN) con fósforos de diferentes colores para producir luz blanca; los ledes resultantes de la combinación se llaman ledes blancos basados en fósforos o ledes blancos con un convertidor de fósforo (PCLED). Una fracción de la luz azul experimenta el desplazamiento de Stokes que transforma las longitudes de onda más cortas en longitudes de onda más largas. Dependiendo del color del led original, se pueden emplear fósforos de diversos colores. Si se aplican varias capas de fósforos de colores distintos se ensancha el espectro de emisión, incrementándose efectivamente el valor del índice de reproducción cromática (IRC) de un led dado.

Las pérdidas de eficiencia de los ledes basados en fósforos (con sustancias fluorescentes) se deben a las pérdidas de calor generadas por el desplazamiento de Stokes y también a otros problemas de degradación relacionados con dichas sustancias fluorescentes. En comparación con los ledes normales sus eficiencias luminosas dependen de la distribución espectral de la salida de luz resultante y de la longitud de onda original del propio led. Por ejemplo, la eficiencia luminosa de un fósforo amarillo YAG típico de un led blanco de 3 a 5 veces la eficiencia luminosa del led azul original, debido a la mayor sensibilidad del ojo humano para el color amarillo que para el color azul (según el modelo de la función de luminosidad). Debido a la simplicidad de su fabricación, el método de fósforo (material fluorescente) sigue siendo el más popular para conseguir una alta intensidad en los ledes blancos. El diseño y la producción de una fuente de luz o lámpara utilizando un emisor monocromático con la conversión de fósforo fluorescente es más simple y más barato que un sistema complejo RGB, y la mayoría de los ledes blancos de alta intensidad existentes actualmente en el mercado se fabrican utilizando la conversión de la luz mediante fluorescencia.

Entre los retos que surgen para mejorar la eficiencia de las fuentes de luz blanca a base de ledes se encuentra el desarrollo de sustancias fluorescentes (fósforos) más eficientes. A partir de 2010, el fósforo amarillo más eficiente continúa siendo el fósforo YAG, que presenta una pérdida por el desplazamiento de Stokes inferior al 10%. Las pérdidas ópticas internas debidas a la reabsorción en el propio chip del led y en el encapsulamiento del led constituyen del 10% al 30% de la pérdida de eficiencia. Actualmente, en el ámbito del desarrollo con fósforo, se dedica un gran esfuerzo en su optimización con el fin de conseguir una mayor producción de luz y unas temperaturas de operación más elevadas. Por ejemplo, la eficiencia se puede aumentar con un mejor diseño del encapsulamiento o mediante el uso de un del tipo más adecuado de fósforo. El proceso de revestimiento de ajuste se suele utilizar con el fin de poder regular el espesor variable del fósforo.



Espectro de un led blanco que muestra la luz emitida por el led de GaN (aproximadamente 465 nm) superpuesta al ancho de banda de la luz emitida por el fósforo de  $\text{Ce}^{3+}$ .

Algunos ledes blancos dotados de fósforos consisten en ledes azules de InGaN encapsulados en una resina epoxi recubierta por un fósforo. Otra opción consiste en asociar el led con un fósforo separado, una pieza prefabricada de policarbonato preformado y revestida con el material del fósforo. Los fósforos separados proporcionan una luz más difusa, lo cual es favorable para muchas aplicaciones. Los diseños con fósforos separados son también más tolerantes con las variaciones del espectro de emisión del led. Un material de fósforo amarillo muy común es el aluminio granate de itrio y aluminio dopado con cerio ( $\text{Ce}^{3+}:\text{YAG}$ ).

Los ledes blancos también se pueden fabricar con ledes del ultravioleta próximo (NUV) recubiertos con una mezcla de fósforos de europio de alta eficiencia que emiten rojo y azul, más sulfuro de zinc dopado con cobre y aluminio ( $\text{ZnS}:\text{Cu}, \text{Al}$ ) que emite verde. Este procedimiento es análogo al de funcionamiento de las lámparas fluorescentes. El procedimiento es menos eficiente que el de los ledes de color azul con fósforo  $\text{YAG}:\text{Ce}$ , puesto que el desplazamiento de Stokes es más importante, por lo que una mayor fracción de la energía se convierte en calor, aun así se genera una luz con mejores características espectrales y, por tanto, con una mejor reproducción de color.

Dado que los ledes ultravioleta presentan una mayor radiación de salida que los azules, ambos métodos ofrecen, en definitiva, un brillo similar. Un inconveniente de los últimos es que una posible fuga de la luz UV procedente de una fuente luminosa que funcione incorrectamente puede causar daño a los ojos o a la piel humana.

## Otros ledes blancos

Otro método utilizado para producir ledes experimentales de luz blanca sin el empleo de fósforos se basa en la epitaxia de crecimiento del seleniuro de zinc ( $\text{ZnSe}$ ) sobre un sustrato de  $\text{ZnSe}$  que de forma simultánea emite luz azul procedente de su región activa y luz amarilla procedente del sustrato.

Una nueva forma para producir ledes blancos consiste en utilizar obleas compuestas de nitruro de galio sobre silicio a partir de obleas de silicio de 200 mm. Esto evita la costosa fabricación de sustratos de zafiro a partir de obleas de tamaños relativamente pequeños, o sea de 100 o 150 mm. El aparato de zafiro debe estar acoplado a un colector similar a un espejo para reflejar la luz, que de otro modo se perdería. Se predice que para 2020 el 40 % de todos los ledes de GaN se fabricarán sobre silicio. La fabricación de zafiro de gran tamaño es difícil, mientras que el material de silicio grande es barato y más abundante. Por otro lado, los fabricantes de ledes que cambien del zafiro al silicio deben de hacer una inversión mínima.

## Ledes orgánicos (OLED)

En un diodo emisor de luz orgánico (OLED), el material electroluminiscente que constituye la capa emisora del diodo es un compuesto orgánico. El material orgánico es conductor debido a deslocalización electrónica de los enlaces  $\pi$  causados por el sistema conjugado en toda o en parte de la molécula; en consecuencia el material funciona como un semiconductor orgánico. Los materiales orgánicos pueden ser pequeñas moléculas orgánicas en fase cristalina, o polímeros.

Una de las ventajas que posibilitan los OLED son las pantallas delgadas y de bajo costo con una tensión de alimentación baja, un amplio ángulo de visión, un alto contraste y una extensa gama de colores. Los ledes de polímero presentan la ventaja añadida de propiciar las pantallas imprimibles y flexibles. Los OLED se han utilizado en la fabricación de pantallas visuales para los dispositivos electrónicos portátiles, como son los teléfonos móviles, las cámaras digitales y los reproductores de MP3, y se considera que los posibles usos futuros también incluirán la iluminación y la televisión.

## Ledes de puntos cuánticos

A inicio de los años 60 comenzó una década de revolución tecnológica con el nacimiento de Internet y el descubrimiento del led en el espectro visible. En 1959 el premio nobel de física Richard P. Feynman, en su célebre conferencia dada en la reunión anual de la Asociación Física de los Estados Unidos titulada: "Hay mucho espacio en el fondo: una invitación para entrar en un nuevo campo de la física", ya adelantaba la revolución tecnológica y los importantes descubrimientos que podían suponer la manipulación de los materiales hasta reducirlos a tamaños o escalas atómicas o moleculares.<sup>102</sup> Pero no es hasta la década siguiente de 1970 que el conocimiento de numerosas aplicaciones de la mecánica cuántica (a unos 70 años de su invención) unido al avance de las técnicas de crecimiento y síntesis de materiales, llegan a suponer un cambio importante en las líneas de investigación de numerosos grupos.<sup>103</sup>

Ya en esta década se unía la capacidad de diseñar estructuras teniendo nuevas propiedades ópticas y electrónicas a la búsqueda de nuevas aplicaciones tecnológicas a los materiales ya existentes en la naturaleza. De hecho, en 1969, L. Esaki et al. propusieron la implementación de heteroestructuras formadas por capas muy delgadas de distintos materiales, dando lugar a lo que se conoce como ingeniería y diseño de bandas de energía en materiales semiconductores.<sup>104</sup> La heteroestructura de pequeñas dimensiones más básica es el pozo cuántico (Quantum Well, QW). Consiste en una capa delgada de un determinado semiconductor, del orden de 100 Å, confinada entre dos capas de otro material semiconductor caracterizado por una mayor anchura de la banda de energía prohibida (bandgap, BG). Debido a las pequeñas dimensiones del pozo de potencial asociado a esta estructura, los portadores ven restringido su movimiento a un plano perpendicular a la dirección de crecimiento. Los diodos láser con QWs en la zona activa suponían grandes ventajas, como por ejemplo la capacidad de seleccionar la longitud de onda de emisión en función de la anchura del pozo o la disminución de la corriente umbral, esto último relacionado con la densidad de estados resultado del confinamiento en un plano.<sup>105</sup>

A todos estos avances se fueron sucediendo de manera natural otros como el estudio de los sistemas con confinamiento en tres dimensiones, es decir los puntos cuánticos (QDs). Así, los QDs se pueden definir como sistemas artificiales de tamaño muy pequeño, desde algunas decenas de nanómetros a algunas micras en los que los portadores se encuentran confinados en las tres direcciones del espacio tridimensional (por eso se llama cero-dimensional), en una región del espacio más pequeña que su longitud de onda de Broglie.

Cuando el tamaño del material semiconductor que constituye el punto cuántico se encuentra dentro de la escala nanométrica, este material presenta un comportamiento que difiere del observado para el mismo a escala macroscópica o para los átomos individuales que los conforman. Los electrones en el nanomaterial se encuentran restringidos a moverse en una región muy pequeña del espacio y se dice que están confinados. Cuando esta región es tan pequeña que es comparable a la longitud de onda asociada al electrón (la longitud de De Broglie), entonces comienza a observarse lo que se denomina comportamiento cuántico. En estos sistemas, sus propiedades físicas no se explican con conceptos clásicos sino que se explican mediante los conceptos de la mecánica cuántica.<sup>106</sup> Por ejemplo, la energía potencial mínima de un electrón confinado dentro de una nanopartícula es mayor que la esperada en física clásica y los niveles de energía de sus diferentes estados electrónicos son discretos. Debido al confinamiento cuántico, el tamaño de la partícula tiene un efecto fundamental sobre la densidad de estados electrónicos y por ello, sobre su respuesta óptica. El confinamiento cuántico se produce cuando el tamaño de las partículas se ha reducido hasta aproximarse al radio del excitón de Bohr (generándose en el material semiconductor un par electrón-hueco o excitón) quedando confinado en un espacio muy reducido. Como consecuencia, la estructura de los niveles energéticos y las propiedades ópticas y eléctricas del material se modifican considerablemente. Los niveles de energía pasan a ser discretos y finitos, y dependen fuertemente del tamaño de la nanopartícula.<sup>106</sup>

Usualmente están fabricados con material semiconductor y pueden albergar desde ninguno a varios miles de electrones. Los electrones que están dentro del punto cuántico se repelen, cuesta energía introducir electrones adicionales, y obedecen el principio de exclusión de Pauli, que prohíbe que dos electrones ocupen el mismo estado cuántico simultáneamente. En consecuencia, los electrones en un punto cuántico

forman órbitas de una manera muy similar a las de los átomos y en algunos casos se los denomina átomos artificiales. También presentan comportamientos electrónicos y ópticos similares a los átomos. Su aplicación puede resultar muy diversa, además de en optoelectrónica y óptica, en la computación cuántica, en el almacenamiento de información para computadoras tradicionales, en biología y en medicina.

Las propiedades ópticas y de confinamiento cuántico del punto cuántico permiten que su color de emisión se pueda ajustar desde el visible al infrarrojo.<sup>107 108</sup> Los ledes de puntos cuánticos pueden producir casi todos los colores del diagrama CIE. Además, proporcionan más opciones de color y una mejor representación del mismo que los ledes blancos comentados en las secciones anteriores, ya que el espectro de emisión es mucho más estrecho, lo que es característico de los estados cuánticos confinados.

Existen dos procedimientos para la excitación de los QD. Uno utiliza la fotoexcitación con una fuente de luz primaria de led (para ello se utilizan habitualmente los ledes azules o UV). El otro procedimiento utiliza la excitación eléctrica directa demostrada por primera vez por Alivisatos et al.<sup>109</sup>

Un ejemplo del procedimiento de fotoexcitación es el desarrollado por Michael Bowers, en la Universidad Vanderbilt de Nashville, realizando un prototipo que consistía en el recubrimiento de un led azul con puntos cuánticos que emitían luz blanca en respuesta a la azul del led. El led modificado emitía una luz cálida de color blanco amarillento similar a la de las lámparas incandescentes.<sup>110</sup> En 2009 se iniciaron investigaciones con los diodos emisores de luz utilizando QD en aplicaciones a los televisores con pantalla de cristal líquido (LCD).<sup>111 112</sup>

En febrero de 2011 científicos del PlasmaChem GmbH fueron capaces de sintetizar puntos cuánticos para las aplicaciones de los ledes realizando un convertidor de luz que conseguía transformar eficazmente la luz azul en luz de cualquier otro color durante muchos cientos de horas.<sup>113</sup> Estos puntos cuánticos pueden también ser utilizados para emitir luz visible o cercana al infrarrojo al excitarlos con luz de una longitud de onda menor.

La estructura de los ledes de puntos cuánticos (QD-LED) utilizados para la excitación eléctrica del material, poseen un diseño básico similar al de los OLED. Una capa de puntos cuánticos se encuentra situada entre dos capas de un material capaz de transportar electrones y huecos. Al aplicar un campo eléctrico, los electrones y los huecos se mueven hacia la capa de puntos cuánticos y se recombinan formando excitones; cada excitón produce un par electrón-hueco, emitiendo luz. Este esquema es el habitualmente considerado para las pantallas de puntos cuánticos. La gran diferencia con los OLED reside en su tamaño de dimensiones muy pequeñas y como consecuencia, generan los efectos y propiedades ópticas del confinamiento cuántico.

Los QD resultan también muy útiles como fuentes de excitación para producir imágenes por fluorescencia debido al estrecho margen de longitudes de onda emitidas por el QD que se manifiesta en el estrecho ancho de banda del pico en el espectro de emisión (propiedad debida al confinamiento cuántico). Por ello se ha mostrado eficiente el uso de ledes de puntos cuánticos (QD-LED) en la técnica de microscopía óptica de campo cercano.<sup>114</sup>

En cuanto a la eficiencia energética, en febrero de 2008 se consiguió una emisión de luz cálida con una eficiencia luminosa de 300 lúmenes de luz visible por cada vatio de radiación (no por vatio eléctrico) mediante el uso de nanocristales.<sup>115</sup>

## Tipos

---

Los ledes se fabrican en una gran variedad de formas y tamaños. El color de la lente de plástico suele coincidir con el de la luz emitida por el led aunque no siempre es así. Por ejemplo, el plástico de color púrpura se emplea para los ledes infrarrojos y la mayoría de los ledes azules presentan encapsulamientos

incolores. Los ledes modernos de alta potencia como los empleados para iluminación directa o para retroiluminación aparecen normalmente en montajes de tecnología de superficie (SMT).

## Miniatura

Los ledes miniatura se suelen usar como indicadores. En la tecnología de agujeros pasantes y en los montajes superficiales su tamaño varía desde 2 mm a 8 mm. Normalmente no disponen de un disipador de calor independiente.<sup>116</sup> La corriente máxima se sitúa entre 1mA y 20mA. Su pequeño tamaño constituye una limitación a efectos de la potencia consumida debido a su alta densidad de potencia y a la ausencia de un disipador. A menudo se conectan en cadena margarita para formar tiras de luz led.

Las formas de la cubierta de plástico más típicas son redonda, plana, triangular y cuadrada con la parte de arriba plana. El encapsulamiento también puede ser transparente o coloreado para poder mejorar el contraste y los ángulos de visión.<sup>117</sup>

Investigadores de la Universidad de Washington han inventado el led más delgado. Está formado por materiales de dos dimensiones (2-D). Su anchura son 3 átomos, o sea entre 10 y 20 veces más fino que los ledes tridimensionales (3-D) y 10 000 veces más delgado que un pelo humano. Estos ledes 2-D permitirán las comunicaciones ópticas y los nano láseres más pequeños y más eficientes en energía.<sup>118</sup>

Hay tres categorías principales de ledes miniatura de un único color:

### Baja Intensidad de Corriente

Preparados para una corriente de 2mA con unos 2V (consumo de más o menos 4 mW).

### Rango Intermedio o Comunes

Ledes de 20mA (entre 40mW y 90mW) en torno a:

- 1,9 -2,1 V para rojo, naranja amarillo y el verde tradicional.
- 3.0-3.4 V para verde puro y azul.
- 2.9-4.2 V para violeta, rosa, morado y blanco.

### Alta Intensidad de Corriente

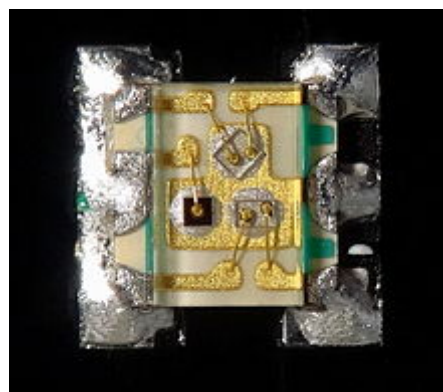
Para una corriente de 20mA y con 2 o 4-5 V, diseñadas para poder ver con luz solar directa. Los ledes de 5 V y 12 V son ledes miniatura normales que incorporan un resistencia en serie para la conexión directa a una alimentación de 5 o 12 V.

## Alta Potencia

Ver también: Iluminación de estado sólido, Lámpara led, ledes de Alta Potencia o HP-LED

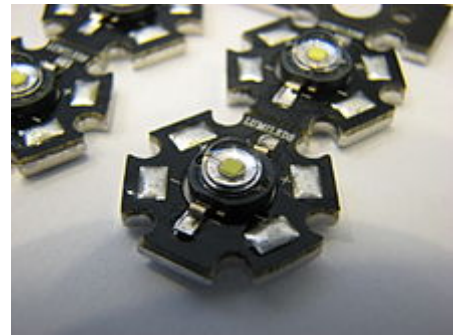


Foto de un montaje superficial con ledes de los tamaños más corrientes. Pueden ser bastante más pequeños que el típico led de lámpara de 5mm que aparece en la esquina superior izquierda.



Conjunto miniatura de ledes de color rojo, verde y azul en un montaje superficial diminuto (1.6x1.6x0.35mm) con detalles de las soldaduras de oro.

Los ledes de alta potencia HP-LED (High-power LED) o de alta emisión HO-LED (del inglés High-Output LED) pueden controlarse con corrientes desde cientos de mA hasta de más de 1 Amperio, mientras que otros ledes solo llegan a las decenas de miliAmperios. Algunos pueden emitir más de mil lúmenes.<sup>119 120</sup>



Diodos emisores de luz de alta potencia conectados a una base en estrella para led (Luxeon, Lumileds)

También se han alcanzado densidades de potencia de hasta 300 W/(cm<sup>2</sup>).<sup>121</sup> Como el sobrecalentamiento de los ledes puede destruirlos, se tienen que montar sobre un disipador. Si el calor de un HP-LED no se transfiriera al medio, el aparato fallaría en unos pocos segundos. Un HP-LED puede sustituir a una bombilla incandescente en una linterna o varios de ellos pueden asociarse para constituir una lámpara led de potencia. Algunos HP-LED bien conocidos en esta categoría son los de la serie Nichia 19, Lumileds Rebel Led, Osram Opto Semiconductors Golden Dragon y Cree X-Lamp. Desde septiembre de 2009, existen ledes manufacturados por Cree que superan los 105 lm/W.<sup>122</sup>

Ejemplos de la ley de Haitz, que predice un aumento exponencial con el tiempo de la emisión luminosa y de la eficiencia de un led, son los de la serie CREE XP-GE que alcanzó en 2009<sup>122</sup> los 105 lm/W y la serie Nichia 19 con una eficiencia media de 140 lm/W que fue lanzado en 2010.<sup>123</sup>

## Accionados por corriente alterna

Semiconductor Seúl ha desarrollado ledes que puede funcionar con corriente alterna sin necesidad de un conversor DC. En un semiciclo, una parte del led emite luz y la otra parte es oscura, y esto sucede al contrario durante el siguiente semiciclo. La eficiencia normal de este tipo de HP-LED es 40 lm/W.<sup>124</sup> Un gran número de elementos led en serie pueden funcionar directamente con la tensión de la red. En 2009, Semiconductor Seúl lanzó un led de alto voltaje, llamado 'Acrich MJT', capaz de ser gobernado por AC mediante un simple circuito de control. La baja potencia disipada por estos ledes les proporciona una mayor flexibilidad que a otros diseños originales de ledes AC.<sup>125</sup>

## Aplicaciones. Variantes

### De destellos intermitentes

Los ledes intermitentes se utilizan como indicadores de atención sin necesidad de ningún tipo de electrónica externa. Los ledes intermitentes se parecen a los ledes estándar, pero contienen un circuito multivibrador integrado que hace que los ledes parpadeen con un período característico de un segundo. En los ledes provistos de lente de difusión, este circuito es visible (un pequeño punto negro). La mayoría de los ledes intermitentes emiten luz de un solo color, pero los dispositivos más sofisticados pueden parpadear con varios colores e incluso desvanecerse mediante una secuencia de colores a partir de la mezcla de colores RGB.

### Bicolores

Los ledes bicolor contienen dos ledes diferentes en un solo conjunto. Los hay de dos tipos; el primero consiste en dos troqueles conectados a dos conductores paralelos entre sí con la circulación de la corriente en sentidos opuestos. Con el flujo de corriente en un sentido se emite un color y con la corriente en el sentido opuesto se emite el otro color. En el segundo tipo, en cambio, los dos troqueles tienen los terminales



separados y existe un terminal para cada cátodo o para cada ánodo, de modo que pueden ser controlados independientemente. La combinación de colores más común es la de rojo / verde tradicional, sin embargo, existen otras combinaciones disponibles como el verde tradicional/ámbar, el rojo/verde puro, el rojo/azul o el azul/verde puro.

## Tricolores

Los ledes tricolores contienen tres ledes emisores diferentes en un solo bastidor. Cada emisor está conectado a un terminal separado para que pueda ser controlado independientemente de los otros. Es muy característica una disposición en la que aparecen cuatro terminales, un terminal común (los tres ánodos o los tres cátodos unidos) más un terminal adicional para cada color.

## RGB

Los ledes RGB son ledes tricolor con emisores rojo, verde y azul, que usan generalmente una conexión de cuatro hilos y un terminal común (ánodo o cátodo). Este tipo de ledes pueden presentar como común tanto el terminal positivo como el terminal negativo. Otros modelos, sin embargo, solo tienen dos terminales (positivo y negativo) y una pequeña unidad de control electrónico incorporada.

## Multicolores decorativos

Este tipo de ledes posee emisores de diferentes colores y están dotados de dos únicos terminales de salida. Los colores se conmutan internamente variando la tensión de alimentación.

## Alfanuméricos

Los ledes alfanuméricos están disponibles como visualizadores de siete segmentos, como visualizadores de catorce segmentos o como pantallas de matrices de puntos. Los visualizadores (displays) de siete segmentos pueden representar todos los números y un conjunto limitado de letras mientras que los de catorce segmentos pueden visualizar todas las letras. Las pantallas de matrices de puntos usan habitualmente 5x7 píxeles por carácter. El uso de los ledes de siete segmentos se generalizó en la década de 1970 y 1980 pero el uso creciente de las pantallas cristal líquido ha reducido la popularidad de los ledes numéricos y alfanuméricos por su menor requerimiento de potencia y mayor flexibilidad para la visualización.

## RGB Digitales

Son ledes RGB que contienen su propia electrónica de control "inteligente". Además de la alimentación y la conexión a tierra, disponen de conexiones para la entrada y la salida de datos y, a veces, para señales de reloj o estroboscópicas. Se encuentran conectados en una cadena margarita, con la entrada de datos al primer led dotada de un microprocesador que puede controlar el brillo y el color de cada uno de ellos, independientemente de los demás. Se usan donde sea necesaria una combinación que proporcione un control máximo y una vista mínima de la electrónica, como sucede en las cadenas luminosas navideñas o en las matrices de led. Algunos incluso presentan tasas de refresco en el margen de los kHz, lo que los hace aptos para aplicaciones básicas de vídeo.

## Filamentos

Un filamento led consta de varios chips led conectados en serie sobre un sustrato longitudinal formando una barra delgada que recuerda al filamento incandescente de una bombilla tradicional.<sup>126</sup> Los filamentos se están utilizando como una alternativa decorativa de bajo coste a las bombillas tradicionales que están siendo eliminadas en muchos países. Los filamentos requieren una tensión de alimentación bastante alta para iluminar con un brillo normal, pudiendo trabajar de manera eficiente y sencilla a las tensiones de la red. Con frecuencia un simple rectificador y un limitador capacitivo de corriente se emplean como una sustitución de bajo coste de la bombilla incandescente tradicional sin el inconveniente de tener que construir un convertidor de baja tensión y corriente elevada, tal como lo requieren los diodos led individuales.<sup>127</sup> Normalmente se montan en el interior de un recinto hermético al que se le da una forma similar a la de las lámparas que sustituyen (en forma de bombilla, por ejemplo) y se rellenan con un gas inerte como nitrógeno o dióxido de carbono para eliminar el calor de forma eficiente. Los principales tipos de ledes son: miniatura, dispositivos de alta potencia y diseños habituales como los alfanuméricos o los multicolor.<sup>128</sup>

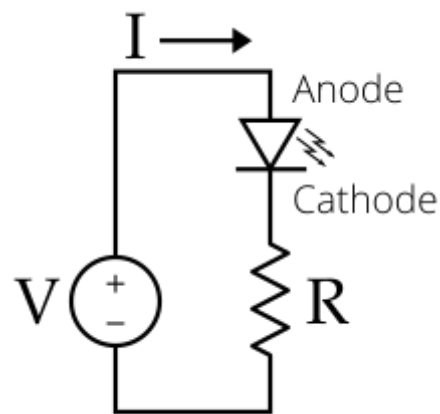
## Consideraciones de uso

---

### Fuentes de alimentación

*Artículo principal: Circuito con led*

La curva característica corriente-tensión de un led es similar a la de otros diodos, en los que la intensidad de corriente (o brevemente, corriente) crece exponencialmente con la tensión (ver la ecuación de Shockley). Esto significa que un pequeño cambio en la tensión puede provocar un gran cambio en la corriente.<sup>129</sup> Si la tensión aplicada sobrepasa la caída de la tensión umbral en polarización directa del led, en una pequeña cantidad, el límite de corriente que el diodo puede soportar puede superarse ampliamente, pudiendo dañar o destruir el led. La solución que se puede adoptar para evitarlo consiste en utilizar fuentes de alimentación de intensidad de corriente constante (brevemente, fuente de corriente constante<sup>130</sup>) capaces de mantener la corriente por debajo del valor máximo de la corriente que puede atravesar el led o, por lo menos, si se usa una fuente de tensión constante convencional o batería, añadir en el circuito de iluminación del Led una resistencia limitadora en serie con el Led. Dado que las fuentes normales de alimentación (baterías, red eléctrica) son normalmente fuentes de tensión constante, la mayoría de los aparatos led deben incluir un convertidor de potencia o, al menos, una resistencia limitadora de corriente. Sin embargo, la alta resistencia de las pilas de botón de tres voltios combinada con la alta resistencia diferencial de los ledes derivados de nitruros hace posible alimentar tales ledes con una pila de botón sin necesidad de incorporar una resistencia externa.



Circuito básico para el encendido de un Led. Se compone de un led, una resistencia limitadora de corriente y una fuente de alimentación de tensión continua.

### Polaridad eléctrica

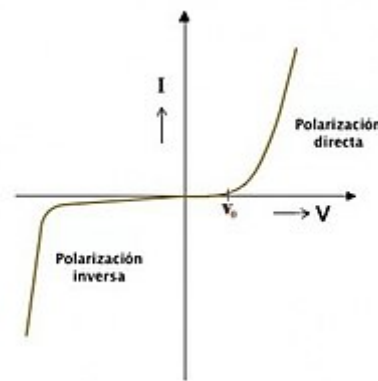
*Artículo principal: Polaridad eléctrica de los Ledes*

Al igual que sucede con todos los diodos, la corriente fluye fácilmente del material de tipo p al material de tipo n.<sup>131</sup> Sin embargo, si se aplica un voltaje pequeño en el sentido inverso la corriente no fluye y no se emite luz. Si el voltaje inverso crece lo suficiente como para exceder la tensión de ruptura, fluye una

corriente elevada y el led puede quedar dañado. Si la corriente inversa está lo suficientemente limitada como para evitar daños, el led de conducción inversa puede ser utilizado como un diodo avalancha.

## Salud y seguridad

La inmensa mayoría de los dispositivos que contienen ledes son "seguros en condiciones de uso normal", y por lo tanto se clasifican como "Producto de riesgo 1 RG1 (riesgo bajo)" / "LED Class 1". En la actualidad, solo unos pocos ledes -los ledes extremadamente luminosos que presentan un ángulo de visión muy pequeño de una apertura de 8° o menos- podrían, en teoría, causar una ceguera temporal y, por lo tanto, se clasifican como de "Riesgo 2 RG2 (riesgo moderado)".<sup>132</sup> La opinión de la Agencia Francesa de Seguridad Alimentaria, Medioambiental y de Salud y Seguridad Ocupacional (ANSES) al abordar en 2010 las cuestiones sanitarias relacionadas con los ledes, sugirió prohibir el uso público de las lámparas que se encontraban en el Grupo 2 o de Riesgo Moderado, especialmente aquellas con un alto componente azul, en los lugares frecuentados por los niños.<sup>133</sup>



Curva característica de un diodo led con sus zonas de polarización directa e inversa

En general, los reglamentos de seguridad en la utilización de la luz láser<sup>134</sup> <sup>135</sup> —y los dispositivos de Riesgo 1, Riesgo 2, etc.— son también aplicables a los ledes.<sup>136</sup>

Así como los ledes presentan la ventaja, sobre las lámparas fluorescentes, de que no contienen mercurio, sin embargo, pueden contener otros metales peligrosos tales como plomo y arsénico. En cuanto a la toxicidad de los ledes cuando se tratan como residuos, un estudio publicado en 2011 declaró: "De acuerdo con las normas federales, los ledes no son peligrosos, excepto los ledes rojos de baja intensidad, ya que al principio de su comercialización contenían Pb (plomo) en concentraciones superiores a los límites reglamentarios (186 mg/L; límite reglamentario: 5). Sin embargo, de acuerdo con las reglamentaciones de California, los niveles excesivos de cobre (hasta 3892 mg/kg; límite: 2500), plomo (hasta 8103 mg/kg, límite: 1000), níquel (hasta 4797 mg/kg, límite: 2000), o plata (hasta 721 mg/kg, límite: 500) ocasionan que todos los ledes, excepto los amarillos de baja intensidad, sean peligrosos".<sup>137</sup>

## Ventajas

- **Eficiencia:** los ledes emiten más lúmenes por vatio que las bombillas incandescentes.<sup>138</sup> La eficiencia de los aparatos de iluminación led no se ve afectada por la forma y el tamaño de estos a diferencia de las bombillas o tubos fluorescentes.
- **Color:** los ledes pueden emitir luz de cualquier color, sin usar ningún filtro de color como los que se necesitan en los métodos de iluminación tradicional. Esta propiedad les proporciona una mayor eficiencia y permite reducir los costes.
- **Tamaño:** los ledes pueden ser muy pequeños (menos de 2 mm<sup>2</sup><sup>139</sup>) y por ello pueden conectarse fácilmente a las placas de los circuitos impresos.
- **Tiempo de calentamiento:** los ledes se encienden muy rápidamente. Un indicador led rojo típico alcanzará el brillo máximo en menos de un microsegundo.<sup>140</sup> Los ledes utilizados en los dispositivos de comunicaciones pueden presentar tiempos de respuesta aún más cortos.

- **Ciclos:** los ledes son ideales en las aplicaciones sujetas a frecuentes ciclos de encendido y apagados, a diferencia de las lámparas incandescentes y fluorescentes que fallan cuando se usan en esta opción, o como las lámparas de alta intensidad de descarga (lámparas HID) que requieren mucho tiempo de espera antes de reiniciarse el encendido.
- **Oscurecimiento:** los ledes pueden oscurecerse fácilmente por modulación por ancho de pulsos o por disminución de la corriente directa.<sup>141</sup> La modulación del ancho de los pulsos es la razón por la cual las luces led, en particular los faros de los automóviles parecen estar parpadeando cuando son vistos a través de una cámara o por algunas personas. Es un caso de efecto estroboscópico.
- **Luz fría:** a diferencia de la mayoría de fuentes de luz, los ledes irradian muy poco calor en forma de radiación infrarroja la cual puede dañar objetos o tejidos sensibles. La energía perdida desaparece en forma de calor en la base del led.
- **Desgaste lento:** la mayoría de los ledes se van dañando lentamente con el tiempo, a diferencia de las bombillas incandescentes que se deterioran de forma abrupta.
- **Vida útil:** los ledes pueden tener una vida útil relativamente larga. Un informe estima que entre 35.000 y 50.000 horas de vida útil, aunque el tiempo normalmente transcurrido hasta que el producto deja de funcionar completamente suele ser mayor.<sup>142</sup> Los tubos fluorescentes tienen una vida útil estimada de 10 000 a 15 000 horas, dependiendo en parte de las condiciones de uso, y las bombillas incandescentes de 1000 a 2000 horas. Varias manifestaciones del DOE han demostrado que más que el ahorro de energía, la reducción de los costes de mantenimiento durante esta vida útil tan extendida, constituye el factor principal para la determinación del periodo de recuperación de la inversión para un producto led.<sup>143</sup>
- **Resistencia a los golpes:** los ledes son componentes de estado sólido y, por tanto, son difíciles de dañar con golpes externos, a diferencia de las lámparas fluorescentes e incandescentes, que son frágiles.
- **Enfoque:** un sistema de ledes se puede diseñar para poder enfocar la luz. Las fuentes incandescentes y fluorescentes requieren, a menudo, un reflector externo para recoger la luz y dirigirla de una forma apropiada. En los sistemas de ledes más grandes, las lentes de reflexión interna total (TIR) se suelen usar para conseguir el mismo efecto. Sin embargo cuando se necesitan grandes cantidades de luz, se suelen desplegar muchas fuentes de luz, que son difíciles de enfocar o colimar hacia el mismo lugar.

## Inconvenientes

- **Precio inicial:** los ledes son actualmente un poco más caros (precio por lumen) que otras tecnologías de iluminación. En marzo de 2014 un fabricante afirmó haber alcanzado ya el precio de un dólar por kilolumen.<sup>144</sup> El gasto adicional proviene en parte de una emisión de luz relativamente baja, de los circuitos de accionamiento y de las fuentes de alimentación que se requieren.
- **Dependencia de la temperatura:** el rendimiento del led depende en gran medida de la temperatura ambiente del entorno, o de los procedimientos utilizados para la gestión térmica. La sobrecarga de un led en un ambiente de temperatura elevada

puede dar lugar a un sobrecalentamiento del conjunto de los ledes, y a un fallo del dispositivo de iluminación. Es necesario utilizar un disipador de calor adecuado para asegurar una vida útil larga. Esto es especialmente importante en las aplicaciones automotoras, médicas y militares donde los dispositivos deben operar dentro de una amplia gama de temperaturas, y con unos bajos índices de error. Toshiba ha fabricado ledes con un margen de temperatura de operación de -40 a 100 °C, que se adapta tanto para facilitar su uso en interiores como en exteriores y en aplicaciones tales como lámparas, luces de techo, luces de calle y focos.

- **Sensibilidad con la tensión:** los ledes deben ser suministrados para trabajar con una tensión superior a su voltaje umbral y con una corriente por debajo de su valor nominal. Tanto la corriente como la vida útil cambian de manera importante con un pequeño cambio en la tensión aplicada. Por lo tanto, requieren una corriente de suministro regulada (por lo general basta con una resistencia en serie para los indicadores con ledes).<sup>145</sup>
- **Reproducción del color:** la mayoría de los ledes de color blanco frío presentan espectros que difieren significativamente del espectro de irradiación del cuerpo negro como son el Sol o una lámpara incandescente. El pico a 460nm y la depresión a 500nm pueden hacer que el color de los objetos se perciba de forma diferente bajo la iluminación de un led de color blanco frío que bajo la luz solar o las fuentes de luz incandescentes, debido al metamerismo.<sup>146</sup> Los ledes de blanco frío basados en fósforos reproducen especialmente mal las superficies rojas.
- **Área asociada a la fuente de luz:** los ledes individuales no se aproximan a una fente puntual de luz que proporciona una distribución de luz esférica, sino más bien una distribución lambertiana. Los ledes se aplican con dificultad a los casos donde son necesarios campos de luz esféricos, sin embargo, los campos luminosos pueden ser manipulados mediante la aplicación de diferentes procedimientos ópticos o de "lentes". Los ledes no pueden proporcionar divergencias por debajo de unos pocos grados. Por el contrario, los láseres pueden emitir haces con divergencias de 0,2 grados o menos.<sup>147</sup>
- **Polaridad eléctrica:** a diferencia de las bombillas incandescentes, que se iluminan independientemente de la polaridad eléctrica, los ledes solo se encenderán empleando la polaridad eléctrica correcta. Para ajustar automáticamente la polaridad de la fuente de alimentación de los dispositivos led, se pueden utilizar rectificadores.
- **Peligro del azul:** existe la preocupación de que los ledes azules y los ledes de color blanco frío sean capaces de superar los límites de seguridad establecidos mediante el llamado peligro de la luz azul según se define en las especificaciones de seguridad ocular como la norma IEC 62471.<sup>148 149 150</sup>
- **Contaminación lumínica en exteriores:** los ledes blancos, especialmente los que presentan una elevada temperatura de color, emiten luz de longitud de onda mucho más corta que las fuentes de luz convencionales al aire libre, como las lámparas de vapor de sodio de alta presión. Por otro lado, hay que tener en cuenta además la mayor sensibilidad de nuestra visión al azul y al verde en visión escotópica y, por tanto, desplazada en el espectro visible hacia colores 'fríos' falseando, por tanto, la apreciación de los colores 'cálidos' (hacia el naranja y el rojo). Como consecuencia, los ledes blancos utilizados en las iluminaciones de exteriores provocan, en visión escotópica, más resplandor nocturno del cielo y con ello generan más contaminación lumínica.<sup>151 152 153 154 155 156</sup> La Asociación Médica Americana advirtió sobre el uso de ledes blancos de alto contenido de azul en la iluminación pública, debido a su

mayor impacto en la salud humana y el medio ambiente, en comparación con las fuentes de luz de bajo contenido azul (por ejemplo, las de Sodio de Alta Presión, los ledes ámbar de los ordenadores y los ledes de baja temperatura de color.<sup>157</sup>

- **Disminución de la eficiencia:** la eficiencia de los ledes disminuye a medida que aumenta la corriente eléctrica. El calentamiento también aumenta con las corrientes más elevadas, lo que compromete la vida útil de los ledes. Estos efectos imponen límites prácticos a los valores de la corriente de los ledes en las aplicaciones de alta potencia.<sup>158</sup>
- **Impacto en los insectos:** los ledes son mucho más atractivos para los insectos que las luces de vapor de sodio, lo que ha creado una preocupación por la posibilidad de provocar una perturbación de sus redes alimenticias.<sup>159 160</sup>
- **Uso en condiciones invernales:** dado que los ledes no emiten mucho calor en comparación con las lámparas incandescentes, las luces led utilizadas para el control de tráfico pueden permanecer cubiertas de nieve lo que las oscurece, y puede llegar a provocar accidentes.<sup>161 162</sup>

## Aplicaciones

---

### Indicadores y lámparas de señales

El bajo consumo de energía, la poca necesidad de mantenimiento y el tamaño pequeño de los ledes ha propiciado su uso como indicadores de estado y visualización en una gran variedad de equipos e instalaciones. Las pantallas led de gran superficie se utilizan para retransmitir el juego en los estadios, como pantallas decorativas dinámicas y como señales de mensajes dinámicos en las autopistas. Las pantallas ligeras y delgadas con mensajes se utilizan en los aeropuertos y estaciones de ferrocarril y como paneles de información de destinos en los trenes, autobuses, tranvías y transbordadores.

Las luces de un solo color son adecuadas para los semáforos, las señales de tráfico, los letreros de salida, la iluminación de emergencia de los vehículos, las luces de navegación, los faros (los índices estándar de cromaticidad y de luminancia fueron establecidos en el Convenio Internacional de Prevención de Colisiones en el Mar de 1972 Anexo 1 y por la Comisión Internacional de Iluminación o CIE) y las luces de Navidad compuestas de ledes. En regiones de climas fríos, los semáforos led pueden permanecer cubiertos de nieve.<sup>163</sup> Se usan ledes rojos o amarillos en indicadores y pantallas alfanuméricas, en ambientes donde se debe mantener una visión nocturna: cabinas de aviones, puentes submarinos y de buques, observatorios astronómicos y en el campo por ejemplo para la observación de animales durante la noche y aplicaciones militares del campo.

Dada su larga vida útil, sus tiempos de conmutación rápidos y su capacidad para ser vistos a plena luz del día debido a su alta intensidad y concentración, desde hace algún tiempo se vienen utilizando ledes para las luces de freno de automóviles, camiones y autobuses, y en las señales de cambio de dirección; muchos vehículos usan actualmente los ledes en sus conjuntos de luminosas traseras. El uso en los frenos mejora la seguridad debido a la gran reducción en el tiempo requerido para un encendido completo, es decir por el hecho de presentar un tiempo de subida más corto, hasta 0.5 segundos más rápido que una bombilla



Ilustración de un semáforo con ledes rojo, amarillo y verde

incandescente. Esto proporciona más tiempo de reacción para los conductores de atrás. En un circuito de dos intensidades (luces de posición traseras y frenos) si los ledes no son accionados con una frecuencia suficientemente rápida, pueden crear una matriz fantasma, donde las imágenes fantasma del led aparecerán si los ojos se desplazan rápidamente por la disposición de luces. Los faros provistos de ledes blancos están empezando a utilizarse. El uso de los ledes tiene ventajas de estilo porque pueden formar haces de luz mucho más delgados que las lámparas incandescentes provistas de reflectores parabólicos.

Los ledes de baja potencia resultan relativamente muy económicos y permiten su utilización en objetos luminosos de vida corta como son los autoadhesivos luminosos, los objetos de usar y tirar y el tejido fotónico Lumalive. Los artistas también usan los ledes para el llamado arte led. Los receptores de radio meteorológicos y de socorro con mensajes de área codificados (SAME) disponen de tres ledes: rojo para alarmas, naranja para atención y amarillo para avisos, indicaciones e informes.

## Iluminación

Para alentar el cambio a las lámparas de ledes, el Departamento de Energía de los Estados Unidos ha creado el premio L. La bombilla led Philips Lighting North America ganó el primer premio el 3 de agosto de 2011 después de completar con éxito 18 meses de pruebas intensivas de campo, laboratorio y producto.<sup>164</sup>

Los ledes se utilizan como luces de la calle y en iluminación arquitectónica. La robustez mecánica y la vida útil larga se utilizan en la iluminación automotriz en los coches, las motocicletas y las luces de la bicicleta. La emisión de luz led puede controlarse eficazmente mediante el uso de principios ópticos de no imagen.

En 2007, el pueblo italiano de Torraca fue el primer lugar en convertir todo su sistema de iluminación en led.<sup>165</sup> Los ledes se utilizan también en la aviación, Airbus ha utilizado la iluminación led en su Airbus A320 desde 2007, y Boeing utiliza la iluminación led en el 787. Los ledes también se utilizan ahora en el aeropuerto y la iluminación del helipuerto. Los aparatos de aeropuerto de ledes incluyen actualmente luces de pista de media intensidad, luces en la línea central de la pista, en la línea central de la calle de rodaje y luces en el borde.

Los ledes también se utilizan como fuente de luz para proyectores DLP y para iluminar los televisores LCD (conocidos como televisores led) y las pantallas para ordenadores portátiles. Los ledes RGB elevan la gama de colores hasta en un 45%. Las pantallas para TV y pantallas de ordenador pueden ser más delgadas usando ledes para retroiluminación.<sup>166</sup> La falta de radiación infrarroja o térmica hace que los ledes sean ideales para luces de escenario con bancos de ledes RGB que pueden cambiar fácilmente de color y disminuir el calentamiento de la iluminación, así como la iluminación médica donde la radiación IR puede ser dañina. En la conservación de la energía, hay una menor producción de calor al utilizar ledes.

Además son pequeños, duraderos y necesitan poca potencia, por lo que se utilizan en dispositivos portátiles como linternas. Las luces estroboscópicas led o los flashes de la cámara funcionan a una tensión segura y baja, en lugar de los 250+ voltios que se encuentran comúnmente en la iluminación basada en flash de xenón. Esto es especialmente útil en las cámaras de teléfonos móviles. Los ledes se utilizan para la iluminación infrarroja en los usos de la visión nocturna incluyendo cámaras de seguridad. Un anillo de ledes alrededor de una cámara de vídeo dirigido hacia adelante en un fondo retroreflectante, permite la codificación de croma en producciones de video.

Los ledes se utilizan en las operaciones mineras, como lámparas de tapa para proporcionar luz a los mineros. Se han realizado investigaciones para mejorar los ledes de la minería, reducir el deslumbramiento y aumentar la iluminación, reduciendo el riesgo de lesiones a los mineros.<sup>167</sup>



Los ledes se usan ahora comúnmente en todas las áreas de mercado, desde el uso comercial hasta el uso doméstico: iluminación estándar, teatral, arquitectónico , instalaciones públicas, y donde se utilice luz artificial.

Los ledes están encontrando cada vez más usos en aplicaciones médicas y educativas, por ejemplo como mejora del estado de ánimo, y nuevas tecnologías tales como AmBX, explotando la versatilidad del led. La NASA ha patrocinado incluso la investigación para el uso de ledes para promover salud para los astronautas.<sup>168</sup>

## Comunicaciones ópticas. Transferencia de datos y otras comunicaciones

*Véase también: Lifi*

La luz puede utilizarse para transmitir datos y señales analógicas. Por ejemplo, los ledes blancos pueden ser utilizados en sistemas para ayudar a la gente a orientarse en espacios cerrados con el objetivo de localizar disposiciones u objetos.<sup>169</sup>

Los dispositivos de audición asistida de muchos teatros y espacios similares utilizan matrices de ledes infrarrojos para enviar el sonido a los receptores de los espectadores. Los ledes (y también los láseres de semiconductor) se utilizan para enviar datos a través de muchos tipos de cable de fibra óptica. Desde los cables TOSLINK para la transmisión de audio digital hasta a los enlaces de fibra de ancho de banda muy elevado que constituyen la espina dorsal de Internet. Durante algún tiempo los ordenadores estuvieron equipados con interfaces IrDA, que les permitían enviar y recibir datos de los equipos próximos mediante radiación infrarroja.

Debido a que los ledes pueden encenderse y apagarse millones de veces por segundo, requieren disponer de un ancho de banda muy alto para la transmisión de datos.<sup>170 171</sup>

## Iluminación sostenible

La eficiencia en la iluminación es algo necesario para la arquitectura sostenible. En 2009, las pruebas realizadas con bombillas led por el Departamento de Energía de los Estados Unidos mostraban una eficiencia media desde 35 lm/W, por debajo, por tanto, de la eficiencia de las LFC, hasta valores tan bajos como 9 lm/W, peores que las bombillas incandescentes. Una bombilla led típica de 13 vatios emitía de 450 a 650 lúmenes,<sup>172</sup> que equivalía a una bombilla incandescente estándar de 40 vatios.

En cualquier caso, en 2011 existían bombillas led con una eficiencia de 150 lm/W, e incluso los modelos de gama baja llegaban a exceder los 50 lm/W, por lo que un led de 6 vatios podía alcanzar los mismos resultados que una bombilla incandescente estándar de 40 vatios. Estas últimas tienen una durabilidad de 1000 horas mientras que un led puede seguir operando a una menor eficiencia durante más de 50.000 horas.<sup>173</sup>

Tabla comparativa de led-LFC-bombilla incandescente:

	Led	CFL	Bombilla incandescente
Vida	50,000 horas	10,000 horas	1,200 horas
Vatios por bombilla	10	14	60
Coste por bombilla	\$2.00	\$7.00	\$1.25
kW consumidos en 50,000 horas	500	700	3000
Coste Eléctrico (\$0.10/kW)	\$50	\$70	\$300
Bombillas necesarias para completar 50.000 horas de luz	1	5	42
Gasto en bombillas para 50.000 horas de luz	\$2.00	\$35.00	\$52.50
Coste total para 50.000 horas de luz	\$52.00	\$105.00	\$352.50

## Consumo de energía

La reducción en el consumo de energía eléctrica que se consigue con una iluminación basada en led es importante cuando se compara con la iluminación por incandescencia. Además, esta reducción también se manifiesta como una notable disminución de daño al medio ambiente. Cada país presenta un panorama energético diferente y, por tanto, aunque la repercusión en el consumo energético sea el mismo, la producción de gases nocivos para el medio ambiente puede fluctuar algo de unos a otros. En lo que respecta al consumo se puede tomar como muestra una bombilla incandescente convencional de 40 watios. Una producción luminosa equivalente se puede obtener con un sistema de ledes de 6 vatios de potencia. Utilizando, pues, el sistema de ledes en lugar de bombillas incandescentes, se puede reducir el consumo energético en más de un 85%. En cuanto al ahorro en el impacto ambiental es posible cuantificarlo para cualquier país si se conoce la producción de CO<sub>2</sub> por cada kW por hora. En el caso concreto de España se sabe que el mix energético de la red eléctrica española ha producido unos 308 g de CO<sub>2</sub>/kWh en 2016. Se supone para el cálculo que tanto la bombilla como el conjunto led han funcionado durante 10 horas al día a lo largo de todo el año 2016.<sup>174</sup> Las energías consumidas han sido de 146 kW-hora por parte de la bombilla incandescente y de 21.6 kW-hora por parte del conjunto led. La energía eléctrica consumida se puede traducir a kg de CO<sub>2</sub> producidos al año. En el primer caso se ha llevado a cabo la generación de unos 45 kg de CO<sub>2</sub> mientras que en el segundo caso la producción de CO<sub>2</sub> ha quedado reducida a 6.75 kg.

## Fuentes de luz para sistemas de visión artificial

Los sistemas de visión industriales suelen requerir una iluminación homogénea para poder enfocar sobre rasgos de la imagen de interés. Este es uno de los usos más frecuentes de las luces led, y seguramente se mantenga así haciendo bajar los precios de los sistemas basados en la señalización lumínica. Los escáneres de código de barras son el ejemplo más común de sistemas de visión, muchos de estos productos de bajo coste utilizan ledes en vez de láseres.<sup>175</sup> Los ratones de ordenador ópticos también utilizan ledes para su sistema de visión, ya que proporcionan una fuente de luz uniforme sobre la superficie para la cámara en miniatura dentro del ratón. De hecho, los ledes constituyen una fuente de luz casi ideal para los sistemas de visión por los siguientes motivos:

- El tamaño del campo iluminado suele ser comparativamente pequeño y los sistemas de visión artificial a menudo son bastante caros, por lo que el coste de la fuente de luz suele ser una preocupación menor. Sin embargo, puede no ser fácil reemplazar una fuente de luz rota dentro de una maquinaria compleja; en este caso la larga vida útil de los ledes es un beneficio.

- Los componentes de los ledes tienden a ser pequeños y pueden colocarse con alta densidad sobre sustratos de superficies planas o uniformes (PCB, etc.) de modo que se puedan diseñar fuentes luminosas y homogéneas que dirigen luz desde direcciones controladas de forma estricta en partes inspeccionadas. Esto a menudo se puede obtener con lentes pequeñas y de bajo coste y con difusores, ayudando a lograr altas densidades de luz con control sobre los niveles de iluminación y homogeneidad. Las fuentes led pueden configurarse de varias formas (focos para iluminación reflectante, luces de anillo para iluminación coaxial, luces de fondo para iluminación de contorno, montajes lineales, paneles planos de gran formato, fuentes de domo para iluminación omnidireccional difusa).
- Los ledes pueden ser fácilmente estroboscópicos (en el rango de microsegundos y por debajo) y sincronizados con imágenes. Los ledes de alta potencia están disponibles para permitir imágenes bien iluminadas, incluso con pulsos de luz muy cortos. Esto se utiliza con frecuencia para obtener imágenes nítidas y nítidas de las partes que se mueven rápidamente.
- Los ledes vienen en varios colores y longitudes de onda, permitiendo el uso fácil del mejor color para cada necesidad, donde el color diferente puede proporcionar una mejor visibilidad de características del interés. Tener un espectro precisamente conocido permite utilizar filtros estrechamente emparejados para separar el ancho de banda informativo o para reducir los efectos perturbadores de la luz ambiente. Los ledes usualmente operan a temperaturas de trabajo comparativamente bajas, simplificando el manejo del calor y la disipación. Esto permite el uso de lentes de plástico, filtros y difusores. Las unidades impermeables también se pueden diseñar fácilmente, permitiendo el uso en ambientes áridos o húmedos (alimento, bebida, industrias del aceite).

## Medicina y biología

La sanidad se ha hecho eco de las ventajas de los ledes frente a otros tipos de iluminación y los ha incorporado en su equipamiento de última generación. Las ventajas ofrecidas por los ledes en su estado de desarrollo actual han propiciado su rápida difusión en el mundo del instrumental para el diagnóstico y apoyo en los procedimientos médicos y quirúrgicos. Las ventajas apreciadas por los profesionales de la medicina son las siguientes:

- El tamaño pequeño de las fuentes de luz que, en general, pueden venir asociadas a guías de luz muy delgadas y flexibles lo que les permite su desplazamiento por el interior de catéteres también delgados.
- La inexistencia de radiación infrarroja acompañante, lo que permite que se les asocie el calificativo de *luz fría*. El calor desprendido por otro tipo de fuentes luminosas dificultaba a impedía su uso en determinadas observaciones de diagnóstico o intervenciones quirúrgicas.
- La tonalidad blanca que suele ser la predilecta para las observaciones médicas. Debe tratarse de un color blanco natural capaz de presentar todos los colores sin problemas de metamerismo. El color natural de los tejidos así iluminados así favorece el diagnóstico correcto del campo observado.
- La intensidad luminosa elevada alcanzable por estas fuentes de luz.

## Diagnóstico y visión

Con base en las ideas anteriores, los endoscopios actuales están dotados de iluminación led. La técnica endoscópica abarca muchas especialidades médicas, por ejemplo gastroscoopia, colonoscopia, laringoscopia, otoscopia o artroscopia. Todas estas técnicas permiten la observación de órganos y sistemas del cuerpo humano mediante el uso de cámaras miniatura de video. Se pueden también emplear en las intervenciones

quirúrgicas o para efectuar diagnósticos. Los equipos también se conocen como videoscopios o videoendoscopios. Los hay rígidos o flexibles según las necesidades. La fibra la óptica se adapta a cada caso en particular. Por otro lado las luminarias de los quirófanos y clínicas odontológicas son actualmente de ledes. Satisfacen a la perfección todos los requerimientos técnicos y sanitarios para su utilización. Se aprecia especialmente la obtención de una iluminación blanca, natural, brillante (más de ciento cincuenta mil candelas a un metro de distancia del campo de la operación), sin sombras y sin emisiones infrarrojas o ultravioleta que podían afectar tanto al paciente como al personal médico que participa en la intervención.

Otro tanto sucede con las lámparas frontales de los cirujanos y odontólogos dotadas de ledes, con las lámparas para exámenes médicos, para exploraciones e intervenciones oftalmológicas o par acirugía menor con lo que se puede afirmar que los ledes han llegado a abarcar todas las especialidades médicas. Las empresas ópticas dedicadas a la medicina han incorporado los ledes en sus equipos de observación, por ejemplo en los microscopios, obteniendo con ello muchas ventajas para el estudio de imágenes empleando las distintas técnicas (campo claro, contraste, fluorescencia), lo que pone de manifiesto en los campos publicitario y comercial. Los ledes se utilizan con éxito como sensores en pulsímetros o tensiómetros de oxígeno para medir la saturación de oxígeno.

## Terapia

La luz led se emplea en una técnica de tratamiento de la piel denominada fototerapia. Recordemos que la luz emitida por las diferentes aleaciones de semiconductores es muy monocromática. A cada uno de los colores (azul, amarillo, rojo, etc.) se le atribuye actividad prioritaria en un determinado proceso terapéutico, por ejemplo, favorecer la cicatrización (luz azul), atacar a determinada cepa de bacterias (varios colores), aclarar las manchas dérmicas (luz roja), etc. Muchos materiales y sistemas biológicos son sensibles o dependientes de la luz. Las luces de crecimiento emplean ledes para aumentar la fotosíntesis en las plantas. Las bacterias y los virus pueden eliminarse del agua y de otras sustancias mediante una esterilización con ledes UV.

## Industria

La industria ha adaptado los modelos de observación empleados en medicina para sus propias necesidades y los equipos reciben el nombre de endoscopios industriales o también boroscopios, flexoscopios o videoendoscopios. Puede observarse con ellos el interior de máquinas, motores, conductos, cavidades o armas sin necesidad de desmontarlos.

## Otras aplicaciones

La luz de los ledes puede ser modulada muy rápidamente por lo que se utilizan mucho en la fibra óptica y la comunicación óptica por el espacio libre. Esto incluye los controles remotos utilizados en televisiones, videograbadoras y ordenadores led. Los aisladores ópticos utilizan un led combinado con un fotodiodo o fototransistor para proporcionar una vía de señal con aislamiento eléctrico entre dos circuitos. Esto es especialmente útil en equipos médicos donde las señales de un circuito de sensores de baja tensión (normalmente alimentados por baterías) en contacto con un organismo vivo deben estar aisladas eléctricamente de cualquier posible fallo eléctrico en un dispositivo de monitorización que funcione a voltajes potencialmente peligrosos. Un optoisolador también permite que la información se transfiera entre circuitos que no comparten un potencial de tierra común.

Muchos sistemas de sensores dependen de la luz como fuente de señal. Los ledes suelen ser ideales como una fuente de luz debido a los requisitos de los sensores. Los ledes se utilizan como sensores de movimiento, por ejemplo en ratones ópticos de ordenadores. La barra de sensores de la Nintendo Wii utiliza

ledes infrarrojos. Los oxímetros de pulso los utilizan para medir la saturación de oxígeno. Algunos escáneres de mesa utilizan matrices de led RGB en lugar de la típica lámpara fluorescente de cátodo frío como fuente de luz. Tener el control de forma independiente de tres colores iluminados permite que el escáner se calibre para un balance de color más preciso y no hay necesidad de calentamiento. Además, sus sensores solo necesitan ser monocromáticos, ya que en cualquier momento la página escaneada solo se ilumina con un color de luz. Dado que los LED también pueden utilizarse como fotodiodos, se pueden usar también para la emisión de fotografías o para la detección. Esto podría ser utilizado, por ejemplo, en una pantalla táctil que registra la luz reflejada desde un dedo o un estilete.<sup>176</sup> Muchos materiales y sistemas biológicos son sensibles o dependen de la luz. Las luces para cultivo usan led para estimular la fotosíntesis en las plantas,<sup>177</sup> y las bacterias y los virus pueden ser eliminados del agua y otras sustancias que usan ledes UV para la esterilización.

Los ledes también se han utilizado como referencia de voltaje de calidad en circuitos electrónicos. En lugar de un diodo Zener en reguladores de baja tensión, se puede usar la caída de tensión directa (por ejemplo, aproximadamente 1,7 V para un led rojo normal). Los ledes rojos tienen la curva I / V más plana. Aunque la tensión directa del led es mucho más dependiente de la corriente que un diodo Zener, los diodos Zener con tensiones de ruptura por debajo de 3 V no están ampliamente disponibles.

La miniaturización progresiva de la tecnología de iluminación de bajo voltaje, como los ledes y los OLED, adecuados para incorporarse a materiales de bajo espesor, ha fomentado la experimentación en la combinación de fuentes de luz y superficies de revestimiento de paredes interiores.<sup>178</sup> Las nuevas posibilidades ofrecidas por estos desarrollos han llevado a algunos diseñadores y compañías, como Meystyle,<sup>179</sup> Ingo Maurer,<sup>180</sup> Lomox<sup>181</sup> y Philips<sup>182</sup> a investigar y desarrollar tecnologías propietarias de papel tapiz led, algunas de las cuales están actualmente disponibles para la compra comercial. Otras soluciones existen principalmente como prototipos o están en proceso de ser refinadas.

## Notas

---

1. Hasta 2001, el término se escribía en español como una sigla: con mayúsculas y sin plural (un LED, dos LED). Fue aceptado como sustantivo común por la Asociación de Academias de la Lengua Española en el *Diccionario de la lengua española*). Su plural es «ledes» (así como el plural de «red» es «redes»).

No se escribe más como acrónimo (LED), de manera análoga a las palabras lexicalizadas láser (plural láseres) no se escribe más como el acrónimo inglés *LASER* (*light amplification by stimulated emission of radiation*: 'amplificación de luz por emisión estimulada de radiación') o radar (plural radares) ya no se escribe más como el acrónimo inglés *RADAR* (*radio detection and ranging*: *detección y medición de distancias por radio*).

## Véase también

---

- OLED
- AMOLED
- Crystal LED
- Diodo láser
- Pantalla láser
- Fotodiodo
- Henry Joseph Round
- Tubo LED

## Referencias

---

1. MyLedpassion.com. «Biografía del capitán Henry Joseph Round por su contribución a la radio y a la invención de los ledes con 117 patentes» (<http://www.myledpassion.com/History/hj-round.htm>) (en inglés). Consultado el 28 de julio de 2017.
2. «The life and times of the LED — a 100-year history» ([https://web.archive.org/web/20120915034646/http://holly.orc.soton.ac.uk/fileadmin/downloads/100\\_years\\_of\\_optoelectronics\\_2.pdf](https://web.archive.org/web/20120915034646/http://holly.orc.soton.ac.uk/fileadmin/downloads/100_years_of_optoelectronics_2.pdf)). The Optoelectronics Research Centre, University of Southampton. abril de 2007. Archivado desde el original ([http://holly.orc.soton.ac.uk/fileadmin/downloads/100\\_years\\_of\\_optoelectronics\\_2.pdf](http://holly.orc.soton.ac.uk/fileadmin/downloads/100_years_of_optoelectronics_2.pdf)) el 15 de septiembre de 2012. Consultado el 4 de septiembre de 2012.
3. US Patent 3293513 (<http://www.freepatentsonline.com/3293513.pdf>), "Semiconductor Radiant Diode", James R. Biard and Gary Pittman, Filed on Aug. 8th, 1962, Issued on Dec. 20th, 1966.
4. «Inventor of Long-Lasting, Low-Heat Light Source Awarded \$500,000 Lemelson-MIT Prize for Invention» (<https://web.archive.org/web/20111009111042/http://web.mit.edu/invent/n-pressreleases/n-press-04LMP.html>). Washington, D.C. Massachusetts Institute of Technology. 21 de abril de 2004. Archivado desde el original (<http://web.mit.edu/invent/n-pressreleases/n-press-04LMP.html>) el 9 de octubre de 2011. Consultado el 21 de diciembre de 2011.
5. MIGUEL G. CORRAL (8 de octubre de 2014). «Nobel de Física para los padres de la revolución de las luces LED» (<https://www.elmundo.es/ciencia/2014/10/07/5433b1f9ca47410e098b4574.html>). *El mundo es*. Consultado el 12 de abril de 2021.
6. Real Academia Española y Asociación de Academias de la Lengua Española. «Led» (<http://dle.rae.es/led>). *Diccionario de la lengua española* (23.<sup>a</sup> edición).
7. «LED». *The American Heritage Science Dictionary* (Houghton Mifflin Company). 2005. led (<http://dictionary.reference.com/browse/led>) y LED (<http://www.thefreedictionary.com/LED>). Definiciones de LED en inglés. Consultado el 5 de mayo de 2017.
8. Moreno, I.; Sun, C. C. (2008). «Modeling the radiation pattern of LEDs». *Optics Express* **16** (3): 1808-1819. PMID 18542260 (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18542260>). doi:10.1364/OE.16.001808 (<https://dx.doi.org/10.1364/OE.16.001808>). Modelado del patrón de radiación de los LEDES. Consultado el 5 de mayo de 2017.
9. Technologyreview.es. «Unas pequeñas agujas para luchar contra el cáncer» (<http://www.technologyreview.es/s/1405/unas-pequenas-agujas-para-luchar-contra-el-cancer>). Consultado el julio de 2017.
10. Smart-lighting.es. «Centro IMEC. Ampliación de la Plataforma Silicio. Aplicaciones de computación cuántica» (<http://smart-lighting.es/centro-imec-amplia-plataforma-silicio-aplicaciones-computacion-cuantica/>). Consultado el julio de 2017.
11. Technologyreview.es. «Los puntos cuánticos dan un nuevo brillo a los portátiles» (<https://www.technologyreview.es/s/2903/los-puntos-cuanticos-dan-un-nuevo-brillo-los-portatiles>). Consultado el julio de 2017.
12. Xataka.com. «Televisores Qled es la nueva tecnología en televisores Samsung» (<http://www.xataka.com/televisores/qled-es-la-nueva-tecnologia-en-televisores-de-samsung-que-busca-igual-la-calidad-de-los-panel-es-oled>). Consultado el julio de 2017.
13. Savov, Vlad. «LED light bulbs are a smart upgrade whether or not they're 'smart' » (<http://www.theverge.com/circuitbreaker/2017/2/4/14507712/led-light-bulbs-good-idea>). *The Verge* (en inglés). Consultado el 8 de febrero de 2017.
14. United States Environmental Protection Agency. «Cleaning Up a Broken CFL» (<http://www.epa.gov/cfl/cleaning-broken-cfl>). epa.gov. Consultado el 30 de marzo de 2017.
15. Carlessi, F., MO Oliveira<sup>2</sup> HO Ando Junior, J. M. Neto, A. D. Spacek, V. L. Coelho, L. Schaeffer, H. Bordon, O. E. Perrone y A. S. Bretas. «Evaluation of Alternative Disposal and Replacement of Fluorescent Lamps» (<http://www.ufrgs.br/ldtm/publicacoes/Evaluation%20of%20Alternative%20Disposal%20and%20Replacement%20of%20Fluorescent%20Lamps.pdf>). International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'13). Consultado el 30 de marzo de 2017.
16. Margolin, J. «The Road to the Transistor» (<http://www.jmargolin.com/history/trans.htm>)

- .jmargolin. Consultado el 18 de octubre de 2016.
17. Round, H. J. «A Note on Carborundum» (<http://www.jmargolin.com/history/leds.pdf>). *Electrical World*. 19: 309. Consultado el 18 de octubre de 2016.
  18. Kroemer, Herbert (16 de septiembre de 2013). «"The Double-Heterostructure Concept: How It Got Started"». *Proceedings of the IEEE*. 101 (10): pp. 2184, 2183-2187. doi:10.1109/JPROC.2013.2274914 (<https://dx.doi.org/10.1109%2FJPROC.2013.2274914>).
  19. Okon, Thomas M., Biard, James R. (2015). «The First Practical LED» (<http://www.edison-techcenter.org/lighting/LED/TheFirstPracticalLED.pdf>). *EdisonTechCenter.org*. Edison Tech Center. Consultado el 19 de octubre de 2016..
  20. Matzen, W.T. «Semiconductor Single-Crystal Circuit Development» (<http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=AD0411614>). Texas Instruments Inc. Contract No. AF33(616)-6600, Rept. No ASD-TDR-63-281; March, 1963. Consultado el 19 de octubre de 2016..
  21. «Patent US3293513: Semiconductor Radiant Diode» (<https://patentimages.storage.googleapis.com/7d/90/87/4a6cb43a592c56/US3293513.pdf>) (en inglés). United States Patent Office. Consultado el 26 de agosto de 2018.
  22. Biard, James R., Pittman, G.E. «US3293513A» (<http://www.freepatentsonline.com/3293513.pdf>). *Semiconductor Radiant Diode*. Consultado el 24 de mayo de 2017.
  23. W.N., Carr, Pittman, G.E. (noviembre de 1963). «One-watt GaAs p-n junction infrared source» (<http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.1753837>). *Applied Physics Letters*: 3 (10): 173-175. doi:10.1063/1.1753837 (<https://dx.doi.org/10.1063%2F1.1753837>). Consultado el 19 de octubre de 2016.
  24. Holonyak Nick; Bevacqua, S. F (diciembre de 1962). «"Coherent (visible) light emission from Ga (As<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>) JUNCTIONS"» (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1962ApPhL...1...82H>). *Appl. Phys. Lett.* 1, 82. doi:10.1063/1.1753706 (<https://dx.doi.org/10.1063%2F1.1753706>).
  25. Perry, T. S. (1995). «"M. George Craford [biography]"». *IEEE Spectrum*. 32 (2): p 52-55. doi:10.1109/6.343989 (<https://dx.doi.org/10.1109%2F6.343989>).
  26. T. P. Pearsall; R. J. Capik; B. I. Miller; K. J. Bachmann (1976). «"Efficient lattice-matched double-heterostructure LEDs at 1.1  $\mu$ m from GaIn<sub>1-x</sub>AsP<sub>1-y</sub>"» (<http://citeweb.info/19760014595>). *Appl. Phys. Lett.* 28 (9). p. 499. doi:10.1063/1.88831 (<https://dx.doi.org/10.1063%2F1.88831>).
  27. Rostky, George (16 de marzo de 1997). «LEDs cast Monsanto in Unfamiliar Role» (<http://www.datamath.org/Display/Monsanto.htm>). *Electronic Engineering Times (EETimes)* (944). Este artículo trata sobre las negociaciones de las empresas HP y Monsanto en la fabricación de pantallas LED y diodos. Consultado el 14 diciembre de 2016.
  28. Schubert, E. Fred. (2003). «cap.1». *Light-Emitting Diodes ["Diodos Emisores de Luz: Investigación, Fabricación y Aplicaciones V"]*. Cambridge University Press. ISBN 0-8194-3956-8.
  29. US 3025589 ([https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=US&NR=3025589&KC=&FT=E&locale=en\\_EP#](https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=US&NR=3025589&KC=&FT=E&locale=en_EP#)), "Method of Manufacturing Semiconductor Devices". Patente del Procedimiento de Fabricación de Dispositivos Semiconductores. Consultado el 14 de diciembre 2016.
  30. Patent number: 3025589 (<https://www.google.com/patents/US3025589>) Concesión de la patente en marzo de 1962. Consultado el 14 de diciembre de 2016.
  31. Bausch, Jeffrey (diciembre de 2011). «The Long History of Light Emitting Diodes» ([http://www.electronicproducts.com/Optoelectronics/LEDs/The\\_long\\_history\\_of\\_light-emitting\\_diodes.aspx](http://www.electronicproducts.com/Optoelectronics/LEDs/The_long_history_of_light-emitting_diodes.aspx)). Hearst Business Communications.. Este artículo habla sobre la historia de los ledes desde el experimentador Henry Round en 1907 hasta nuestros días. Consultado el 14 de diciembre de 2016.
  32. Park, S. -I.; Xiong, Y.; Kim, R. -H.; Elvikis, P.; Meitl, M.; Kim, D. -H.; Wu, J.; Yoon, J.; Yu, C. -J.; Liu, Z.; Huang, Y.; Hwang, K. -C.; Ferreira, P.; Li, X.; Choquette, K.; Rogers, J. A. (2009). "Printed Assemblies of Inorganic Light-Emitting Diodes for Deformable and Semitransparent Displays". *Science*. 325



- (5943): 977-981. doi ([https://en.wikipedia.org/wiki/Digital\\_object\\_identifier](https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_object_identifier)): 10.1126/science.1175690 (<http://science.sciencemag.org/content/325/5943/977>). PMID ([https://en.wikipedia.org/wiki/PubMed#PubMed\\_identifier](https://en.wikipedia.org/wiki/PubMed#PubMed_identifier)) 19696346 (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19696346>). Artículo de la revista *Science* sobre los distintos montajes de diodos emisores de luz inorgánicos para pantallas deformables y semitransparentes. Consultado el 14 de diciembre de 2016.
33. LED Thermal Management (<http://www.lunaraccents.com/educational-LED-thermal-management.html>). Lunaraccents.com. Consultado el 14 de diciembre de 2016.
  34. Maruska; Rhines, Walden Clark (14 de mayo de 2015). «A modern perspective on the history of semiconductor nitride blue light sources» (<https://dx.doi.org/10.1016/j.sse.2015.04.010>). *Solid-State Electronics* **111** (septiembre 2015): 32-41. doi:10.1016/j.sse.2015.04.010 (<https://dx.doi.org/10.1016%2Fj.sse.2015.04.010>).
  35. Patel, Neel V. (9 de octubre de 2014). «Nobel Shocker: RCA Had the First Blue LED in 1972» (<http://spectrum.ieee.org/tech-talk/geek-life/history/rcas-forgotten-work-on-the-blue-led>). *IEEE Spectrum* (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Consultado el 14 de septiembre de 2015.
  36. «History & Milestones» (<http://www.cree.com/About-Cree/History-and-Milestones>). Cree. Consultado el 14 de septiembre de 2015.
  37. Nakamura, S.; Mukai, T.; Senoh, M. (1994). «Candela-Class High-Brightness InGaN/AlGaIn Double-Heterostructure Blue-Light-Emitting-Diodes». *Appl. Phys. Lett.* **64** (13): 1687. Bibcode:1994ApPhL..64.1687N (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1994ApPhL..64.1687N>). doi:10.1063/1.111832 (<https://dx.doi.org/10.1063%2F1.111832>).
  38. Nakamura, Shuji. «Development of the Blue Light-Emitting Diode» (<http://spie.org/x115688.xml>). SPIE Newsroom. Consultado el 28 de septiembre de 2015.
  39. «The Nobel Prize in Physics 2014 Isamu Akasaki, Hiroshi Amano, Shuji Nakamura» ([http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2014/press.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/press.html)). The Royal Swedish Academy of Sciences. Consultado el 30 de julio de 2017.
  40. Press Release ([http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2014/press.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/press.html)), Página web oficial de los Premios Nobel. Asaki, Amano y Nakamura obtuvieron el Premio Nobel de Física el 7 de octubre de 2014 por su contribución al Led Azul y a la tecnología de los ledes de alta potencia
  41. Dadgar, A.; Alam, A.; Riemann, T.; Bläsing, J.; Diez, A.; Poschenrieder, M.; Strassburg, M.; Heuken, M.; Christen, J.; Krost, A. (2001). «Crack-Free InGaIn/GaN Light Emitters on Si(111)». *Physica status solidi (a)* **188**: 155-158. doi:10.1002/1521-396X(200111)188:1<155::AID-PSSA155>3.0.CO;2-P (<https://dx.doi.org/10.1002%2F1521-396X%28200111%29188%3A1%3C155%3A%3AAID-PSSA155%3E3.0.CO%3B2-P>).
  42. Dadgar, A.; Poschenrieder, M.; Bläsing, J.; Fehse, K.; Diez, A.; Krost, A. (2002). «Thick, crack-free blue light-emitting diodes on Si(111) using low-temperature AlN interlayers and in situ Si<sub>x</sub>N<sub>y</sub> masking». *Applied Physics Letters* **80** (20): 3670. Bibcode:2002ApPhL..80.3670D (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2002ApPhL..80.3670D>). doi:10.1063/1.1479455 (<https://dx.doi.org/10.1063%2F1.1479455>).
  43. «Success in research: First gallium-nitride LED chips on silicon in pilot stage» ([https://web.archive.org/web/20120915034646/http://www.osram-os.de/osram\\_os/EN/Press/Press\\_Releases/Company\\_Information/2012/documents/OSRAM\\_PI\\_Production\\_GaNOnSi\\_e.pdf](https://web.archive.org/web/20120915034646/http://www.osram-os.de/osram_os/EN/Press/Press_Releases/Company_Information/2012/documents/OSRAM_PI_Production_GaNOnSi_e.pdf)). Archivado desde el original ([http://www.osram-os.de/osram\\_os/EN/Press/Press\\_Releases/Company\\_Information/2012/documents/OSRAM\\_PI\\_Production\\_GaNOnSi\\_e.pdf](http://www.osram-os.de/osram_os/EN/Press/Press_Releases/Company_Information/2012/documents/OSRAM_PI_Production_GaNOnSi_e.pdf)) el 15 de septiembre de 2012. Consultado el 30 de julio de 2017. www.osram.de 12-1-2012
  44. "Ley de Haitz". *Nature Photonics*. 1 (1): 23. 2007. Bibcode: 2007NaPho...1...23.. doi:10.1038/nphoton.2006.78. (<http://www.nature.com/nphoton/journal/v1/n1/full/nphoton.2006.78.html>)
  45. Nick, Morris. «[[https://en.wikipedia.org/wiki/Nature\\_Photonics\\_Nature\\_Photonics](https://en.wikipedia.org/wiki/Nature_Photonics_Nature_Photonics)]» (<http://www.electrooptics.com/features/junjul06/junjul06leds.html>). *Electrooptics.com*. Consultado el 17 de marzo de 2015.
  46. "La revolución de la iluminación LED". (<http://www.forbes.com/2008/02/27/incandescence>)

- nt-led-cfl-pf-guru\_in\_mm\_0227energy\_inl.html) Forbes. 27 de febrero de 2008.
47. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=15471> (<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=15471>) 2016-06-11 Led blanco y el incremento de la eficiencia lumínica
  48. Refracción — Ley de Snell (<http://interactagram.com/physics/optics/refraction/>). Interactagram.com. Consultado el 30 de julio de 2017.
  49. Mueller, Gerd (2000) *Electroluminescence I* (<https://books.google.com/books?id=2plxAU3tPj4C&lpg=PA67>), Academic Press, ISBN 0-12-752173-9, p. 67, "escape cone of light" from semiconductor, illustrations of light cones on p. 69
  50. E. Fred Shubert [1] (<http://www.ifsc.usp.br/~lavfis2/BancoApostilasImagens/ApConstantePlanck/ApCtePlanck2013/LIGHT-EMITTING%20DIODES.e-0521865387-2e.pdf>) 2nd Edition, Cambridge University Press (19 de junio de 2006) [2] (<https://en.wikipedia.org/wiki/Special:BookSources/0521865387>), cono de escape de luz; páginas 91-93, con diagramas en las páginas 94, 96 y 98.
  51. Capper, Peter; Mauk, Michael (2007). *Liquid phase epitaxy of electronic, optical, and optoelectronic materials* (<https://books.google.com/books?id=IfLGPRJDfqqC&lpg=PA389>). Wiley. p. 389. ISBN 0-470-85290-9. «faceted structures are of interest for solar cells, LEDs, thermophotovoltaic devices, and detectors in that nonplanar surfaces and facets can enhance optical coupling and light-trapping effects, [with example microphotograph of a faceted crystal substrate].»
  52. Dakin, John y Brown, Robert G. W. (eds.) *Handbook of optoelectronics, Volume 2* (<https://books.google.com/books?id=3GmcgZ-6YC&lpg=PA356>), Taylor & Francis, 2006 ISBN 0-7503-0646-7 p. 356, "Die shaping is a step towards the ideal solution, that of a point light source at the center of a spherical semiconductor die."
  53. Future Lighting Solutions. "All in 1 LED Lighting Solutions Guide" (<https://web.archive.org/web/20130314111003/http://www.philipslumileds.com/uploads/221/PG01-pdf>), pp. 14-23. Consultado en mayo de 2017
  54. Satoshi Ookubo "Nichia Unveils White LED with 150 lm/W Luminous Efficiency" ([http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS\\_EN/20061221/125713/](http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20061221/125713/)). Revista Nikkei Technology en línea. 21 de diciembre de 2006. Consultado en mayo de 2017.
  55. Hideyoshi Kume "Cree Sets New Record for White LED Efficiency" ([http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS\\_EN/20120423/214494/](http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20120423/214494/)), Revista Nikkei Technology en línea. 23 de abril de 2013. Consultado en mayo de 2017
  56. Cree Inc. "Cree First to Break 300 Lumens-Per-Watt Barrier" (<http://www.cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2014/March/300LPW-LED-barrier>), Noticias de Cree Inc. 26 de marzo de 2014. Consultado en mayo de 2017
  57. Laboratorio Nacional del Pacífico Noroeste DOE Solid-State Lighting CALIPER Program Summary of Results: Round 9 of Product Testing. ([http://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/caliper\\_round-9\\_summary.pdf](http://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/caliper_round-9_summary.pdf)) Departamento de Energía de EE.UU. octubre de 2009. Consultado en mayo de 2017.
  58. Keeping, S. Identifying the Causes of LED Efficiency Droop (<https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2011/oct/identifying-the-causes-of-led-efficiency-droop>) Digi-Key Electronics, 18 de octubre de 2011, Consultado en mayo de 2017.
  59. Stevenson, R. The LED's Dark Secret (<http://spectrum.ieee.org/semiconductors/optoelectronics/the-leds-dark-secret>) IEEE Spectrum, 1 de agosto de 2009.
  60. Universidad de California-Santa Bárbara Cause of LED efficiency droop finally revealed (<https://www.sciencedaily.com/releases/2013/04/130423102328.htm>) ScienceDaily, 23 de abril de 2013, Consultado en mayo de 2017.
  61. Energy Daily The LED's Dark Secret ([http://www.energy-daily.com/reports/The\\_LED\\_Dark\\_Secret\\_999.html](http://www.energy-daily.com/reports/The_LED_Dark_Secret_999.html)) 3 de agosto de 2009, Consultado en mayo de 2017
  62. Instituto Politécnico Rensselaer Smart Lighting: New LED Drops The 'Droop' (<http://www.sciencedaily.com/releases/2009/01/090113123718.htm>) ScienceDaily, 15 de enero de 2009, Consultado en mayo de 2017.
  63. Efremov, A.A.; Gorbunov, R.I.; Rebane, Y.T.; Tarkhin, D.V.; Shreter, Y.G.; Bochkareva, N.I.; Lavrinovich, D.A.

- "Effect of the joule heating on the quantum efficiency and choice of thermal conditions for high-power blue InGaN/GaN LEDs", SpringerLink, mayo de 2006, Semiconductores volumen 40, publicación 5, pags 605-610, doi:10.1134/S1063782606050162 (<https://link.springer.com/article/10.1134%2FS1063782606050162>)
64. McKinney, D. A Roadmap to Efficient Green-Blue-Ultraviolet Light-Emitting Diodes (<https://www.nrl.navy.mil/media/news-releases/2014/a-roadmap-to-efficient-green-blue-ultraviolet-light-emitting-diodes>) Archivado (<https://web.archive.org/web/20170801060911/https://www.nrl.navy.mil/media/news-releases/2014/a-roadmap-to-efficient-green-blue-ultraviolet-light-emitting-diodes>) el 1 de agosto de 2017 en Wayback Machine. Laboratorio de Investigación Naval de EE. UU., 19 de febrero de 2014, Consultado en mayo de 2017.
  65. Cooke, M. Enabling high-voltage InGaN LED operation with ceramic substrate ([http://www.semiconductor-today.com/news\\_items/2014/FEB/EPISTAR\\_110214.shtml](http://www.semiconductor-today.com/news_items/2014/FEB/EPISTAR_110214.shtml)) web semiconductorTODAY, 11 de febrero de 2014, Consultado en mayo de 2017.
  66. Departamento de energía de los EE. UU. Lifetime of White LEDs (<https://web.archive.org/web/20090410145015/http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/lifetime.html>) 10 de abril de 2009, Consultado en mayo de 2017.
  67. Narendran, N.; Gu, Y. "Life of LED-based white light sources" 22 de agosto de 2005, IEEE Xplore, Journal of Display Technology, volumen 1, publicación 1, pag.167. BibCode:2005JDisT...1..167N (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2005JDisT...1..167N>), doi:10.1109/JDT.2005.852510 (<http://dx.doi.org/10.1109/JDT.2005.852510>)
  68. Conway, K.M.; Bullough, J.D. Will LEDs transform traffic signals as they did exit signs? (<http://www.lrc.rpi.edu/resources/pdf/57-1999.pdf>) Conferencia anual del IESNA, 11 de agosto de 1999, Consultado en mayo de 2017.
  69. Lighting Research Centre Lighting Supermarket Freezers with LEDs ([http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/cr\\_freezers.asp](http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/cr_freezers.asp)) 2006, Consultado en mayo de 2017.
  70. Alliance for solid-state illumination systems and technologies Recommendations for testing and evaluating luminaires for refrigerated and freezer display cases (<http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/assist/pdf/AR-FreezerCaseTesting-Nov2008.pdf>) Assist recommends, volumen 5, publicación 1. noviembre 2008, Consultado en mayo de 2017.
  71. Lighting Research Centre "LED lighting in freezer cases" (<http://www.lrc.rpi.edu/programs/delta/pdf/FTDeltaFreezer.pdf>) Field Test Delta Snapshots Issue 2, diciembre de 2006, consultado en mayo de 2017.
  72. Lighting Research Centre LED Blue Taxiway Luminaires ([http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/cr\\_blueTaxiway.asp](http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/cr_blueTaxiway.asp)) 2007, Consultado en mayo de 2017.
  73. OSRAM GmbH. OSRAM: green LED ([http://catalog.osram-os.com/media/en/Graphics/00041987\\_0.pdf](http://catalog.osram-os.com/media/en/Graphics/00041987_0.pdf)) Archivado ([https://web.archive.org/web/20110721235412/http://catalog.osram-os.com/media/en/Graphics/00041987\\_0.pdf](https://web.archive.org/web/20110721235412/http://catalog.osram-os.com/media/en/Graphics/00041987_0.pdf)) el 21 de julio de 2011 en Wayback Machine.. osram-os.com. Consultado en 10 de diciembre de 2016.
  74. K. M. Lau LEDs on Silicon Substrates ([http://www.psdas.gov.hk/content/doc/2007-4-4/Symposium\\_Day%20%2003LAU%20-%202007-4-4.pdf](http://www.psdas.gov.hk/content/doc/2007-4-4/Symposium_Day%20%2003LAU%20-%202007-4-4.pdf)). Electronic and Computer Engineering Department, Hong Kong University of Science and Technology. Symposium de 2007. Consultado en 10 de diciembre de 2016.
  75. Koizumi, S.; Watanabe, K.; Hasegawa, M.; Kanda, H. (2001). «Ultraviolet Emission from a Diamond pn Junction». *Science* **292** (5523): 1899-1901. PMID 11397942 (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11397942>). doi:10.1126/science.1060258 (<https://dx.doi.org/10.1126%2Fscience.1060258>).
  76. Kubota, Y.; Watanabe, K.; Tsuda, O.; Taniguchi, T. (2007). «Deep Ultraviolet Light-Emitting Hexagonal Boron Nitride Synthesized at Atmospheric Pressure». *Science* **317** (5840): 932-934. PMID 17702939 (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17702939>). doi:10.1126/science.1144216 (<https://dx.doi.org/10.1126%2Fscience.1144216>).
  77. Watanabe, K.; Taniguchi, T.; Kanda, H. (2004). «Direct-bandgap properties and evidence for ultraviolet lasing of hexagonal boron nitride single crystal». *Nature Materials* **3** (6): 404-409. Bibcode:2004NatMa...3..404W (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2004NatMa...3..404W>). PMID 15156198 (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15156198/>)

- <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15156198>.  
doi:10.1038/nmat1134 (<https://dx.doi.org/10.1038%2Fnm1134>).
78. Taniyasu, Y.; Kasu, M.; Makimoto, T. (2006). «An aluminium nitride light-emitting diode with a wavelength of 210nanometres». *Nature* **441** (7091): 325-328. PMID 16710416 (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16710416>).  
doi:10.1038/nature04760 (<https://dx.doi.org/10.1038%2Fnature04760>).
  79. Dumé, Belle (17 de mayo de 2006). «LEDs move into the ultraviolet» (<http://physicsworld.com/cws/article/news/24926>).  
physicsworld.com. Consultado el 22 de mayo de 2017.
  80. How to Wire/Connect LEDs (<http://www.llamma.com/xbox360/mods/How%20to%20use%20an%20LED.htm>) Archivado (<https://web.archive.org/web/20120302033005/http://www.llamma.com/xbox360/mods/How%20to%20use%20an%20LED.htm>) el 2 de marzo de 2012 en Wayback Machine.. Llama.com. Consultado el 12 de diciembre de 2016.
  81. Klipstein, Don. LED types by Color, Brightness, and Chemistry (<http://donklipstein.com/ledc.html>). Donklipstein.com. Consultado el 18 de junio de 2011. Consultado el 22 de mayo de 2017.
  82. Patel, Neel V. "Nobel Shocker: RCA Had the First Blue LED in 1972" (<http://spectrum.ieee.org/tech-talk/geek-life/history/rcas-forgotten-work-on-the-blue-led>). *IEEE Spectrum*. 9 de octubre de 2014.
  83. Rogoway, mike "Oregon tech CEO says Nobel Prize in Physics overlooks the actual inventors" ([http://www.oregonlive.com/silicon-forest/index.ssf/2014/10/oregon\\_tech\\_ceo\\_says\\_nobel\\_pri.html](http://www.oregonlive.com/silicon-forest/index.ssf/2014/10/oregon_tech_ceo_says_nobel_pri.html)). *The Oregonian*. 16 de octubre 2014.
  84. Schubert, E. Fred *Light-emitting diodes 2nd ed.*, Cambridge University Press, 2006 ISBN 0-521-86538-7 pp. 16-17.
  85. Stevenson, D; Rhines, W; Maruska, H; Stevenson, D; Maruska, H; Rhines, W (12 de marzo de 1973). *Gallium nitride metal-semiconductor junction light emitting diode* (<https://patents.google.com/patent/US3819974>). Consultado el 20 de febrero de 2018.
  86. Cree, Inc. (2017). «History & Milestones» (<http://www.cree.com/About-Cree/History-and-Milestones>) (en inglés). cree.com. Consultado el 1 de marzo de 2017.
  87. Cree, Inc. «History & Milestones: Milestones» (<http://www.cree.com/About-Cree/History-and-Milestones/Milestones>) (en inglés). cree.com. Consultado el 1 de marzo de 2017.
  88. The Takeda Foundation (5 de abril de 2002). «GaN-based blue light emitting device development by Akasaki and Amano» (<http://www.takeda-foundation.jp/en/award/takeda/2002/fact/pdf/fact01.pdf>) (PDF). Takeda Award 2002 Achievement Facts Sheet. Consultado el 28 de noviembre de 2007.
  89. Moustakas, Theodore D. Patente USPTO n.º 5686738 (<http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?patentnumber=5686738>) "Highly insulating monocrystalline gallium nitride thin films " Fecha de publicación: 18 de marzo 1991
  90. Iwasa, Naruhito; Mukai, Takashi and Nakamura, Shuji Patente USPTO n.º 5578839 (<http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?patentnumber=5578839>) "Light-emitting gallium nitride-based compound semiconductor device" Issue date: 26 de noviembre de 1996
  91. Stoddard, Tim (13 de diciembre de 2002). «Green light on blue light: Blue light technology remains BU's intellectual property» (<https://www.bu.edu/bridge/archive/2002/12-13/bluelight.htm>). *B.U. Bridge, Week of 13 December 2002 · Vol. VI, No. 15*. Consultado el 1 de marzo de 2017.
  92. Desruisseaux, Paul 2006 Millennium technology prize awarded to UCSB's Shuji Nakamura (<http://www.ia.ucsb.edu/pa/display.aspx?pkey=1475>). la.ucsb.edu (15 de junio de 2006). Consultado el 22 de mayo de 2017.
  93. Overbye (7 de octubre de 2002). «Nobel Prize in Physics» (<http://www.nytimes.com/2014/10/08/science/isamu-akasaka-hiroshi-amano-and-shuji-nakamura-awarded-the-nobel-prize-in-physics.html>). Consultado el 22 de mayo de 2017.
  94. Nannini, Jessica B. «The Nobel Prize in Physics 2014 – Press release» ([http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2014/press.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/press.html)). nobelprize. Consultado el 22 de mayo de 2017.
  95. Webb, Jonathan (7 de octubre de 2014). «Invention of blue ledes wins physics Nobel» (<http://www.bbc.co.uk/news/science>



- environment-29518521). BBC News. Consultado el 22 de mayo de 2017.
96. Press Release ([http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2014/press.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/press.html)), Página web oficial de los Premios Nobel. Premio Nobel de Física 7 de octubre de 2014
  97. Brown, Joel (7 de diciembre de 2015). «BU Wins \$13 Million in Patent Infringement Suit» (<http://www.bu.edu/today/2015/bu-wins-13-million-in-patent-infringement-suit/>). *BU Today*. Consultado el 22 de mayo de 2017.
  98. Cooke, Mike (abril-mayo 2010). «Going Deep for UV Sterilization LEDs» (<https://web.archive.org/web/20130515030549/http://www.semiconductor-today.com/features/SemiconductorToday%20-%20Going%20deep%20for%20UV%20sterilization%20LEDs.pdf>). *Semiconductor Today* **5** (3): 82. Archivado desde el original (<http://www.semiconductor-today.com/features/SemiconductorToday%20-%20Going%20deep%20for%20UV%20sterilization%20LEDs.pdf>) el 15 de mayo de 2013.
  99. Mori, M.; Hamamoto, A.; Takahashi, A.; Nakano, M.; Wakikawa, N.; Tachibana, S.; Ikehara, T.; Nakaya, Y.; Akutagawa, M.; Kinouchi, Y. (2007). «Development of a new water sterilization device with a 365 nm UV-LED». *Medical & Biological Engineering & Computing* **45** (12): 1237-1241. PMID 17978842 (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17978842>). doi:10.1007/s11517-007-0263-1 (<https://dx.doi.org/10.1007/s11517-007-0263-1>).
  100. Moreno, I.; Contreras, U. (2007). "Distribución de color desde la formación de LED multicolor". *Optics Express*. **15** (6): 3607–3618. doi: 10.1364/OE.15.003607 (<https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-15-6-3607>). PMID 19532605 (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19532605>).
  101. Nimz, Thomas; Hailer, Fredrik; Jensen, Kevin (noviembre de 2012). *Sensors and Feedback Control of Multi-Color LED Systems (PDF)* (<http://www.mazet.de/en/downloads/product-customer-information/technical-articles/item/373-sensors-and-feedback-control-of-multi-color-led-systems.html>) Archivado (<https://web.archive.org/web/20170905143803/http://www.mazet.de/en/downloads/product-customer-information/technical-articles/item/373-sensors-and-feedback-control-of-multi-color-led-systems.html>) el 5 de septiembre de 2017 en Wayback Machine.. LED Professional. pp. 2-5. ISSN 1993-890X (<https://www.worldcat.org/title/led-professional-review-trends-technologie-for-future-lighting-solutions/oclc/934221874>).
  102. zyvex.com/nanotech. «Richard P. Feynman, 'Hay mucho espacio en el fondo: una invitación para entrar en un nuevo campo de la física' » (<http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>) (en inglés). Consultado el 25 de julio de 2017.
  103. R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Soltys, R. O. Carlson (1962). «Coherent Light Emission From GaAs Junctions» (<http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.9.366>). *Phys. Rev. Lett.* **9**: 366.
  104. L. Esaki, R. Tsu (1970). «Superlattice and Negative Differential Conductivity in Semiconductors» (<http://ieeexplore.ieee.org/document/5391729/>). *IBM J. Res. Devel.* **14**: 61.
  105. Arakawa, Y.; H. Sakaki (1982). «Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current» (<http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.92959>). =*Appl. Phys. Lett.* **40**: 939.
  106. Valledor-Llopis, J. C., Campo-Rodríguez, F. J., Ferrero-Martín, A. M., Coto-García, M. T., Fernández-Argüelles, J. M., Costa-Fernández, A. Sanz-Medel (2011). «Dynamic analysis of the photoenhancement process of colloidal quantum dots with different surface modifications» (<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-4484/22/38/385703/meta>). =*Nanotechnology* **22**: 385703.
  107. Con esta tecnología se inician, a partir del año 2002, aplicaciones para fabricar las pantallas de los dispositivos electrónicos (con LED de QD) (<http://web.mit.edu/newsoffice/2002/dot.html>) Instituto Tecnológico de Massachusetts, 18 de diciembre de 2002
  108. Neidhardt, H.; Wilhelm, L.; Zagrebnoy, V. A. (febrero de 2015). «A New Model for Quantum Dot Light Emitting-Absorbing Devices: Proofs and Supplements» (<http://nanojournal.ifmo.ru/en/articles-2/volume6/6-1/invited-speakers/paper01/>). *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics* **6** (1): 6-45. doi:10.17586/2220-8054-2015-6-1-6-45 (<https://dx.doi.org/10.17586/2220-8054-2015-6-1-6-45>). Consultado el 15 de mayo de 2017.

109. Colvin, V. L.; Schlamp, M. C.; Alivisatos, A. P. (1994). "Light-emitting diodes made from cadmium selenide nanocrystals and a semiconducting polymer". *Nature*. <http://www.nature.com/nature/journal/v370/n6488/abs/370354a0.html>  
implementación de Ledes creciendo nanocristales de seleniuro de cadmio y polímero semiconductor"
110. "Accidental Invention Points to End of Light Bulbs" (<http://www.livescience.com/428-accidental-invention-points-light-bulbs.html>). LiveScience.com. 21 de octubre de 2005. "Artículo de divulgación de la revista LiveScience que informa de como un graduado de la universidad de Vanderbilt, Michel Bowers realizó un descubrimiento accidental que amplió las posibilidades de los Ledes alcanzando un nuevo nivel. Descubrió primeramente que al aplicar una corriente a puntos cuánticos muy pequeños se producía luz más intensa y eficiente que la bombilla incandescente tradicional. Además, ayudado por otro estudiante graduado, Bowers consiguió, una emisión de luz blanca con otro procedimiento consistente en recubrir un led azul con una fina capa de poliuretano (Minwax) conteniendo puntos cuánticos que son excitados por el led azul "
111. Nanoco Signs Agreement with Major Japanese Electronics Company (<http://www.nanowerk.com/news/newsid=12743.php>), 23 de septiembre de 2009.
112. puntos cuánticos de alta eficiencia junio de 2012 (<http://noticiasdelaciencia.com/not/4431/puntos-cuanticos-de-alta-eficiencia-para-generar-luz-blanca/>)
113. Nanotechnologie Aktuell, pp. 98-99, v. 4, 2011, ISSN 1866-4997
114. Hoshino, K.; Gopal, A.; Glaz, M. S.; Vanden Bout, (2012). "Imagen de fluorescencia a nanoescala con electroluminiscencia de campo cercano de puntos cuánticos". <http://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.4739235>
115. What is the difference between 3528 LEDs and 5050 LEDs |SMD 5050 SMD 3528 (<https://www.flexfireleds.com/pages/Comparison-between-3528-LEDs-and-5050-LEDs.html>). Flexfireleds.com. Consultado en mayo de 2017.
116. LedBox.es. «La gestión térmica de los Ledes» (<https://blog.ledbox.es/informacion-led/gestion-termica-de-las-luminarias-led>). Consultado el 25 de abril de 2017.
117. Vilarrasa J. F., Calderón A. G. (2012). *Iluminación con tecnología LED*. Ed. Paraninfo (Madrid). pp. 24-25. ISBN 9788428333689..
118. Aaron Sims - The State Column, 10 de marzo de 2014. «Researchers build thinnest known LED» (<http://www.washington.edu/news/2014/03/10/scientists-build-thinnest-known-leds-to-be-stronger-more-energy-efficient/>) (en inglés). Consultado el 25 de julio de 2017.
119. "Luminus Products" (<https://web.archive.org/web/20080725033952/http://www.luminus.com/content1044>). Luminus Devices. Archivado del original el 25-05-2008. Recuperado el 21 de octubre de 2009.
120. "Luminus Products CST Series Datasheet" ([https://web.archive.org/web/20100331100545/http://www.luminus.com/stuff/contentmgr/files/0/7c8547b3575bcecc577525b80d210ac7/misc/pds\\_001314\\_rev\\_03\\_cst\\_90\\_w\\_product\\_datasheet\\_illumination.pdf](https://web.archive.org/web/20100331100545/http://www.luminus.com/stuff/contentmgr/files/0/7c8547b3575bcecc577525b80d210ac7/misc/pds_001314_rev_03_cst_90_w_product_datasheet_illumination.pdf)). Luminus Devices. Archivado del original el 31-03-2010. Recuperado el 25 de octubre de 2009.
121. Poensgen, Tobias (22 de enero, 2013) InfiniLed MicroLEDs achieve Ultra-High Intensity (<https://web.archive.org/web/20130506034212/http://www.infiniled.com/news/infiniledmicroledsachieveultra-highlightintensity>). Archivado del original el 6 de mayo de 2013.
122. «Xlamp Xp-G Led» ([https://web.archive.org/web/20120313082324/http://www.cree.com/products/xlamp\\_xpg.asp](https://web.archive.org/web/20120313082324/http://www.cree.com/products/xlamp_xpg.asp)). Cree.com. Archivado desde el original ([http://www.cree.com/products/xlamp\\_xpg.asp](http://www.cree.com/products/xlamp_xpg.asp)) el 13 de marzo de 2012. Consultado el 30 de julio de 2017.
123. High Power Point Source White **Leds** NVSx219A ([http://www.nichia.co.jp/en/about\\_nichia/2010/2010\\_110201.html](http://www.nichia.co.jp/en/about_nichia/2010/2010_110201.html)). Nichia.co.jp, 2 de noviembre de 2010.
124. <http://www.ledsmagazine.com/articles/2006/1semiconductor-launches-ac-led-lighting-source-acriche.html> **LEDs Magazine**. 17 de noviembre de 2006. Recuperado el 17 de febrero de 2008. 128. <https://web.archive.org/web/20130116003035/Blue-Rich-Light-White-Paper.pdf> (PDF). International Dark-Sky Association. 4 de mayo del 2010. Tomado del original (<http://darksky.org/assets/documents/Reports/IDA>

- Blue-Rich-Light-White-Paper.pdf) (PDF) el 16 de enero de 2013.
125. <https://web.archive.org/web/20130116003035/http://darksky.org/assets/documents/Reports/IDA-Blue-Rich-Light-White-Paper.pdf> (PDF). International Dark-Sky Association. 4 de mayo del 2010. Tomado del original (<http://darksky.org/assets/documents/Reports/IDA-Blue-Rich-Light-White-Paper.pdf>) (PDF) el 16 de enero de 2013. "Trata sobre el proceso físico de la iluminación al aire libre Blue-Rich White, cómo afecta a la visión de los humanos y al medio ambiente."
  126. «The Next Generation of LED Filament Bulbs» ([http://www.ledinside.com/knowledge/2015/2/the\\_next\\_generation\\_of\\_led\\_filament\\_bulbs](http://www.ledinside.com/knowledge/2015/2/the_next_generation_of_led_filament_bulbs)). Trendforce. LEDInside.com. Consultado el 4 de noviembre de 2016.
  127. «LED Filaments» ([https://www.youtube.com/watch?v=H\\_XiunR-cAQ](https://www.youtube.com/watch?v=H_XiunR-cAQ)). Consultado el 4 de noviembre de 2016.
  128. Cual es la diferencia entre 3528 ledes y 5050 Leds SMD 5050 SMD 3528 (<http://www.flexfireleds.com/pages/Comparison-between-3528-LEDs-and-5050-LEDs.html>). Flexfireleds.com. Visitado el 16 de marzo de 2017.
  129. *Elektrotechnik Gesamtband Technische Mathematik Kommunikationselektronik* (en alemán) (1ª edición). Westermann. 1997. p. 171. ISBN 3142212515. "Toda la banda eléctrica. Matemáticas técnicas. Electrónica de comunicaciones". Consultado el 14 de diciembre de 2016.
  130. «Fuentes de corriente constante» ([http://www.sc.ehu.es/sbweb/electronica/elec\\_basica/tema1/TEMA1.htm](http://www.sc.ehu.es/sbweb/electronica/elec_basica/tema1/TEMA1.htm)). Escuela de Ingeniería de Éibar, Universidad del País Vasco (España). Escuela de Ingeniería de Éibar, Universidad del País Vasco (España).. Revisado el 25 de julio de 2017.
  131. Schubert, E. Fred (2005). «Chapter 4». *Light-Emitting Diodes*. Cambridge University Press. ISBN 0-8194-3956-8. Libro "Diodos Emisores de Luz: Investigación, Fabricación y Aplicaciones V". Consultado el 14 de diciembre de 2016.
  132. "LEDES Riesgos Fotobiológicos" (<http://rafael-alvarezp.blogspot.com.es/2015/10/led-riesgos-fotobiologicos.html>). Recopilación de las distintas clasificaciones de riesgos fotobiológicos de los dispositivos LED. Consultado el 30 de julio.
  - Opinión de la Agencia Francesa de Seguridad Alimentaria, Medioambiental y Salud y Seguridad Ocupacional (ANSES) (<https://www.anses.fr/en/content/led-%E2%80%93-light-emitting-diodes>) Este artículo nos muestra la opinión de la Agencia Francesa de Seguridad Alimentaria, Medioambiental y Salud y Seguridad Ocupacional (ANSES) de 2010, sobre las cuestiones sanitarias relacionadas con los LEDs. Consultado el 30 de julio de 2017.
  134. "Guía de buenas prácticas NTP 261: Láseres: riesgos en su utilización (2017)" ([http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/201a300/ntp\\_261.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/201a300/ntp_261.pdf)) Archivado ([http://web.archive.org/web/20170517040602/http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/201a300/ntp\\_261.pdf](http://web.archive.org/web/20170517040602/http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/201a300/ntp_261.pdf)) el 17 de mayo de 2017 en Wayback Machine. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. MTAS (España). Consultado el 30 de julio de 2017.
  135. "Láseres: clases, riesgos y medidas de control" ([http://www.sprl.upv.es/IOP\\_RF\\_01%28a%29.htm](http://www.sprl.upv.es/IOP_RF_01%28a%29.htm)) Universidad Politécnica de Valencia (2017). Consultado el 30 de julio de 2017
  136. "Cabin lights take the heat off" (<http://www.controlengeneurope.com/article.aspx?ArticleID=12395>): Este artículo nos habla sobre la investigación de la empresa Beadlight para hacer los LEDs más seguros. Consultado el 30 de julio de 2017.
  137. Lim, S. R.; Kang, D.; Ogunseitan, O. A.; Schoenung, J. M. (2011). «Potential Environmental Impacts of Light-Emitting Diodes (LEDs): Metallic Resources, Toxicity, and Hazardous Waste Classification». *Environmental Science & Technology* **45** (1): 320-327 2017. PMID 21138290 (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21138290>). doi:10.1021/es101052q (<https://dx.doi.org/10.1021%2Fes101052q>).. Consultado el 7 de mayo de 2017.
  138. "Iluminación en estado sólido: comparación de los LEDs con fuentes de luz tradicionales" (<https://web.archive.org/web/20090505080533/http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/comparing.html>) eere.energy.gov. Archivado desde el original (<https://energy.gov/eere/ssl/solid-st>

- ate-lighting). Consultado el 4 de abril de 2017.
139. «Dialight Micro LED SMD LED "598 SERIES" Datasheet» ([https://web.archive.org/web/20090205040334/http://www.dialight.com/Assets/Brochures\\_And\\_Catalogs/Indication/MDEI5980603.pdf](https://web.archive.org/web/20090205040334/http://www.dialight.com/Assets/Brochures_And_Catalogs/Indication/MDEI5980603.pdf)) (PDF). Dialight.com. Archivado desde el original ([http://www.dialight.com/Assets/Brochures\\_And\\_Catalogs/Indication/MDEI5980603.pdf](http://www.dialight.com/Assets/Brochures_And_Catalogs/Indication/MDEI5980603.pdf)) el 5 de febrero de 2009.. Consultado el 4 de abril de 2017.
  140. «Data Sheet — HLMP-1301, T-1 (3 mm) Diffused LED Lamps» (<https://web.archive.org/web/20160920082417/http://www.avagotech.com/docs/AV02-1555EN>). Avago Technologies. Archivado desde el original (<http://www.avagotech.com/docs/AV02-1555EN>) el 20 de septiembre de 2016. Consultado el 5 de septiembre de 2017.. Consultado el 4 de abril de 2017.
  141. Narra, Prathyusha; Zinger, D.S. (2004). «An effective LED dimming approach». *Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE* **3**: 1671-1676. ISBN 0-7803-8486-5. doi:10.1109/IAS.2004.1348695 (<https://dx.doi.org/10.1109/2FIAS.2004.1348695>).. Consultado el 4 de abril de 2017.
  142. "Vida media de los LEDs blancos ([https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/lifetime\\_white\\_leds\\_aug16\\_r1.pdf](https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/lifetime_white_leds_aug16_r1.pdf)). Departamento de Energía de Estados Unidos. (PDF). Consultado el 4 de abril de 2017.
  143. Ventajas de la iluminación led (<http://energy.ltgovernors.com/in-depth-advantages-of-led-lighting.html>) energy.ltgovernors.com. Consultado 4 de abril de 2017.
  144. «Philips Lumileds» (<http://www.philipslumileds.com/uploads/news/id228/PR211.pdf>). Philipslumileds.com. 25 de marzo de 2014. Consultado el 4 de abril de 2017.
  145. The Led Museum (<http://ledmuseum.net/>). Consultado el 4 de abril de 2017.
  146. Worthey, James A. Cómo trabaja la luz blanca (<http://www.jimworthey.com/jimtalk2006feb.html>) LRO Lighting Research Symposium, Light and Color. Consultado el 4 de abril de 2017.
  147. Hecht, E. (2002). *Optics* (4 edición). Addison Wesley. p. 591. ISBN 0-19-510818-3. Hecht, E. (2002). *Optics* (4 ed.). Addison Wesley. p. 591. ISBN ([https://en.wikipedia.org/wiki/International\\_Standard\\_Book\\_Number](https://en.wikipedia.org/wiki/International_Standard_Book_Number)) 0-19-510818-3 (<https://en.wikipedia.org/wiki/Special:BookSources/0-19-510818-3>). Consultado el 4 de abril de 2017.
  148. CandelTEC.es. «Seguridad fotobiológica: norma IEC 62471» (<https://candeltecblog.wordpress.com/2016/05/10/seguridad-fotobiologica-norma-iec-62471/>). CandelTEC.. Consultado el 25 de julio de 2017.
  149. Blue LEDs: A health hazard? (<http://texyt.com/bright+blue+leds+annoyance+health+risks>) texyt.com. 15 de enero de 2007. Consultado el 4 de abril de 2017.
  150. Hue and timing determine whether rays are beneficial or detrimental (<https://web.archive.org/web/20070501051125/http://www.sciencenews.org/articles/20060527/bob9.asp>) Sciencenews.org. Archivado desde el original (<https://www.sciencenews.org/article/light-impacts>). Consultado el 4 de abril de 2017.
  151. Luminicaambiental.com. «Contaminación luminica-calidad-del-cielo» (<http://www.luminicaambiental.com/servicios/contaminacion-luminica-calidad-del-cielo/>). LuminicaAmbiental.. Consultado el 25 de julio de 2017.
  152. *Visibility, Environmental, and Astronomical Issues Associated with Blue-Rich White Outdoor Lighting* (<https://web.archive.org/web/20130116003035/http://darksky.org/assets/documents/Reports/IDA-Blue-Rich-Light-White-Paper.pdf>) (PDF). International Dark-Sky Association. 4 de mayo de 2010. Archivado desde el original (<http://www.darksky.org/assets/documents/Reports/IDA-Blue-Rich-Light-White-Paper.pdf>) el 16 de enero de 2013.. Consultado el 7 de abril de 2017
  153. Luginbuhl, C. (2014). «The impact of light source spectral power distribution on sky glow» (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022407313004792>). *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **139**: 21-26. doi:10.1016/j.jqsrt.2013.12.004 (<https://dx.doi.org/10.1016%2Fj.jqsrt.2013.12.004>).. Consultado el 4 de abril de 2017.
  154. Aubé, M.; Roby, J.; Kocifaj, M. (2013). «Evaluating Potential Spectral Impacts of Various Artificial Lights on Melatonin Suppression, Photosynthesis, and Star Visibility» (<http://journals.plos.org/plosone/a>






- rticle?id=10.1371/journal.pone.0067798). *PLOS ONE* **8** (7): e67798. PMC 3702543 (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3702543>). PMID 23861808 (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23861808>). doi:10.1371/journal.pone.0067798 (<https://dx.doi.org/10.1371%2Fjournal.pone.0067798>). Consultado el 4 de abril de 2017.
155. Crawford, Mark. «LED light pollution: Can we save energy and save the night?» (Contaminación de la luz LED: ¿Podemos salvar la energía y salvar la noche?)» (<http://spie.org/newsroom/1015-led-light-pollution?highlight=x2408&ArticleID=x115768>). SPIE Newsroom. Consultado el 4 de abril de 2017.
  156. Flagstaff Dark Skies Coalition. «Lamp Spectrum and Light Pollution» (<http://www.flagstaffdarkskies.org/for-wonks/lamp-spectrum-light-pollution/>). *Lamp Spectrum and Light Pollution*. Lamp Spectrum and Light Pollution.. Consultado el 4 de abril de 2017.
  157. «AMA Adopts Community Guidance to Reduce the Harmful Human and Environmental Effects of High Intensity Street Lighting» (<http://www.ama-assn.org/ama/pub/news/news/2016/2016-06-14-community-guidance-street-lighting.page?>). [ama-assn.org](http://www.ama-assn.org). Consultado el 4 de abril de 2017.
  158. Efremov, A. A.; Bochkareva, N. I.; Gorbunov, R. I.; Lavrinovich, D. A.; Rebane, Y. T.; Tarkhin, D. V.; Shreter, Y. G. (2006). "Effect of the joule heating on the quantum efficiency and choice of thermal conditions for high-power blue InGaN/GaN LEDs" (Efecto del Calentamiento Joule en la eficiencia cuántica y en la elección de las condiciones térmicas para los LEDs azules InGaN/GaN LED de alta potencia ). *Semiconductors*. **40** (5): 605–610. doi:10.1134/S1063782606050162 (<http://link.springer.com/article/10.1134%2FS1063782606050162>). Consultado el 4 de abril de 2017.
  159. «LEDs: Good for prizes, bad for insects» (<http://news.sciencemag.org/plants-animals/2014/10/leds-good-prizes-bad-insects>). [news.sciencemag.org](http://news.sciencemag.org). 7 de octubre de 2014. Consultado el 4 de abril de 2017.
  160. Pawson, S. M.; Bader, M. K.-F. (2014). «LED Lighting Increases the Ecological Impact of Light Pollution Irrespective of Color Temperature» (<http://www.esajournals.org/doi/full/10.1890/14-0468.1>). *Ecological Applications* **24** (7): 1561-1568. doi:10.1890/14-0468.1 (<https://dx.doi.org/10.1890%2F14-0468.1>). Consultado el 4 de abril de 2017.
  161. «Semáforos, Problema potencialmente mortal en invierno» (<http://abcnews.go.com/GMA/ConsumerNews/led-traffic-lights-unusual-potentially-deadly-winter-problem/story?id=9506449>). ABC News. Consultado el 4 de abril de 2017.
  162. Los semáforos con luz LED no pueden derretir el hielo o la nieve del invierno» (<http://www.cars.com/articles/2009/12/led-traffic-lights-cant-melt-snow-ice/>). Consultado el 4 de abril de 2017.
  163. Leds Magazine. «L Las ventajas del LED superan los riesgos potenciales de nieve en las señales de tráfico (inglés)» (<https://web.archive.org/web/20131115153928/http://ledsmagazine.com/news/7/1/4>) (en inglés). Archivado desde el original (<http://www.ledsmagazine.com/news/7/1/4>) el 15 de noviembre de 2013. Consultado el 7 de enero de 2017.
  164. «"L-Prize U.S. Department of Energy" » (<http://www.lightingprize.org/>) (en inglés). Consultado el 3 de agosto de 2017.
  165. «LED There Be Light» (<https://www.scientificamerican.com/article/led-there-be-light/>) (en inglés). Consultado el 19 de marzo de 2017.
  166. Eisenberg, Anne (24 de junio de 2007). «In Pursuit of Perfect TV Color, With L.E.D.'s and Lasers» (<http://www.nytimes.com/2007/06/24/business/yourmoney/24novel.html>) (en inglés). Consultado el 4 de febrero de 2017.
  167. «"CDC – NIOSH Publications and Products – Impact: NIOSH Light-Emitting Diode (LED) Cap Lamp Improves Illumination and Decreases Injury Risk for Underground Miners" » (<https://www.cdc.gov/niosh/docs/2011-192/>). [cdc.gov](http://www.cdc.gov). (en inglés). Consultado el 29 de febrero de 2017.
  168. «LED Device Illuminates New Path to Healing» ([https://www.nasa.gov/offices/oct/t ech\\_transfer/](https://www.nasa.gov/offices/oct/t ech_transfer/)) (en inglés). Consultado el 8 de febrero de 2017.
  169. Fudin, M.S.; Mynbaev, K.D.; Aifantis, K.E.; Lipsanen, H.; Bougrov, V.E.; Romanov, A.E.

- Frequency characteristics of modern LED phosphor materials ([http://ntv.ifmo.ru/en/article/11192/chastotnye\\_harakteristiki\\_sovremennyh\\_svetodiodnyh\\_lyuminofofnyh\\_materialov.htm](http://ntv.ifmo.ru/en/article/11192/chastotnye_harakteristiki_sovremennyh_svetodiodnyh_lyuminofofnyh_materialov.htm)) Artículo completo (Ruso) (<http://ntv.ifmo.ru/file/article/11192.pdf>) (PDF)
- Revista Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. noviembre-diciembre del 2014 Volumen 14, n.º 6. pag. 71. ISSN 2226-1494 (impreso), ISSN 2500-0373 (en línea). Consultado el 25 de abril de 2017.
170. Green, H. Transmitting Data Through LED Light Bulbs (<http://ecogeek.wpengine.com/2008/10/transmitting-data-through-led-light-bulbs/>) Artículo de Ecogeek.org, 9 de octubre de 2008. Consultado el 25 de abril de 2017.
  171. Moon, M. LED Lights Eyed to be Next-Gen Low Power Wireless Technology (<http://goodcleantech.pcmag.com/future-tech/280296-led-lights-eyed-to-be-next-gen-low-power-wireless-technology>) Artículo de Good Clean Tech, 8 de octubre de 2008. Consultado el 25 de abril de 2017.
  172. Departamento de energía de los Estados Unidos, ed. (febrero de 2009). *Sumario de resultados del programa de iluminación de estado sólido CALiPER : Ronda 7 de pruebas del producto* ([http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/caliper\\_round\\_7\\_summary\\_final.pdf](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/caliper_round_7_summary_final.pdf)) (PDF). Consultado el 21 de marzo de 2017.
  173. «"Lampadine LED a basso consumo"» (<https://prodottidicasa.it/lampadine-led-a-basso-consumo>) (en italiano). Consultado el 13 de agosto de 2018.
  174. Nota informativa sobre la metodología de estimación del mix eléctrico por parte de la oficina catalana del cambio climático ([http://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/home/reduex\\_emissions/factors\\_emissio\\_associats\\_energia/170224\\_Nota-metodologica-mix\\_esp.pdf](http://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/home/reduex_emissions/factors_emissio_associats_energia/170224_Nota-metodologica-mix_esp.pdf)) Archivado ([https://web.archive.org/web/20170905140958/http://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/home/reduex\\_emissions/factors\\_emissio\\_associats\\_energia/170224\\_Nota-metodologica-mix\\_esp.pdf](https://web.archive.org/web/20170905140958/http://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/home/reduex_emissions/factors_emissio_associats_energia/170224_Nota-metodologica-mix_esp.pdf)) el 5 de septiembre de 2017 en Wayback Machine. (PDF) 24 de febrero de 2017.
  175. Aben Gropup Ltd. «Aplicaciones de la luz con LEDS» (<https://web.archive.org/web/20170701152508/http://www.abengroup.com/index.php/general-info/49-application-of-led-lighting>). abengroup.com. Archivado desde el original (<http://www.abengroup.com/index.php/general-info/49-application-of-led-lighting>) el 1 de julio de 2017. Consultado el 12 de mayo de 2017.
  176. Dietz, P. H.; Yerazunis, W. S.; Leigh, D. L. (octubre de 2003). *Very Low-Cost Sensing and Communication Using Bidirectional LEDs* (<http://www.merl.com/publications/TR2003-035/>).
  177. Goins, G. D.; Yorio, N. C.; Sanwo, M. M.; Brown, C. S. (1997). «Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting». *Journal of Experimental Botany* **48** (7): 1407-1413. doi:10.1093/jxb/48.7.1407 (<https://doi.org/10.1093%2Fjxb%2F48.7.1407>).
  178. Schubert, E. Fred (2003). *Light-emitting Diodes*. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 0521823307.
  179. «Winner of Maison & Objet Projects award 2014» (<https://web.archive.org/web/20160329164250/http://meystyle.com/about/about.html>). Meystyle.com. Archivado desde el original (<http://www.meystyle.com/about/about.html>) el 29 de marzo de 2016. Consultado el 2 de julio de 2017.
  180. «LED Wallpaper» (<https://www.ingo-maurer.com/en/products/led-wallpaper>). Ingo-maurer.com. Consultado el 2 de julio de 2017.
  181. «LOMOX OLED Innovation» (<http://www.lomox.co.uk/articles/technology>). Lomox.co.uk. Consultado el 2 de julio de 2017.
  182. «Philips Announces Partnership with Kvadrat Soft Cells to Bring Spaces Alive with luminous textile» ([https://web.archive.org/web/20160408004610/http://www.newscenter.philips.com/main/standard/news/press/2011/20110704\\_luminous\\_textile.wpd#.Vvunp3qwV\\_o](https://web.archive.org/web/20160408004610/http://www.newscenter.philips.com/main/standard/news/press/2011/20110704_luminous_textile.wpd#.Vvunp3qwV_o)). Philips.com. 2011. Archivado desde el original ([http://www.newscenter.philips.com/main/standard/news/press/2011/20110704\\_luminous\\_textile.wpd#.Vvunp3qwV\\_o](http://www.newscenter.philips.com/main/standard/news/press/2011/20110704_luminous_textile.wpd#.Vvunp3qwV_o)) el 8 de abril de 2016. Consultado el 2 de julio de 2017.

## Enlaces externos

---

-  Wikimedia Commons alberga una categoría multimedia sobre **led**.
-  Wikimedia Commons alberga una categoría multimedia sobre **led (SMD)**.
-  Wikcionario tiene definiciones y otra información sobre **LED**.
- The LED - How LEDs work? (<https://www.youtube.com/watch?v=4y7p9R2No-4>) en YouTube. (en inglés)

---

Obtenido de «<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Led&oldid=137777210>»

---

Esta página se editó por última vez el 19 ago 2021 a las 19:33.

El texto está disponible bajo la Licencia Creative Commons Atribución Compartir Igual 3.0; pueden aplicarse cláusulas adicionales. Al usar este sitio, usted acepta nuestros términos de uso y nuestra política de privacidad. Wikipedia® es una marca registrada de la Fundación Wikimedia, Inc., una organización sin ánimo de lucro.