

Premio Nobel de Física 2014

DIODOS QUE EMITEN LUZ AZUL EFICIENTE QUE CONDUCEN A FUENTES DE LUZ BLANCA BRILLANTE CON AHORRO DE ENERGÍA

Antonio Luis Doadrio Villarejo



Isamu Akasaki



Shuji Nakamura



Hiroshi Amano

Fiel a su cita anual, el 7 de octubre de 2014, la Real Academia Sueca de las Ciencias decidió conceder el Premio Nobel de Física 2014 a tres investigadores: Isamu Akasaki, Hiroshi Amano y Shuji Nakamura, por la “invención de los diodos emisores de luz azul eficiente, que ha permitido fuentes de luz blanca brillantes y que ahorran energía”. Una nueva luz para “iluminar al mundo”. Así calificó la Real Academia Sueca de Ciencias a las ya populares luces LED.

Estos tres científicos, laureados con el Nobel de Física de la convocatoria de 2014 han sido elegidos como creadores de la fuente lumínica de gran duración y extraordinario rendimiento energético denominada “diodo emisor de luz azul”, o más conocida por su acrónimo LED (*light-emitting diode*), que cumple con los requisitos de la energía sostenible. Según la Real Academia Española, LED es “un diodo de material semiconductor que emite luz al aplicar una tensión eléctrica, y que se utiliza para componer imágenes en pantallas de diversos instrumentos,

como calculadoras, relojes digitales, etc.” La definición de energía sostenible, por su parte, es: “aquella energía capaz de satisfacer las necesidades presentes sin comprometer los recursos y capacidades de las futuras generaciones”.

Esta tecnología está omnipresente en la vida cotidiana, por ejemplo en los teléfonos móviles, en los que cumple un papel esencial en la iluminación de las pantallas. También en los televisores, los lectores Blu-ray y los flashes de las cámaras fotográficas y cada vez más en la oficina y en la vivienda. “La producción de rayos luminosos azules a partir de semiconductores, a comienzos de los años noventa, ha provocado una transformación fundamental en la tecnología de la iluminación”, señaló el comunicado de la Academia Real Sueca de Ciencias.

Los tres científicos premiados nacieron en Japón, aunque Nakamura tiene la nacionalidad estadounidense y todos ellos trabajan en el campo de la tecnología de semiconductores, los cuales son necesarios para la fabricación de los LED.

Isamu Akasaki

Nació el 30 de enero 1929 en Chiran (Japón). En 1952 se graduó en Ingeniería electrónica por la Universidad de Kioto (Japón). Su primer trabajo entre 1952 y 1959, fue en la Kobe Kogyo Corporation, absorbida posteriormente por la multinacional Fujitsu. Después, en 1959 ingresó en la Universidad pública de Nagoya (Japón) como investigador y posteriormente como profesor asociado de la Facultad de Ingeniería (1959-1964). En 1964, obtiene un Master (MSc), también en Ingeniería electrónica. Trabajó en la Matsushita Electric Industrial, donde fue jefe del laboratorio de investigación básica 4 del Instituto de Investigación Matsushita de Tokio (MRIT) desde 1964 a 1974. De 1974 a 1981, dirigió el Departamento de semiconductores de la misma empresa. Desde 1981 a 1992 fue profesor en el Departamento de Electrónica de la Universidad de Nagoya y desde entonces, profesor emérito de dicha universidad y profesor de la Universidad de Meijo, Universidad privada del distrito de Nagoya en Japón. Desde 2004 es también Director del Centro de Investigación de semiconductores de nitruros de la citada Universidad de Meijo. Actualmente, es además investigador del Centro Akasaki de Investigación de la Universidad de Nagoya. Como vemos, su vida profesional ha estado vinculada a dos universidades japonesas, la pública de Nagoya y la privada de Meijo, también en Nagoya, y a dos empresas multinacionales, la MRIT y la Kobe Kogyo Corporation. Desde finales de la década de 1960, trabajó con LED de

luz azul de nitruro de galio (GaN) y paso a paso, en el MRIT, fue perfeccionando la técnica de crecimiento de cristales de GaN, produciendo la primera LED de GaN de alto brillo. Posteriormente en 1981, con su grupo de investigación de la Universidad de Nagoya, continuó con los procesos de crecimiento de GaN, obteniendo el éxito en 1985, al obtener GaN de alta calidad sobre un sustrato de zafiro con una nueva tecnología de baja temperatura. Cuenta con innumerables galardones, de los que destaca el Premio Kioto en Tecnología Avanzada en 2009 y el IEEE Medalla Edison en 2011.

Hiroshi Amano

Nació el 11 de septiembre de 1960 en Hamamatsu (Japón). Se graduó en Ingeniería electrónica en 1983 por la Universidad de Nagoya y se doctoró también en Ingeniería electrónica en la misma universidad en 1989. De 1988 a 1992, fue investigador asociado en la Universidad de Nagoya. En 1992, se trasladó a la Universidad de Meijo, donde fue profesor asistente hasta 1998. Desde 1998 hasta 2002, profesor asociado y desde 2002 a 2010, catedrático. En 2010, se trasladó a la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad de Nagoya, donde actualmente es catedrático.

Se unió al grupo de investigación del profesor Isamu Akasaki en 1982 como estudiante de pregrado. Desde entonces, ha estado haciendo investigaciones sobre el crecimiento, caracterización y aplicaciones de dispositivos de semiconductores de nitruros de los elementos del grupo 13 de la tabla periódica, materiales utilizados en diodos emisores de luz azul.

Shuji Nakamura

Nació el 22 de mayo de 1954 en Seto (Ehime), Japón; es japonés nacionalizado estadounidense. Se graduó en la Universidad de Tokushima de Japón en 1977 también como los anteriores en Ingeniería electrónica, obteniendo el doctorado en la misma materia en 1994. En 1979 entró en la Corporación Nichia, el mayor proveedor mundial de lámparas LED, donde trabajó hasta 1999, y en donde inventó el primer LED GaN de alto brillo. Desde 1999 es profesor e investigador de la Universidad de California en Santa Bárbara (EE.UU.).

El perfil de Shuji Nakamura es atípico en la historia del Nobel de Física que recae casi exclusivamente en investigadores universitarios. Nakamura llevó a cabo sus trabajos de investigación, por los cuales recibe el premio, en una pequeña empresa, Nichia Chemicals. Más tarde emigró a la Universidad de California, en Santa Bárbara Estados Unidos y adquirió la nacionalidad estadounidense. Ha publicado más de 400 artículos en revistas científicas del más alto nivel, con más de 19.000 referencias y tiene más de 400 patentes aprobadas o en vías de tramitación.

Shuji Nakamura no ha tenido un camino fácil hasta el Premio Nobel. Las luces LED se habían inventado ya en los años 60, pero solo los de color rojo o verde llegaron a ser muy comunes en calculadoras, relojes o luces de televisores o equipos de música. Pero, quedaba por delante encontrar un material semiconductor capaz de emitir luz azul, lo que permitiría, combinando los tres colores, fabricar bombillas de luz blanca con esta tecnología. Eso ocurrió cuando en el año 1993, la Nichia creó los primeros LED azules.

El invento supuso hasta el año 2005 unos beneficios de cerca de 500 millones de euros. Pero el inventor que generó la patente multimillonaria, Shuji Nakamura, solo percibió 180 euros en compensación por su descubrimiento. Después de un largo litigio y del abandono de Japón, la empresa Nichia fue condenada a pagarle más de siete millones de euros.

Una de las voluntades de Alfred Nobel fue que los galardonados con el Nobel hubieran colaborado con su trabajo científico al avance de la Humanidad. Este año, el Comité de los Premios ha querido seguir el legado del inventor de la dinamita y ha decidido otorgar el Nobel de Física a los profesores de origen japonés Isamu Akasaki e Hiroshi Amano, de la Universidad de Nagoya (Japón), y a Shuji Nakamura, de la Universidad de California en Santa Bárbara (California, EE.UU.) por un avance científico de gran interés para la sociedad.

Pero el verdadero padre de la criatura es Nakamura. La gran genialidad de Nakamura es que hizo algo que todo el mundo en la comunidad científica decía que era imposible. Convenció a Nichia para que le diera 1,5 millones de dólares y en apenas seis años puso en el mercado el producto. Es un Nobel merecidísimo, pero antes en 2006 fue galardonado con el Premio de Tecnología del Milenio, considerado el Nobel de Tecnología, por “el desarrollo de nuevas y revolucionarias fuentes lumínicas, los diodos luminosos (leds) azul, verde y blanco, y la luz láser azul”. Además de este prestigioso premio y del reciente Nobel, ha sido

laureado con el Premio de la Society for Information Display (EE.UU., 1996), el Premio de Electrónica Cuántica del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (EE.UU., 2002), el Rank Prize (Reino Unido, 1998), y la Medalla Benjamin Franklin (EE.UU., 2002). En 2008 recibió el Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica, junto a Sumio Iijima, George M. Whitesides, Robert S. Langer y Tobin Marks.

■ Introducción

Las luces LED, recalcan los científicos de la Academia Sueca, dado su bajísimo consumo, pueden funcionar alimentadas por paneles solares baratos, lo que abre la posibilidad de una mejora de la calidad de vida para 1.500 millones de personas en el mundo que no tienen acceso a la red eléctrica.

Como hemos dicho, el diodo emisor de luz o LED en los colores rojo y verde, se conocía desde hace tiempo, pero el diodo de luz azul se resistía, hasta que los tres científicos galardonados con el Nobel 2014, crearon en la década de los 90 haces de luz azul. Este descubrimiento es muy importante, ya que ha cambiado radicalmente el uso que hacemos de la luz y su ahorro energético, al crear una nueva tecnología de iluminación eficiente y más respetuosa con el medioambiente. Y es que para generar la luz blanca que utilizamos en nuestra iluminación diaria, en forma de LED, era necesario juntar los tres colores básicos: rojo, verde y azul (RGB) (figura 1).

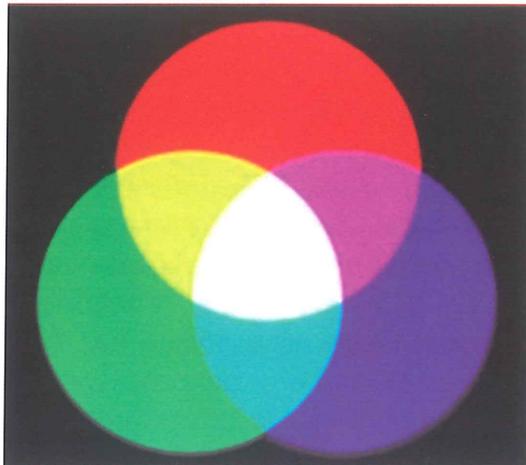


Figura 1. Los tres colores primarios (verde, rojo y azul) sumados permiten obtener luz blanca.

Para este logro, Akasaki y su discípulo Amaro, trabajaron juntos en la Universidad de Nagoya mientras Nakamura lo hacía por su cuenta en la corporación Nichia.

Además, Nakamura también inventó la luz LED ultravioleta que permite la esterilización del agua potable, lo que aplicado al Tercer Mundo, puede suponer una gran mejora en las condiciones de vida y de salud de decenas de millones de personas. Otro gran invento de este científico, es el láser azul, que tiene grandes aplicaciones en la optoelectrónica y sobre todo en el almacenamiento de datos. El láser azul ha dado lugar a la conocida tecnología Blu-ray, mediante la cual es posible quintuplicar el volumen de información almacenado en dispositivos como el DVD-Blu-Ray Disc con respecto al DVD original.

Los LED son cada vez más eficientes en el sentido de que requieren menos energía para emitir luz, en comparación con las bombillas tradicionales o las bombillas fluorescentes. Y, a diferencia de estos últimos, los LED no contienen mercurio, señala la Academia Sueca al explicar la importancia socioeconómica y medioambiental del trabajo galardonado este año. Hay que recordar que las llamadas bombillas de bajo consumo de hace pocos años son fluorescentes, pero con la llegada de los LED, ese apelativo de bajo consumo ha perdido su significado.

Un diodo emisor de luz está formado por varias capas de materiales semiconductores (la longitud de onda de la luz emitida depende del material utilizado) y la electricidad se convierte directamente en fotones, partículas de luz. Ahí está la clave de su eficiencia, ya que en las fuentes luminosas tradicionales la mayor parte de la electricidad se convierte en calor y solo un poco en luz. En una bombilla incandescente, o en un halógeno, la corriente eléctrica calienta un filamento que al ponerse incandescente emite luz.

El diodo de luz roja fue inventado a finales de los años cincuenta y se utilizaron, por ejemplo, en relojes digitales y calculadoras, así como en indicadores de encendido/apagado de aparatos eléctricos. El azul se ha resistido mucho tiempo y los tres investigadores ahora premiados retaron las verdades establecidas, trabajaron duro y asumieron considerables riesgos. Hicieron miles de experimentos y, la mayor parte de las veces, fracasaron, pero no desesperaron, siguieron adelante. Tanto Akasaki y su entonces estudiante de doctorado Amano, como Nakamura, habían optado por el nitruro de galio como material para lograr el emisor azul. Era la elección correcta, pero hacer cristales de nitruro de galio de suficiente calidad fue un reto enorme. Akasaki y Amano lo lograron en 1986 y, con sus cristales de nitruro de galio, presentaron en 1992 su primer diodo de emisión de luz azul brillante. Nakamura, por su parte, hizo de ese material cristales con alta calidad en 1988 y presentó el invento

también en 1992, pero con una solución técnica diferente. Los tres se dedicaron, durante la década de los noventa a mejorar sus LED de color azul haciéndolos más eficientes con diferentes aleaciones de nitruro de galio utilizando para la fabricación de los cristales aluminio o iridio. Además, los tres inventaron también un láser azul con un LED del tamaño de un grano de arena, como componente esencial.

■ Perspectiva histórica

Para la iluminación en las sociedades humanas se utilizaron las lámparas de aceite, desde aproximadamente 15000 a.C. hasta el siglo XIX. Después, durante el siglo XIX, las lámparas tradicionales incandescentes, fueron el sistema de iluminación predominante. Una lámpara de incandescencia es un dispositivo compuesto por un filamento metálico de carbono o más modernamente de wolframio, encerrado herméticamente en una ampolla de vidrio, a la que se le hace el vacío y se rellena de gas inerte para que el filamento no se volatilice y se completa con un casquillo metálico que está en contacto con las conexiones eléctricas. En este dispositivo, se consigue producir por el efecto Joule, una luz blanca cuando se calienta el filamento hasta el rojo blanco, para lo que es necesario el paso de una corriente eléctrica.

La lámpara incandescente fue inventada por el físico y químico inglés Joseph Wilson Swan que recibió la patente británica para su dispositivo en 1878, aunque fue Thomas Alva Edison el primero en patentar en enero de 1880 una bombilla incandescente de filamento de carbono, utilizable comercialmente. Este invento supuso un gran avance en cuanto a comodidad, pero también en potencia lumínica, ya que pasamos de los aproximadamente 0,1 lm/W (lúmenes por vatio de potencia) de las lámparas de aceite hasta los 16 lm/W de media de las lámparas incandescentes.

Con los parámetros actuales, la *lámpara incandescente* no es eficiente ni sostenible. Con esta tecnología solo el 15% de la electricidad consumida se convierte en luz, ya que el 85% restante se transforma en calor. Además, es la que posee el rendimiento lumínico más bajo de todas las lámparas actuales, ya que solo produce de 12 a 18 lm/W y la de menor vida útil, ya que solo dura unas 1.000 h, aunque sin embargo ha sido la más utilizada por su bajo precio y el color cálido de su luz.

En el siglo XX, se introduce otro tipo de lámpara, la denominada *lámpara fluorescente*, conocida popularmente como tubo fluorescente. Una lámpara fluorescente es un tubo de descarga de vapor de mercurio a baja presión. La lámpara fluorescente, está compuesta por un tubo de vidrio fino, que contiene en su interior diversos

compuestos químicos fluorescentes llamados “fósforos”, aunque realmente no son de fósforo, que emiten luz visible al ser excitados por una radiación en el espectro ultravioleta. El tubo contiene además vapor de mercurio y un gas inerte, habitualmente argón o neón, a una presión más baja que la presión atmosférica. En cada extremo del tubo se sitúa un filamento de wolframio, que cuando se calienta por la electricidad al rojo produce la ionización de los gases contenidos en el interior del tubo, lo que hace que se emita luz en el espectro ultravioleta que es absorbida por el compuesto de “fósforo” y emitida en forma de luz visible del blanco cálido al frío. Fue comercialmente presentada por General Electric en 1938.

La ventaja de las lámparas fluorescentes frente a las incandescentes, es su potencia y eficiencia energética. Las lámparas fluorescentes producen una media de 70 lm/W (entre 50-90 lm/W) frente a los 16 lm/W de las incandescentes. Su consumo energético es menor ya que su rendimiento energético es el doble que las incandescentes. Su vida útil es superior a las incandescentes, ya que pueden usarse entre 5.000 y 10.000 h, de 5 a 10 veces más que las incandescentes. El problema de las lámparas fluorescentes es que no son sostenibles ni respetuosas con el medio ambiente al producir residuos de mercurio muy contaminantes.

La lámpara LED, introducida a finales del siglo XX, es una lámpara de estado sólido que utiliza como fuente luminosa un diodo emisor de luz. Está constituida por múltiples diodos, ya que uno solo no es capaz de alcanzar una intensidad luminosa similar a las lámparas incandescentes o fluorescentes.

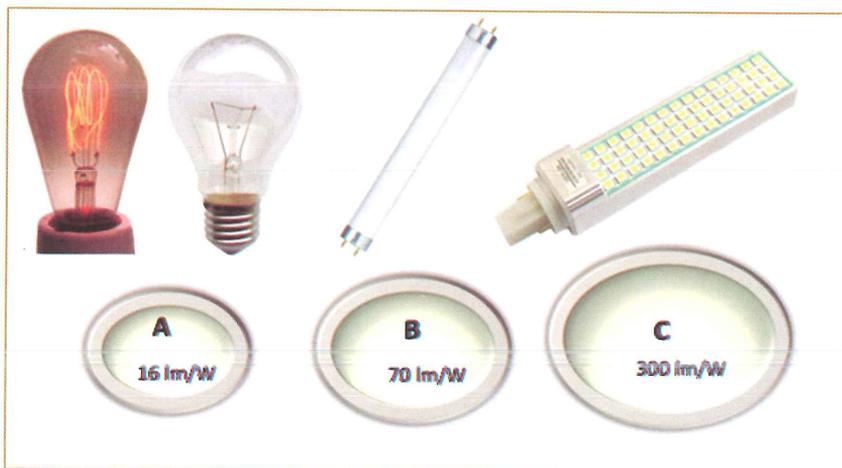


Figura 2. Evolución de la tecnología en lámparas. A) Incandescentes de carbono y wolframio. B) Fluorescentes. C) LED.

Aunque el costo inicial de la lámpara LED es mayor que el de las tradicionales que hemos visto anteriormente, están llamadas a convertirse en la iluminación del siglo XXI, ya que tienen una vida útil muy larga (superan con facilidad las 50.000 h), una gran eficiencia energética, superior a otras lámparas incluyendo a las denominadas de bajo consumo, ya que aprovechan el 90% de la electricidad consumida, son capaces de generar una alta intensidad de iluminación de hasta 300 lm/W (de momento) y además, son muy fiables porque casi nunca fallan. En la figura 2 se muestra una comparativa de estos tres tipos de lámparas.

■ Lámpara LED de alta potencia

Una lámpara LED de alta potencia lumínica, consta de:

1) **Un chip**, que debe de estar bien diseñado y tener alta calidad para que no falle durante la vida útil de la lámpara. El chip (o circuito integrado) es el alma de la lámpara LED, ya que es el que genera la luz emitida por la lámpara. Es una pieza rectangular que contiene una serie de capas de los materiales semiconductores que van a convertir la electricidad en luz. Para obtener una luz cálida similar a la de una lámpara halógena, se recubre la capa superior del chip con un “fósforo” de color amarillo ocre. Si el color es amarillo claro, emitirá una luz fría, similar a la de una lámpara fluorescente.

La fabricación de un chip para lámparas LED, comienza con la elaboración de una oblea de unos 15 cm de diámetro que va a actuar como base semiconductor sobre la que se aplican los componentes que darán lugar a los distintos tipos de lámparas LED. La oblea suele ser de carburo de silicio (SiC) o zafiro (Al_2O_3), ambos compuestos semiconductores de elevada dureza. Sobre esta oblea se “cultivan” distintos semiconductores, dependiendo de las características de la luz que se desee conseguir. Por ejemplo, nitruro de indio y galio (InGaN) para dar una luz azul o aluminio o fósforo de galio (GaP) para el verde. A esta técnica de cultivo se la denomina *epitaxia*, de la cual hablaremos posteriormente.

Una vez finalizado el proceso anterior, quedan constituidas las capas necesarias para el funcionamiento del chip. Estas capas son tres: la capa N, la región activa (unión PN) y la capa P.

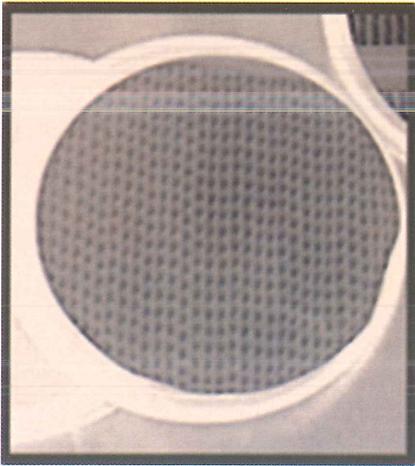


Figura 3. Oblea para fabricación de chips.
Modificada de lediagrup.com.

Posteriormente la oblea se divide en pequeños rectángulos de apenas 2 mm, que son los denominados chips que finalmente se montan en cada LED y se conectan a la corriente eléctrica. En la figura 3 se muestra una oblea, antes de ser dividida en chips.

2) **Un disipador de calor.** Las lámparas LED producen una gran cantidad de calor en el punto de unión del diodo con el chip cuando la lámpara se encuentra encendida, por lo que es absolutamente necesario disipar la alta temperatura que se genera, para mantenerla dentro de unos niveles adecuados para que no se destruya el chip.

3) **Controlador o “driver”.** Las lámparas LED funcionan con la corriente continua (CC), por lo tanto es necesario un controlador, que permita que las lámparas LED de alta potencia luminosa puedan funcionar con la corriente alterna (CA) de la red eléctrica doméstica.

4) **Componente óptico.** Sirve para proporcionar un mayor o menor ángulo de difusión de la luz, ya que la que emite la lámpara LED se difunde en una sola dirección. Suele estar constituido por pequeñas lentes dispuestas en un ángulo determinado. Estas lentes, pueden ser muy complejas.

Semiconductores

Los semiconductores son elementos químicos, compuestos o materiales, que tienen una conductividad eléctrica menor que la de un metal, pero mayor que la de un no metal o aislante eléctrico. La conductividad en un semiconductor se produce debido a una circulación de electrones en su red cristalina. Por ejemplo, el átomo de silicio, que es el elemento semiconductor más utilizado, posee cuatro electrones de valencia en sus orbitales más externos, por lo que es deficitario de electrones (faltarían otros cuatro para completar el octeto). Estos átomos se disponen en una red cristalina, de tal manera que cada átomo de silicio comparte sus electrones de valencia con otros cuatro átomos vecinos, formando enlaces de tipo

covalente, de modo que al completar su octeto son muy estables. Pero, en el caso del silicio, a temperatura ambiente (en otros es necesaria una temperatura más elevada), algunos de los electrones de valencia absorben la suficiente energía en forma de calor, para convertirse en electrones libres (se separan del enlace covalente) y poder desplazarse a través de la red cristalina. Si estos electrones libres, se someten al potencial eléctrico de una pila, se dirigen hacia el polo positivo. Además, los electrones libres separados de su enlace, dejan huecos de carga parcial positiva en la red. Así, los huecos portadores de carga positiva se dirigen hacia el polo negativo de la pila, al aplicar el potencial eléctrico.

De esta manera, al conectar una pila, se hace circular una corriente eléctrica en un circuito cerrado, por lo que siempre es igual el número de electrones de la red del silicio. Los huecos de carga positiva, están situados en el interior de la red del cristal semiconductor, mientras que por el exterior circulan únicamente los electrones que generan la energía eléctrica.

Estos compuestos semiconductores son sólidos, con estructura de red cristalina. Sus propiedades conductoras se explican por la denominada teoría de bandas, común con los metales conductores y con los aislantes eléctricos. Cuando los átomos se unen para formar la red cristalina del sólido, existe una gran cantidad de orbitales de valencia ocupados con electrones para formar enlaces. De esta manera, los orbitales atómicos de valencia de un átomo se van solapando con los de otro para formar orbitales moleculares (enlazantes y antienlazantes). Pero como los niveles de energía entre cada uno de esos orbitales son muy similares, se pueden considerar como bandas continuas y no como niveles de energía separados como en el átomo aislado. A estos niveles formados con orbitales de valencia se les denomina *banda de valencia*. Los electrones van ocupando como es habitual los distintos niveles de energía de menor a mayor, pero también hay niveles de energía vacíos, que crean una nueva banda, denominada *banda de conducción*. Entre dos bandas se crea la denominada *banda prohibida*.

En la figura 4, se muestra un esquema de cómo se produce entre las bandas el proceso que da lugar a la conducción eléctrica de un sólido excitado por la luz, lo que nos va a servir para explicar la conductividad en los semiconductores. Los electrones de la banda de valencia se encuentran situados a una determinada distancia energética de la banda vacía de conducción. Por ello, para que un electrón de la banda de valencia dé un salto energético para situarse en la banda de conducción se necesita un aporte energético que pueda vencer el potencial energético

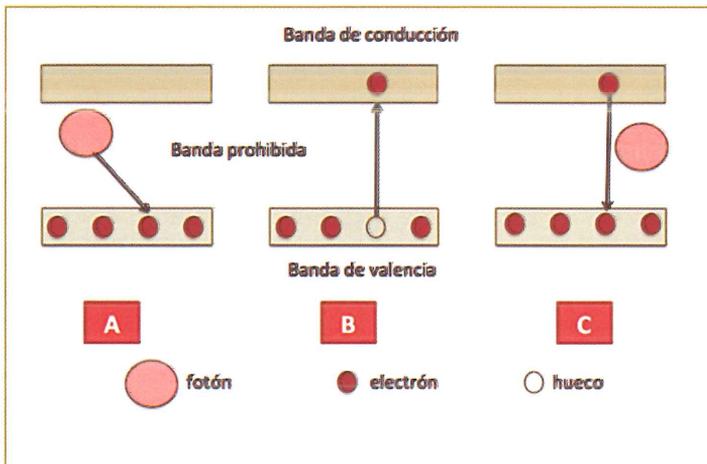


Figura 4. Representación esquemática de las bandas de valencia, de conducción y prohibida.

necesario, por ejemplo la energía de un fotón (figura 4A). Una vez superada la barrera de energía, el electrón excitado se sitúa en la banda de conducción; pero ello supone la creación de un hueco de carga negativa o carga parcial positiva (denominado gap), de ese electrón que ha abandonado la banda de valencia (figura 4B). Así que cuando un fotón excita a un electrón de la banda de valencia, se crea un par electrón-hueco. Pero como esto es un estado excitado, posteriormente, el sistema tiende a volver al de mínima energía en un proceso de recombinación, cuando el electrón excitado ocupa su hueco (figura 4C). Este proceso no es único, sino que se produce un flujo continuo de electrones, ya que en la recombinación electrón-hueco se emite un fotón que reinicia el proceso y de esta manera, se produce un potencial eléctrico en el sólido cristalino.

Este modelo explica bastante bien el comportamiento eléctrico de las sustancias conductoras, de las semiconductoras y de las aislantes. En los metales, que son sustancias conductoras, la banda de valencia se solapa energéticamente con la banda de conducción vacía, y así se dispone de orbitales moleculares vacíos que pueden ser ocupados por electrones con el mínimo aporte de energía. Se considera entonces, que los electrones están libres pudiendo conducir la corriente eléctrica.

En los semiconductores y en los aislantes, al contrario, la banda de valencia no se solapa con la de conducción, por lo que hay una zona intermedia, que es la banda prohibida, que no existe en los metales. Ahora bien, en algunos semiconductores, como el silicio, la anchura de la banda prohibida no es demasiado

grande, es decir no hace falta aportar mucha energía para que el electrón de valencia dé un salto energético a la banda de conducción y los electrones pueden pasar a ella con un aporte bajo de energía. Sin embargo, en los aislantes, la banda prohibida es tan ancha que ningún electrón puede saltar la barrera energética de potencia, por lo que la banda de conducción está siempre vacía.

Semiconductores P y N

En la mayoría de los semiconductores, resulta necesario añadir impurezas para mejorar su conductividad eléctrica. A esta técnica se le denomina “dopado”, que puede ser realizada con elementos cuyos átomos tengan cinco electrones de valencia, básicamente los elementos del grupo 15 de la tabla periódica: fósforo, antimonio y arsénico o también con átomos con solo tres electrones de valencia, fundamentalmente elementos del grupo 13: boro, galio e indio.

De esta manera, cuando se “dopa” la red cristalina del silicio con un elemento con cinco electrones de valencia queda un electrón libre, lo que le hace mucho mejor conductor. Un semiconductor dopado con impurezas de átomos pentavalentes es de tipo N.

Pero, si se dopa la red cristalina del silicio con un elemento con solo tres electrones, sucede que queda un hueco de carga positiva en la red cristalina del silicio provocado por el electrón impar que no puede constituir enlace de par electrónico. Un semiconductor así dopado es de tipo P.

Tanto el incremento de cargas negativas, como el de huecos, mejoran el flujo de electrones y por tanto, la conductividad del semiconductor.

Además, cuando a un material semiconductor se le dopa de las dos maneras, de tipo P y de tipo N, se forma la denominada unión PN, que crea un campo eléctrico cerca de la superficie superior de la celda en la que dos materiales están en contacto. A esta unión es a la que se refiere Akasaki en una entrevista telefónica: “Me he dedicado al estudio del crecimiento de los cristales, con miras a la elaboración de la unión PN de nitruro de galio”.

El LED es un dispositivo semiconductor que contiene una unión PN, en el cual los electrones libres de la parte dopada tipo N, que están situados más cerca a

la parte dopada de tipo P, se propagan a ésta. De esta manera, en la parte N se crean huecos de cargas parciales positivas, mientras que en la P se crean cargas negativas, justo en la unión de las dos zonas. Pero, ahora los electrones ya no son libres; se produce un equilibrio electrónico con una barrera de potencial que aleja a los electrones de la unión PN y deja bloqueado el flujo de electrones entre las zonas N y P. Para contrarrestar esa barrera de potencial y que vuelva el flujo de electrones de N a P hay que utilizar una pila capaz de polarizar la zona PN, pero en el sentido directo. De ese modo, el polo positivo de la pila irá conectado a la zona P, mientras que el polo negativo lo hará a la región N. Así, la unión PN se hace conductora y produce una elevada tensión de corriente eléctrica ya que la resistencia eléctrica que ofrece es muy pequeña.

Si se polariza en sentido inverso, con el polo positivo de la pila a la zona N y el polo negativo a la zona P, la tensión de la pila agranda aún más la barrera de potencial, y en ese caso dará lugar a un aumento de cargas negativas en la zona P y de huecos positivos en la N, impidiendo de esta forma el flujo de electrones en la unión PN. De esta forma, se hace aislante.

Por tanto, la unión PN se comporta dependiendo del sentido de la conexión, como un buen conductor (polarizada en directo) o como un aislante eléctrico (polarizada en inverso).

Crecimiento epitaxial

El crecimiento epitaxial o epitaxia es una metodología de fabricación de circuitos integrados o chips, que produce una deposición de unas capas cristalinas sobre una base también cristalina. De esta manera, y a partir de un cristal semiconductor, se hacen crecer con la misma estructura cristalina capas uniformes y poco espesas del mismo.

Hay básicamente varios métodos de epitaxia: crecimiento epitaxial en fase vapor (VPE), crecimiento epitaxial en fase líquida (LPE), crecimiento epitaxial por haces moleculares (MBE) y química órgano metálica por deposición a vapor (MOCVD).

Nakamura optimizó el dopaje tipo P a principios de la década de 1990, obteniendo mayores concentraciones de huecos, pero también fue capaz de desarrollar la técnica del crecimiento epitaxial MOCVD para obtener capas de los compuestos

semiconductores GaN e InGaN con una calidad cristalina mejorada, lo que resultó necesario para la creación de la luz azul. Estas optimizaciones las realizó en la Nichia Chemical Industries y fueron la base para la comercialización en 1994 del primer LED de emisión en el azul basado en InGaN.

Nitruro de galio (GaN)

El nitruro de galio GaN, es un semiconductor muy duro, con estructura hexagonal compacta, tipo wurtzita. La primera película cristalina delgada de GaN se obtuvo por Maruska et al. en 1969 por la técnica de epitaxia en fase de vapor de hidruros. Desde entonces, este material como otros nitruros del grupo 13 no había sido desarrollado hasta que Nakamura en 1994, publica la fabricación de un LED azul, que fue posteriormente comercializado como hemos dicho por Nichia. Si hoy en día, hacemos una búsqueda en el Google académico, con la entrada “gallium nitride 2014”, nos encontramos 23.600 resultados, lo que nos da una idea del interés científico que ha despertado este compuesto, aunque todavía es más conocido el clásico semiconductor de arseniuro de galio.

El principal problema con el GaN, es que en su crecimiento epitaxial no hay una base cristalina de alta calidad para ir acoplado las distintas capas. Esto es debido, a las altas temperaturas de fusión (2.800 K) y presiones de vapor de nitrógeno (> 45 kbar), necesarias para obtener monocristales puros de GaN lo suficientemente grandes para que sirvan de base a la epitaxia. Esto cambia cuando Akasaki y su grupo, entre los que se encontraba Amano, en 1985, consiguió el crecimiento de cristales de GaN sobre un sustrato de zafiro mediante la interposición de una capa amortiguadora de nitruro de aluminio. La excelente calidad conseguida les permitió descubrir el GaN tipo P usando magnesio como dopante y activado mediante irradiación de electrones. En 1989, fabricaron la primera unión PN basada en el GaN, y controlaron la conductividad del GaN tipo N y de otras aleaciones relacionadas, empleando silicio como dopante. Todos estos avances permitieron optimizar el rendimiento de la LED azul.

Nakamura, por otra parte, consiguió obtener una delgada película de nitruro de galio e indio (InGaN) sobre nitruro de galio. Para ello, tuvo que modificar la tecnología existente, puesto que ninguno de los aparatos comercialmente disponibles entonces podía proporcionar una capa de nitruro de galio e indio suficientemente pura y uniforme para emitir una luz azul brillante. Así es como modificó el método

convencional MOVPE, donde los gases y vapores fluyen sobre el sustrato paralelamente a la superficie, de tal manera que uno de los gases fluyese paralelamente a la superficie mientras que el otro lo hiciese perpendicularmente. A esto se llama configuración de “doble flujo” y tiene la ventaja de eliminar las corrientes convectivas y de enfriar a los gases, lo que proporciona una mayor estabilidad al proceso y mejores capas.

Además, Nakamura en 1992, inventó un tratamiento térmico para la producción en masa del muy difícil de obtener nitruro de galio tipo P de Akasaki y Amano.

Semiconductores utilizados en LED

Además del nitruro de galio (GaN) y el nitruro de indio y galio (InGaN), se han utilizado o se están desarrollando semiconductores de arseniuro de galio (GaAs), arseniuro de galio y aluminio (AlGaAs), arseniuro de fósforo y galio (GaAsP), fosforo de galio (GaP), seleniuro de cinc (ZnSe), carburo de silicio (SiC), diamante (C) y silicio (Si), para la construcción de luces LED que produzcan distintos colores, tal como vemos en la figura 5.

El AlGaAs se utiliza para el color rojo; el GaAsP, para el anaranjado, amarillo y el rojo; el GaP y GaN para el verde; el ZnSe, el InGaN y el SiC para el azul, mientras que el GaAs se usa para luz infrarroja, el diamante para la ultravioleta y el silicio está en desarrollo.

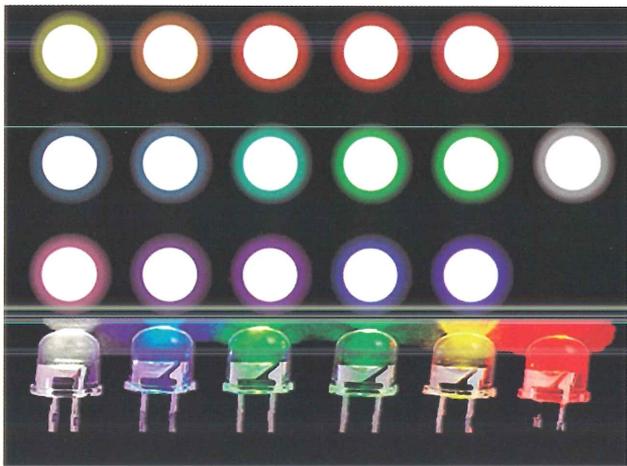


Figura 5. Principales colores de luces LED comerciales.

Los primeros diodos construidos fueron los infrarrojos y de color rojo con GaAs y AlGaAs, hasta que los premiados con el Nobel desarrollaron los diodos de color azul. La combinación de los tres colores, como hemos dicho anteriormente permitió crear la luz blanca, pero el diodo de seleniuro de cinc, también puede emitir luz blanca si se mezcla la azul que emite con la roja y verde creada por fotoluminiscencia.

Recientemente, se ha podido crear LED ultravioletas, que se han empleado con éxito en la producción de luz negra para iluminar materiales fluorescentes.

Las luces LED ultravioletas y las azules son las más caras, por lo que se emplean menos para usos domésticos, e incluso comerciales.

■ La iluminación LED: presente y futuro

En estos últimos años las modernas tecnologías de iluminación basadas en LED están penetrando con fuerza en todos los mercados, especialmente por el liderazgo que ejercen las pujantes y poderosas compañías asiáticas. De hecho, se han introducido ya en comercios, industria, automóviles y poco a poco en nuestros hogares, al principio como decoración suplementaria, pero ahora con el propósito de sustituir a las lámparas incandescentes, fluorescentes, halógenas e incluso a las modernas lámparas de bajo consumo.

Hasta ahora, hemos comparado la iluminación LED con las tradicionales incandescentes y fluorescentes que usamos en la iluminación de nuestros hogares o comercios, saliendo las LED ganadoras, en cuanto a eficiencia y sostenibilidad. Pero ¿qué sucede si las comparamos con las lámparas utilizadas para el alumbrado público y vial?

Actualmente, puesto que las lámparas LED pueden alcanzar valores de eficacia de fuente de luz casi equiparables a las lámparas de vapor de sodio o las de halogenuros metálicos con quemador cerámico, tradicionalmente utilizadas para el alumbrado público y de carreteras, se están empezando a usar para este fin. En la figura 6, se muestra una imagen del alumbrado de una carretera con luces LED.



Figura 6. Iluminación LED de una autopista (<http://amgrenovables.com/>).

La luz blanco-azulada de las LED utilizadas en la iluminación vial, se esparce mucho más que la luz amarilla de las lámparas de sodio, aunque su eficacia en lm/W es algo menor. Es decir, se ve mejor con las LED, pero también la contaminación lumínica es mayor. La lámpara LED resulta más eficaz porque pone la luz en el sitio que queremos, es decir, consigue que aunque la lámpara emita menos luz a causa de su menor eficacia final en lm/W , los lúmenes que llegan a la superficie o espacio a iluminar, lo hagan en un mayor porcentaje.

La LED de luz blanco-azulada, se difunde más eficazmente en la atmósfera al emitir en longitudes de onda de 460 a 470 nm, correspondientes al color azul. Esto puede parecer bueno, pero no lo es, ya que debido a ello, en ciertos ambientes, especialmente de astrónomos, existe una gran preocupación por los problemas de contaminación lumínica que generan las LED. Además, parece que la luz blanco-azulada altera en más medida que las demás la conducta de las especies vivas nocturnas y la inhibición de la secreción de la hormona melatonina en los seres humanos. Esto último, es debido a que los receptores circadianos de la retina son muy sensibles a las emisiones luminosas en la longitud de onda del azul.

La constante innovación en el campo de la iluminación lleva a la evolución de la tecnología LED hacia el LED orgánico OLED (*organic light-emitting diode*) diodo orgánico de emisión de luz, la LED de luz blanca pura, sin mezcla de colores. Esta tecnología presenta una evolución adicional a los LED, ya que es una superficie la

que emite luz aportando mayor flexibilidad y libertad a la hora de integrarla en los diseños de las luminarias. Sin embargo, los OLED siguen en desarrollo y será en un futuro próximo cuando se presente como una solución viable de iluminación, puesto que en la actualidad, la eficiencia lumínica de los mismos se sitúa en los 50 lm/W.

El OLED es un diodo basado en una capa electroluminiscente constituida por una película de compuestos orgánicos, que son capaces de generar y emitir luz mediante estimulación eléctrica, es decir similares a las LED pero con semiconductores orgánicos y no inorgánicos. Hay ya científicos trabajando en ello, especialmente en la Universidad de Utah donde han creado un semiconductor orgánico dopado con platino que ha suscitado grandes perspectivas, ya que puede emitir luz en distintos colores, dependiendo de la carga de átomos de platino. Este logro supone un paso importante hacia una iluminación de luz puramente blanca más eficiente, menos costosa y que serán las bombillas del futuro.

Entre las ventajas adicionales que presentan las OLED está la facilidad del reciclaje, ya que están compuestas de materiales orgánicos como el carbono o el hidrógeno, así como la inexistencia de radiadores de evacuación del calor. En los próximos años, se observará una evolución de esta tecnología que nos llevará a la transparencia o la flexibilidad de la superficie, además del aumento de su eficacia, tamaño y vida útil o la inclusión de la fuente de luz en tejidos y superficies. El futuro se presenta innovador en lo que iluminación focalizada al diseño se refiere.

En el futuro de las tecnologías de la iluminación, hay que tener en cuenta el ahorro energético y la sostenibilidad del planeta, sin dañar el valor más importante que tiene la vida humana: su salud. Avancemos tecnológicamente con eficacia y seguridad para el medioambiente y para nuestra especie.

■ **Ventajas de la tecnología LED y ámbitos de aplicación**

La tecnología LED presenta una serie de ventajas frente a fuentes de iluminación tradicionales. Destaca su bajo consumo (alrededor del 80% respecto a una incandescente), su larga vida útil (hasta 50.000 horas), los menores costes de mantenimiento o la mayor eficacia frente a lámparas incandescentes o halógenas. Otra de las ventajas de la tecnología LED es la posibilidad de dinamismo en la iluminación, posibilitando cambio de color o en la escala de blancos (frío-cálido).

Los LED están basados en tecnologías de bajo voltaje, que hace mucho más sencilla y segura su instalación. Paralelamente, no tienen radiación IR (infrarrojo) ni UV (ultravioleta), ni contienen metales pesados como el mercurio, facilitando su reciclaje. Además, se pueden regular y orientar de una forma más sencilla, evitando el derroche de iluminación hacia el hemisferio superior.

Finalmente, la tecnología LED se presenta como un gran aliado en arquitectura y diseño, ya que presenta una gran flexibilidad y un tamaño reducido que permite ocultar la luz. Al mismo tiempo, permite una regulación total, ofreciendo colores saturados sin uso de filtros y luz directa. Tiene un encendido y reencendido instantáneo.

Además, si sumamos la posibilidad de regulación, obtenemos alumbrado conectado, hecho que nos permite gestionar a distancia la instalación desde un dispositivo móvil.

Las ciudades ya están apostando por la tecnología LED, gracias a todas estas ventajas. El alumbrado vial y urbano de muchas urbes ya usa esta tecnología más eficiente consiguiendo grandes ahorros. Las posibilidades de cambio de color permiten realzar el patrimonio de las ciudades incrementando el sentimiento de orgullo de los ciudadanos y el turismo, con los ingresos que se derivan de ello. Oficinas, tiendas, supermercados u hoteles también están haciendo una clara apuesta por el LED, ya que son espacios donde la duración y el bajo consumo son primordiales. La mayoría de estos establecimientos tienen la luz encendida muchas horas al día (muchas de ellas todo el día) por tanto, encontrar una tecnología que minimice el mantenimiento, ofreciendo una calidad de iluminación superior y con un menor consumo es primordial.

Los estadios deportivos también tienen una necesidad de ahorro energético además que, por temas de seguridad, el reencendido instantáneo es muy importante frente a un posible apagón. La tecnología LED soluciona estos problemas, ofreciendo además una mejor calidad para el juego y la retransmisión televisiva en alta definición.

En los hospitales, además de los ahorros energéticos, la iluminación puede mejorar la recuperación de los pacientes. Gracias al alumbrado dinámico de los LED se puede recrear el ciclo de luz del día en la habitación, consiguiendo un mejor descanso de los pacientes y una mejor recuperación. Jugar con la iluminación

de color en zonas que pueden resultar tensas para los pacientes, como por ejemplo en las salas de pruebas médicas, permite relajar y obtener mejores resultados en los diagnósticos.

■ Abreviaturas

AlGaAs, arseniuro de aluminio y galio.

Al₂O₃, zafiro, óxido de aluminio.

AsGaP, arseniuro de fósforo y galio.

CC, corriente continua.

CSi, carburo de silicio.

GaC, carburo de galio.

GaAs, arseniuro de galio.

GaAsP, arseniuro de galio y fósforo.

GaN, nitruro de galio.

GaP, fosfuro de galio.

LED, (*light emitting diode*) diodo emisor de luz.

Lm/W, Lumen/Watio.

LPE, epitaxia en fase líquida.

InGaN, nitruro de indio y galio.

IR, infrarrojo.

MBE, epitaxia de haces moleculares.

MOCVD, química órgano metálica por deposición a vapor.

OLED, (*organic light emitting diode*) diodo emisor de luz orgánica.

VPE, epitaxia en fase de vapor.

ZnSe, seleniuro de cinc.

■ Bibliografía consultada

Albella, J.M., Martínez-Duart, J.M. (1996). Fundamentos de electrónica física y microelectrónica. Addison-Wesley.

Amano, H., Kito, M., Hiramatsu, K. y Akasaki, I. (1989). P-type conduction in Mg-doped GaN treated with Low-Energy Electron Beam Irradiation (LEEBI). Japanese Journal of Applied Physics. 28, 2112-2114.

Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I. y Toyoda, Y. (1986). Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer. Appl. Phys. Lett. 48, 353-5.

Fernández-Garrido, S. (2009). Crecimiento de nitruros del grupo III por epitaxia de haces moleculares para la fabricación de diodos electroluminiscentes en el rango visible-ultravioleta. Tesis Doctoral. E.T.S.I. Telecomunicación (UPM).

Herranz, C., Ollé, J.M. y Jaáuregui, F. (2011). La iluminación con led y el problema de la contaminación lumínica. Astronomía. 144, 26-43.

http://www.asifunciona.com/fisica/af_leds/af_leds_5.htm

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/akasaki-lecture-slides.pdf

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/amano-lecture-slides.pdf

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/nakamura-lecture-slides.pdf

Khanna, V.K. (2014). Fundamentals of solid state lighting: Leds, Oleds, and their application in illumination and displays. CRC Press. pp. 604.

Maruska, H.P. y Tietjen, J.J. (1969). The preparation and properties of vapor-deposited single-crystal-line GaN. Applied Physics Letters. 15, 327-328.

MLA style: "Hiroshi Amano - Facts". Nobelprize.org. Nobel Media AB 2014. Web. 25 Jan 2015.

MLA style: "Isamu Akasaki - Facts". Nobelprize.org. Nobel Media AB 2014. Web. 25 Jan 2015.

MLA style: "Shuji Nakamura - Facts". Nobelprize.org. Nobel Media AB 2014. Web. 25 Jan 2015.

MLA style: "The Nobel Prize in Physics 2014". Nobelprize.org. Nobel Media AB 2014. Web. 25 Jan 2015.

Nakamura, S., Pearton, S. y Fasol, G. (2000). *The blue laser diode: the complete story*. Springer.

Nakamura, S. (1998). The roles of structural imperfections in InGaN-based Blue Light-emitting diodes and laser diodes. *Science*. 281, 956-961.

Nakamura, S., Senoh, M., Iwasa, N. y Nagahama, S. (1995). High-brightness In-GaN blue, green and yellow light-emitting diodes with quantum well structures. *Japan Jour Appl Physics*. 34, 797-799.

Pankove, J.I. (2012). *Optical processes in semiconductors*. En EE.UU. Dover Publications.

Pimputkar, S., Speck, J.S., DenBaars, S.P. y Nakamura, S. (2009). Prospects for led lighting. *Nature Photonics*. 3, 180-182.

Savage, N. (2000). Led light the future. *Technology Review* 103, 38-44.

Schubert, E.F., Kyu Kim, J. (2005). Solid-state light sources getting smart. *Science*. 308: 1274-78.

Shklovskii, B.I. y Efros, A.L. (1979). Electronic properties of doped semiconductors. In Russian. pp 416.

Yu, P.Y. y Cardona, M. (1996). *Fundamentals of semiconductors: physics and materials properties*. In Berlin. Springer.

Zheludev, N. (2007). The life and times of the led a 100-year history. *Nature photonics*. 1, 189-192.

El Mundo (8/10/2014). Nobel de Física para los padres de la revolución de las luces LED.