

El nitruro de galio y sus aleaciones: ¡y se hizo la luz... azul!*

JOAQUÍN DARÍO TUTOR SÁNCHEZ**
ALEXYS BRUNO ALFONSO***

RESUMEN: El estudio de los dispositivos semiconductores emisores de luz azul ha sido un tema de trascendental importancia tanto desde el punto de vista científico como tecnológico. En el presente artículo se presta especial atención al desarrollo científico y tecnológico de los diodos emisores de luz y los diodos láser basados en la tecnología del nitruro de galio. Las principales propiedades del nitruro de galio y dos de sus aleaciones, el nitruro de indio-galio y el nitruro de aluminio-galio, se presentan cualitativamente. Una breve introducción a las nuevas fuentes de luz basadas en los dispositivos semiconductores emisores de luz sirve de base argumental para hacer una breve reseña histórica de la investigación, el desarrollo y la innovación llevadas a cabo por Isamu Akasaki, Hiroshi Amano y Shuji Nakamura que dieron como resultado el diseño, construcción y posterior comercialización de los diodos emisores de luz azul y láser de luz azul. Finalmente, se hace una valoración de la trascendencia social, económica y medioambiental del los dispositivos emisores de luz con base en la tecnología del nitruro de galio.

PALABRAS CLAVE: Nitruro de galio y sus aleaciones, LED azul, LD azul.

ABSTRACT: The study of blue light emitting semiconductor devices has been a topic of transcendental importance since the point of view of science as well as technology. In the present paper special attention is paid to the scientific and technological development of light emitting diodes and laser diodes based on the gallium nitride technology. The principal properties of gallium nitride and two of its alloys, indium-gallium nitride and aluminum-gallium nitride are qualitatively presented. An introduction to the new sources of light based on the light emitting semiconductor devices allows a brief historical review of the researches, the developments and the innovations carried out by Isamu Akasaki, Hiroshi Amano and Shuji Nakamura. Such scientific and technological works gave as results the design, fabrication and commercialization of blue light emitting diodes and blue laser diodes. Finally, an analysis of the economical, social and environmental importance of the blue emitting devices based on gallium nitride technology is done.

KEY WORDS: Gallium nitride and its alloys, blue LED, blue LD.

INTRODUCCIÓN

Un gran amigo, el físico brasilero José Roberto Leite,[†] nos comentaba hace algunos años que “los nitruros” eran los peores materiales desde el punto de vista estructural y los mejores desde el punto de vista óptico y optoelectrónico. Y cuando José Roberto

* Este artículo se ha escrito en el marco de las acciones de la Red Temática “José Roberto Leite” de Divulgación y Formación en Nanotecnología, perteneciente al área 6 de Ciencia y Sociedad del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, CYTED.

** ETSI-ICAI, Universidad Pontificia Comillas, c/ Alberto Aguilera 25. Madrid. 28015, Madrid. España. Despacho 421. Teléfono:(+34) 915422800, Extensión: 4233. FAX: (+34) 915596569

*** Universidade Estadual Paulista. Ave. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, São Paulo. Brasil. Teléfono: (55) (14) 3103-6086. Extensión 7701. Fax (55) (14) 3103-6096. <alexys@fc.unesp.br>.

[†] José Roberto Leite (09/04/1942-11/06/2004)

se refería a “los nitruros”, lo hacía específicamente al nitruro de galio (GaN) y una de sus aleaciones, el nitruro de galio-indio ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$). Y esas malas y buenas propiedades, muy influyentes tecnológicamente, se extienden desde sus tamaños volumétricos hasta cualquiera de sus variantes nanométricas, como pueden ser los pozos cuánticos y multicapas cuánticas, los hilos cuánticos y los puntos cuánticos

Los dispositivos semiconductores emisores de luz roja y verde se desarrollaron desde los años setenta del siglo XX. Con la aparición en el mercado, al inicio de los 90s, de los primeros dispositivos semiconductores emisores de luz azul con base en la tecnología GaN, se completaba el espectro de luz con los colores fundamentales. Eso dio paso a nuevas aplicaciones como nuevas fuentes de luz para pantallas con más definición de colores, más brillantes, más eficientes energéticamente, que comenzaron a aplicarse en la iluminación de edificios, en las señales de tráfico, dispositivos de alta densidad de almacenamiento de información como son las nuevas generaciones de CDs y DVDs, etcétera.

“Los últimos avances logrados con el nitruro de galio y sus aleaciones como base de los nuevos dispositivos semiconductores emisores de luz podrían revolucionar la iluminación de los hogares y las oficinas en un plazo de unos cinco años”, según afirma un experto en ciencia de los materiales, Colin Humphreys, catedrático de la Universidad de Cambridge en el Reino Unido (La Flecha, 2009). El uso de estas fuentes de luz brillante podría contribuir a reducir hasta un 75% el consumo eléctrico y la consecuente reducción de la generación de CO_2 en millones de toneladas anuales.

Conozcamos pues un poco más de estos maravillosos materiales que asegurarán a la población mundial salud, riquezas y felicidad.

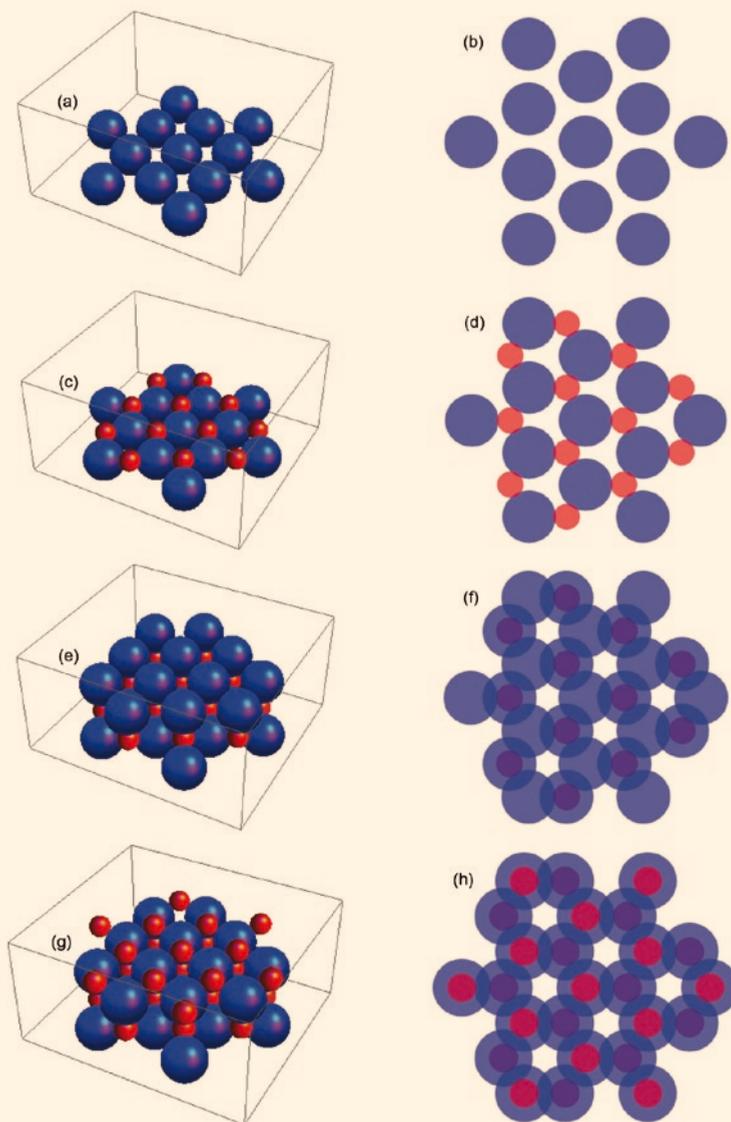
PROPIEDADES DEL GAN Y SUS ALEACIONES

El GaN es un compuesto del tipo III-V. De hecho, el Galio (Ga) y el Nitrógeno (N) pertenecen a los grupos III y V de la Tabla Periódica, respectivamente. En ese material los átomos de Ga y N pueden acomodarse de modo que formen una estructura cristalina. Por definición, una estructura de ese tipo consiste en una repetición periódica en el espacio de un motivo, que a su vez es formado por un grupo de átomos. Consecuentemente, un minúsculo observador situado en uno de los átomos del motivo tendría la misma visión de la estructura, si fuera trasladado a una de las copias de ese átomo. A la forma de repetir el motivo se le llama red cristalina, mientras que el motivo en sí es denominado base de la estructura cristalina. Es interesante notar que los átomos de la base pueden ser enumerados, y podemos imaginar que a cada uno de ellos corresponde una red periódica de átomos, la cual llamamos naturalmente subred atómica. Así, la estructura cristalina puede ser imaginada como un conjunto de subredes geoméricamente idénticas que difieren en su posición y en la especie atómica constituyente. En particular, hasta donde sabemos, hay dos posibles estructuras cristalinas del nitruro de galio: wurtzita y blenda de zinc. Aquí nos limitaremos al estudio del GaN con estructura wurtzita.

La estructura de wurtzita debe su nombre a un mineral de sulfuro de zinc y hierro, y consiste de una red hexagonal tridimensional y una base de cuatro átomos: dos átomos de Ga y dos de N. A su vez, la red hexagonal tridimensional es formada por una red hexagonal bidimensional con distancia interatómica $a \approx 3.19 \text{ \AA}$ y sus copias periódicas en la dirección perpendicular al plano, con periodicidad $c = a\sqrt{8/3} \approx 5.21 \text{ \AA}$. En la casa podemos crear un modelo de la estructura wurtzita con cuentas de vidrio de dos

tamaños posibles. Para facilitar la visualización, es bueno que a cada diámetro corresponda un color diferente. Las mayores corresponden naturalmente al Ga (mayor radio atómico) y pueden ser de color azul, mientras que las menores, para el N, serían rojas. Podemos dividir el trabajo en las siguientes cinco etapas (ver figura 1):

FIGURA 1. Secuencia de cuatro capas atómicas de la estructura wurtzita del GaN.



La columna izquierda muestra esferas que representan los átomos de Ga (azul) y Nitrógeno (rojo). A la derecha están las proyecciones horizontales correspondientes.

1. Comenzamos con un arreglo hexagonal bidimensional de átomos de Ga (cuentas mayores y azules). Primero, pegamos una cuenta en un papel sobre la mesa y la rodeamos por seis cuentas que pegamos en el mismo papel, de modo que sus centros formen un hexágono regular con la primera en el centro. La distancia entre los centros de las bolitas debe ser $a = (r_{\text{Ga}} + r_{\text{N}})\sqrt{8/3}$. Después podemos adicionar más y más bolitas, completando las seis vecinas de cada una de las que ya están en la mesa [ver figuras 1(a) y 1(b)]. En ese experimento, usaríamos una pequeña parte del total de cuentas disponibles. Pero debemos recordar que el arreglo ideal sería de infinitas bolitas.
2. Seguimos con un arreglo hexagonal bidimensional de átomos de N (cuentas menores y rojas). Colocamos una cuenta de forma que se acomode, por gravedad, en una posición estable sobre el arreglo anterior de átomos de Ga. Después adicionamos más y más cuentas rojas encima de las azules, de modo que todas se encuentren en posiciones equivalentes [ver figuras 1(c) y 1(d)].
3. El tercer arreglo será de átomos de Ga, y se hace necesario pegar una cuenta azul exactamente encima de cada bolita roja correspondiente al N de la segunda etapa [ver figuras 1(e) y 1(f)].
4. La gravedad nos ayuda nuevamente en la cuarta etapa, que es parecida con la segunda. La novedad es que las posiciones de los átomos de N deben alinearse verticalmente con los átomos de Ga de la primera etapa [ver figuras 1(g) y 1(h)].
5. La quinta etapa consiste en repetir la secuencia de etapas 1, 2, 3 y 4 (en ese orden), tantas veces cuanto queramos (o hasta que se nos agoten las cuentas). Ahora sí, en cada etapa 1 debemos tomar el cuidado de pegar un átomo de Ga exactamente encima de cada átomo de N de la etapa 4.

Desde el punto de vista químico, es importante notar que la estructura que acabamos de describir es tal que cada átomo posee cuatro vecinos más próximos, los cuales son de N para el Ga y viceversa. Además, los enlaces de cada átomo con cada par de vecinos forman un ángulo de $\arccos(-1/3) \approx 109.471^\circ$. Éste no es más que el ángulo entre los enlaces C-H en la molécula de metano (CH_4), y sabemos que está asociado a la hibridación sp_3 . En el caso del metano los orbitales híbridos son solamente del carbono, mientras que en el GaN participan orbitales híbridos de las dos especies químicas, Ga y N.

Se trata de un material muy duro, mecánicamente estable, con alta capacidad de transmisión de calor. Su sensibilidad a la radiación ionizante es baja (igual que otros nitruros del grupo III), por lo que es un material adecuado para fabricar componentes de satélites.

Las aleaciones del GaN que han sido más ampliamente utilizadas en óptica y electrónica son nitruro de galio e indio (InGaN) y el nitruro de galio y aluminio (AlGaIn). Las siglas que usamos aquí omiten la estequiometría del material. En esas aleaciones, el número total de átomos de N coincide con la suma de las cantidades de átomos de los elementos del grupo III. Además, es usual denotar por x el porcentaje de In con respecto al total de In y Ga en el InGaIn. Esas dos informaciones son expresadas en la fórmula global $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. También es importante tener en cuenta que, en general, una aleación como el InGaIn no posee la periodicidad de un cristal. Sin embargo, si ignoramos por un momento la diferencia entre los átomos de In y Ga, sí tendremos un

cristal. Por ejemplo, la estructura podría ser wurtzita. La diferencia entre el GaN y la aleación InGaN está en que los sitios del Ga en el primer material son ocupados desordenadamente por átomos de In o Ga en el segundo material.

El GaN es un semiconductor, o sea, aislante cerca del cero absoluto de temperatura (-273,15 °C) y un conductor razonable a la temperatura ambiente. Para comprender esto, podemos imaginar que cada electrón sólo se puede mover en el cristal si su energía está en alguna de las bandas permitidas, que a su vez son separadas por bandas prohibidas. Convenientemente, esa energía es expresada en electrón-Volt (eV), que no es más que la energía potencial que un electrón adquiere al pasar por una diferencia de potencial de un Volt, o sea, $1.60218 \cdot 10^{-19}$ Joules. Además, en el equilibrio a bajas temperaturas, los electrones llenan los niveles de energía en orden creciente. En un aislante, la última banda que contiene electrones está llena y se llama banda de valencia. La banda inmediatamente superior, que se llama banda de conducción, está totalmente vacía. Ambas bandas están separadas por una banda prohibida o *gap* (del inglés). Entonces, cuando la temperatura aumenta, los niveles de energía inferiores (superiores) de la banda de conducción (valencia) quedan parcialmente ocupados (desocupados). Lo más importante es que, en la presencia de un campo eléctrico débil, los electrones en bandas parcialmente ocupadas producen una corriente eléctrica. Por cierto, a la hora de describir la conducción producida por la banda de valencia, es más fácil concentrarse en los estados desocupados o huecos (de carga positiva) que en los propios electrones. Además, la incidencia de luz en el GaN puede producir más huecos y electrones de conducción, si su frecuencia es mayor que E_g/h , donde E_g es el ancho del gap y h es la constante de Planck ($4.13567 \cdot 10^{-15}$ eV s). Si pensamos en longitud de onda, ésta debería ser menor que ch/E_g , donde c es la velocidad de la luz en el vacío (299792458 m/s) y, por tanto, $ch \approx 1239.84$ eV nm.

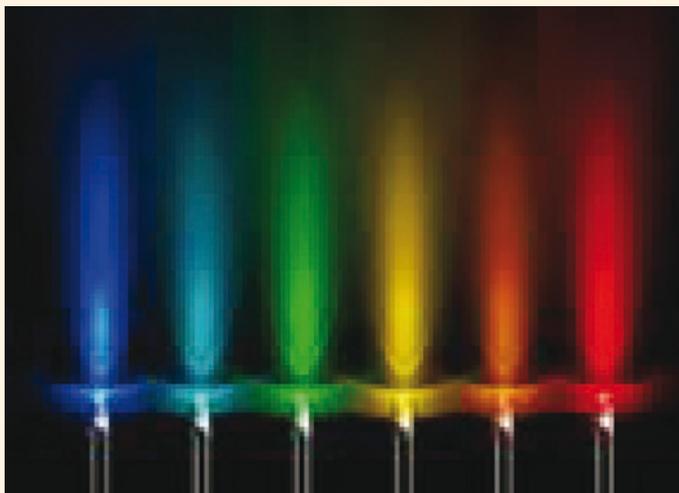
El gap del GaN es 3,4 eV, cuando la estructura es wurtzita y 3,2 eV, cuando es blenda de zinc. La primera estructura es la más usada en electrónica de alta potencia y dispositivos de alta frecuencia. Desde el decenio de 1990 ha sido utilizada en diodos emisores de luz (LED). El valor de longitud de onda que corresponde al ancho de su gap es 365nm. Si estudiamos el espectro electromagnético notamos que ese valor corresponde a una luz ultravioleta y está muy próximo del límite con la luz visible (380nm).

En su forma pura resiste el agrietarse y puede ser depositado sobre películas finas de zafiro (mineral de Al_2O_3) o de carburo del silicio (SiC). El GaN puro puede ser modificado mediante la introducción de átomos de silicio en los sitios de Ga, o átomos de oxígeno en los de N. Ese proceso es llamado dopaje y produce un exceso de electrones de conducción en el semiconductor, que pasa a ser clasificado como tipo n (de negativo). Alternativamente, el dopaje puede consistir en sustituir átomos de Ga por magnesio. De esa forma se obtiene un semiconductor tipo p (de positivo), pues la falta de electrones es un exceso de huecos. Sin embargo, la inclusión de impurezas en el nitruro de galio, en particular de silicio y de magnesio, afecta considerablemente la estructura cristalina convirtiéndolo en un material frágil. En general, el GaN y sus aleaciones también tienden a tener una alta concentración de defectos o dislocaciones, en el orden de cien millones hasta diez mil millones de defectos por centímetro cuadrado, cuando son dopados con impurezas de silicio y/o magnesio. Por otro lado el crecimiento de cristales de GaN no es tan fácil como el crecimiento de silicio. El GaN funde a una temperatura de 2500 °C, por lo que es necesario mantener presión de 64 mil atmósferas para evitar la descomposición del material.

El AlGaN es una aleación de AlN y GaN y su comportamiento electrónico es de semiconductor. Las aleaciones de AlGaN de alta calidad son de especial interés debido a que ellas poseen una respuesta espectral de emisión y absorción que va desde los 3,4 eV (aproximadamente la respuesta espectral del GaN) a los 6,2 eV (que es la respuesta espectral del AlN). Como puede observarse, hay una variación energética del espectro del AlGaN de 2,8 eV. Esta propiedad óptica permite que este tipo de aleación pueda ser fabricada para operar en rangos que van desde el espectro visible hasta el ultravioleta con sólo modificar la composición del aluminio en la aleación. Al igual que el GaN, esta aleación puede ser depositada sobre sustratos de carburo de silicio o de zafiro. Cuando se usa en la composición de heteroestructuras AlGaN/GaN, presenta una desventaja óptica que le hace disminuir su eficiencia: la llamada "luminiscencia amarilla" (*yellow luminescence*). Se trata de una banda muy ancha de luminiscencia amarilla que se presenta independientemente del método de deposición de los materiales y del tipo de sustrato sobre el que se realiza la deposición (D. R. Hang *et. al.* 2001). Si bien es cierto que este efecto empobrecedor de la eficiencia óptica del sistema se presenta en todas las aleaciones del GaN, el mismo se sobredimensiona en el AlGaN.

Por otro lado, tenemos al nitruro de galio e indio (InGaN o $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$). Es una aleación semiconductora de nitruro de galio (GaN) y de nitruro de indio (InN). Este sistema se trata de un semiconductor cuyo *gap* se puede ajustar, variando la cantidad de indio en la aleación. La proporción de In/Ga está normalmente entre 0,02/0,98 y 0,3/0,7. La longitud de onda emitida por esta aleación va desde el ultravioleta, pasando por el violeta-azul, hasta el azul (figura 2). Para proporciones mayores de In/Ga pueden alcanzarse emisiones en el rojo. Esta aleación tiene una alta capacidad calorífica y su sensibilidad a la radiación ionizante es baja, por lo cual es también potencialmente un material adecuado para componentes en satélites. Al igual que el GaN y el AlGaN puede ser depositado en forma de capas sobre sustratos de zafiro y carburo de silicio. Y, del mismo modo que en la aleación AlGaN, en el InGaN se presen-

FIGURA 2. Emisiones de dispositivos optoelectrónicos en base a InGaN.



Tomado de: <http://www.tradenote.net/Lamps_2/>.

ta también la llamada luminiscencia amarilla aunque en menor grado, lo que la hace algo más eficiente.

Sin embargo, el InGaN tiene una desventaja “ventajosa”. Se ha comprobado que, cuando la proporción de indio de encuentra entre un 15% y un 85%, se presenta un efecto llamado descomposición espinoidal (*spinoidal decomposition*) en esta aleación. Este efecto es un mecanismo por el cual dos o más componentes de un sistema pueden separarse en distintas regiones o fases con distinto porcentaje de composición química, las cuales tienen diferentes propiedades físicas. Esto hace que se formen estructuras nanométricas inmersas en capas muy delgadas de la aleación InGaN (Rodríguez-Coppola, H. *et al.*, 2004). Por confinar portadores de carga en forma análoga a lo que hacen los núcleos atómicos en el vacío, esas estructuras inmersas son llamadas puntos cuánticos. De esta manera, las propiedades ópticas capas ultradelgadas de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, con puntos cuánticos de $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ inmersos (donde $y \neq x$), serán muy diferentes y, ciertamente, aprovechables.

No estaría nada mal, antes de continuar el tema de las sorprendentes propiedades optoelectrónicas del GaN y sus aleaciones, hacer mención en este momento a algunas características de dispositivos optoelectrónicos. Tales dispositivos presentan comportamiento óptico que puede ser controlado electrónicamente. A continuación, hablaremos más sobre ellos.

¿CÓMO FUNCIONAN LOS DISPOSITIVOS OPTOELECTRÓNICOS?

Las principales fuentes de luz en la optoelectrónica son:

- Diodo emisor de luz.
- Diodos láser o diodos láser por inyección.

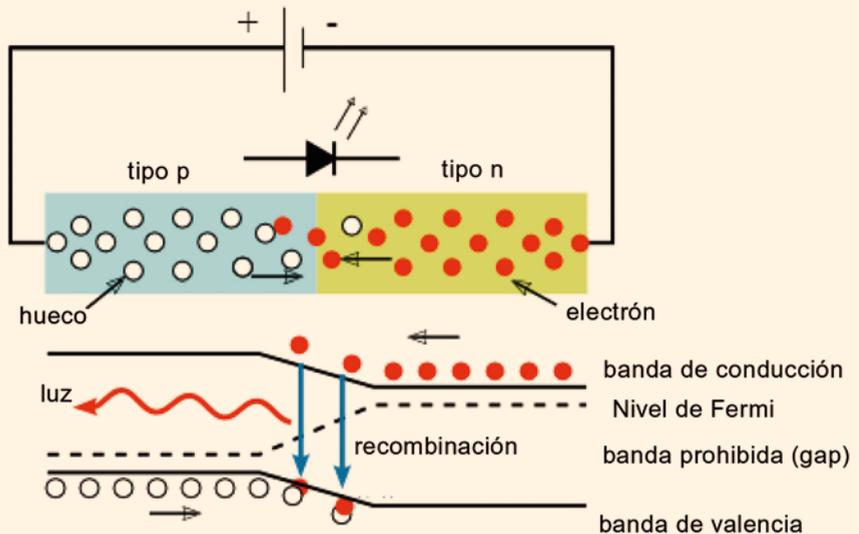
Para comprender su funcionamiento, conviene recordar que un diodo es una válvula electrónica, o sea, un dispositivo que permite el paso de la corriente en un sentido, y lo dificulta en el sentido contrario. Los primeros diodos funcionaban en tubos de vacío e hicieron parte de los circuitos de los primeros aparatos receptores de radio y televisión a mediados del siglo XX. La corriente que pasaba a través de ellos era controlada por el voltaje entre sus **dos** electrodos, de donde se desprende el nombre de **diodo**. Felizmente, en la electrónica moderna, fue posible sustituir los tubos de vacío por diodos semiconductores. Estos últimos son mucho menores y más económicos, y se basan en junturas p-n, o sea, en la unión de un semiconductor tipo p con otro tipo n. Como el dispositivo tiene dos terminales, el término diodo continúa siendo adecuado.

En una juntura p-n, ocurre una difusión natural de los portadores de carga excedentes: una pequeña parte de los huecos va al lado tipo n, mientras que una minoría de electrones de conducción va hacia el lado tipo p. A su vez, esas cargas se acumulan en ambos lados de la superficie de separación, y esto viene acompañado de voltaje de equilibrio que inhibe una mayor difusión de cargas. Y éste se debe a un potencial electrostático que aumenta gradualmente en la medida que recorremos el dispositivo en el sentido p→n. Entonces, cuando se le aplica una caída de potencial a la juntura p-n, se facilita el flujo de huecos en el sentido p→n y electrones en el sentido n→p. Como los portadores tienen signos de carga diferentes, esas corrientes se refuerzan, en lugar de anularse. Ése es el sentido de voltaje en que la corriente es permitida y se lla-

ma polarización directa. Lo más interesante es que, al aplicar una subida de potencial, lo que se estimula es el regreso de los portadores de carga difundidos hacia su región original. Pero éstos son portadores minoritarios y la corriente resultante será despreciable. Por tanto, se trata de la configuración en que la corriente es prácticamente bloqueada, y que es llamada polarización inversa.

La descripción que acabamos de presentar sobre el principio de funcionamiento del diodo semiconductor sugiere que cosas más interesantes todavía pueden ocurrir. De hecho, en la polarización directa, una parte de los portadores mayoritarios (huecos del lado p, electrones de conducción del lado n) encontrará portadores opuestos durante su paso por el dispositivo (ver figura 3). En esas condiciones, el electrón de conducción puede “llenar un hueco”. Ese proceso, llamado recombinación, presupone una transición del electrón de conducción desde un estado cerca del borde inferior de la banda de conducción hasta otro próximo del borde superior de la banda de valencia. La energía emitida en ese proceso es cedida al campo electromagnético, en otras palabras, la recombinación viene acompañada de la emisión de radiación electromagnética. Y así, tenemos un diodo emisor de luz, ¡que es un dispositivo optoelectrónico! Ese tipo de dispositivo es más conocido por las siglas LED (acrónimo inglés de *light-emitting diode*), y ha estado presente en aparatos electrónicos en las últimas décadas. Además, su popularidad aumentó recientemente con el lanzamiento de las pantallas de televisión basadas en una matriz de LEDs. Claro, el color de la luz (longitud de onda de la radiación electromagnética) emitida por cada LED depende del material semiconductor empleado en la construcción del diodo. En un principio, ella puede variar desde el infrarrojo, pasando por el visible (ver figura 2), hasta el ultravioleta. Los LEDs que emitan luz infrarroja recibirán la denominación de IRED (Infra-Red Emitting Diode), mientras que los que emitan luz ultravioleta llevarán el nombre de UV LED (*ultraviolet light-emitting diode*).

FIGURA 3. Funcionamiento interno de un LED.

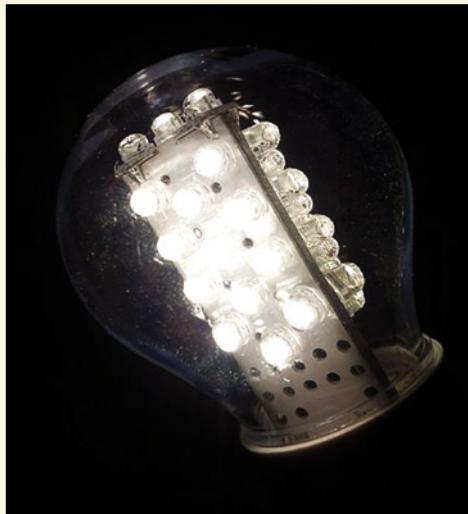


Esta cuestión de usar LEDs para producir luz de varios colores también nos hace pensar naturalmente en el arco iris. La luz blanca que usamos en nuestro quehacer diario se puede descomponer en una gama de colores e, invirtiendo el proceso, ¡podemos producir una luz blanca mediante la combinación de varios colores! Y cómo hacer eso mediante un LED? Bueno, habría que modificar el dispositivo de forma que sean posibles diversos procesos de recombinación electrón-hueco, y que cada uno de ellos produzca un color diferente. Sin entrar en más detalles, podemos decir que el LED de luz blanca ya es una realidad (ver figura 4). Su desarrollo es un intento muy bien fundamentado para sustituir las bombillas actuales por dispositivos mucho más ventajosos caracterizados por:

- un consumo de un 92% menos que las bombillas incandescentes de uso doméstico común;
- un consumo de un 30% menos que la mayoría de los sistemas de iluminación fluorescentes;
- una duración de hasta 20 años.

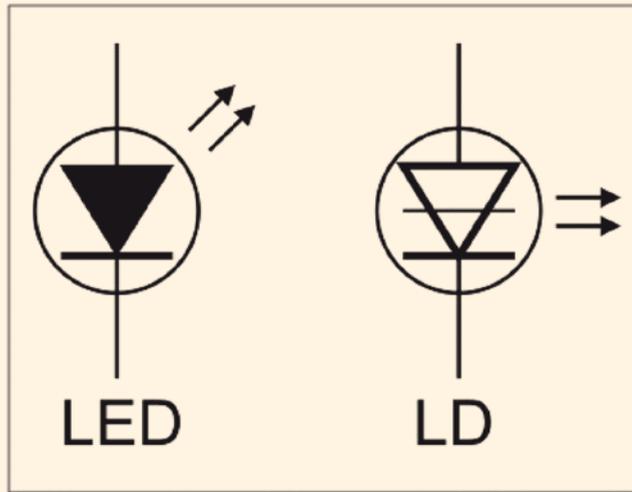
Por otro lado, existen los llamados diodos láser, LD (acrónimo inglés de *laser diode*), también llamados a veces diodos láser de inyección, ILD (acrónimo inglés de *injection laser diode*). El diodo láser es un dispositivo semiconductor similar a un LED, pero es capaz de emitir luz láser. Ese tipo de radiación electromagnética tiene la propiedad de ser temporal y espacialmente coherente. Esto significa que puede producir patrones de interferencia debido a una alta correlación de la fase de las oscilaciones a lo largo del haz, que a su vez puede ser focalizado sobre regiones pequeñas a grandes distancias. La simbología para diseños optoelectrónicos es diferente respecto a los LED, como puede verse en la figura 5. Estos dispositivos pertenecen a las llamadas

FIGURA 4. LED de luz blanca.



Tomado de: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:LED_light_bulb.jpg>.

FIGURA 5. Simbología de diseño de un LED y un LD.



Tomado de: <<http://laserpointerforums.com/f44/symbol-laser-diode-64064.html>>.

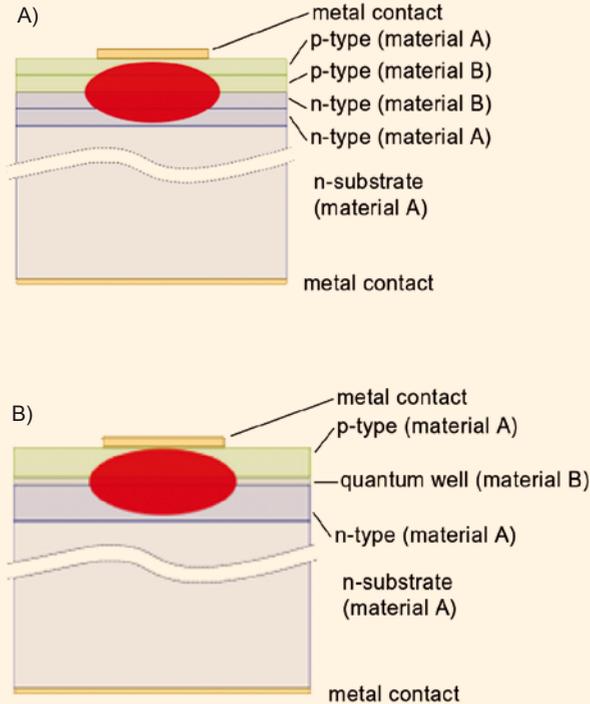
luces de estado sólido (*solid state light*; SSL) y resultan ser muy ventajosos respecto a los láseres gaseosos porque:

- son muy eficientes;
- son muy fiables;
- tienen tiempos medios de vida muy largos;
- son económicos;
- permiten la modulación directa de la radiación emitida, pudiéndose modular a décimas de Gigahercio;
- su volumen y peso son pequeños;
- el umbral de corriente que necesitan para funcionar es relativamente bajo;
- su consumo de energía es reducido (comparado con otras fuentes de luz);
- el ancho de banda de su espectro de emisión es angosto (puede llegar a ser de sólo algunos KHz).

¿Y, cómo funcionan estos dispositivos?

El esquema de funcionamiento de estos dispositivos, LED y LD, son muy similares porque dependen del proceso de recombinación de electrones y huecos en la región activa de una unión p-n, o sea, de la región activa de un diodo. En la figura 6 se muestra el esquema de funcionamiento genérico de estos dispositivos. La figura 6(a) muestra el esquema de un diodo de doble heteroestructura, donde la capa intermedia de material B está rodeada de un material A con diferente tipo de dopaje: tipo n o tipo p. La ventaja que tiene este tipo de diodo es que la región activa de recombinación de electrones y huecos es la capa de material B, que debe tener un *gap* menor que el material A. Esto contribuye a que haya mayor cantidad de pares electrón-hueco que se recombinan, aumentando la eficiencia del dispositivo.

FIGURA 6. A) esquema de diodo de doble heteroestructura. **B)** esquema de diodo de pozo cuántico



Tomado de: <http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_diode>.

¿Y qué ocurre si la capa de material de B se hiciera extremadamente fina, con una espesura de pocos nanómetros? Bueno, desde el punto de vista teórico eso trae un importante confinamiento de los portadores de carga. Por tanto, se nos hace necesario usar conceptos y métodos de la mecánica cuántica para describir adecuadamente los nuevos estados posibles para electrones de conducción y huecos. Eso justifica que tales capas superfina se llamen pozos cuánticos semiconductores. Mientras tanto, del punto de vista experimental, el crecimiento o la fabricación de pozos cuánticos semiconductores hace parte de lo que naturalmente denominamos de nanotecnología. Los avances en esta área del conocimiento han permitido la creación del diodo de pozo cuántico (ver figura 6(b)). Así se alcanza una mayor eficiencia energética, a la vez que un mayor confinamiento de la región en que se emite la radiación. Ésos son ingredientes fundamentales para la emisión de luz láser.

Entonces, conocidos estos detalles de los dispositivos optoelectrónicos, ¿cómo aparecen el nitruro y sus aleaciones en estos sistemas de emisión de luz?

Y SE HIZO LA LUZ... AZUL

Si se quiere conocer cómo se introdujeron el nitruro de galio y sus aleaciones en la sorprendente aventura de los diseños y construcciones de los LED y los LD, tenemos

FIGURA 7.

De izquierda a derecha: Isamu Akasaki, Hiroshi Amano y Shuji Nakamura.

que hacer un breve recorrido por la ciencia y la tecnología japonesa de la época. Y este recorrido tendrá que pasar, ineludiblemente, por tres personalidades científicas: Isamu Akasaki, Hiroshi Amano y Shuji Nakamura (figura 7).

Desde los años setenta del siglo xx ya se utilizaban y comercializaban los LED de emisiones roja y verde; entre sus mayores usos se destacaban los indicadores y las señales. Y ya, desde estos mismos años se comenzó la búsqueda de los LED azules.

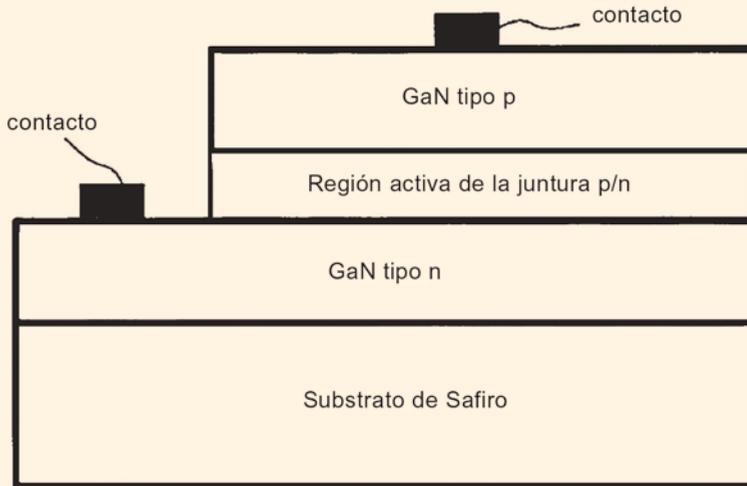
Los principales materiales, potencialmente soportes de los LED azules, eran el carburo de silicio (SiC), el seleniuro de zinc (ZnSe) y el nitruro de galio (GaN). En el carburo de silicio, la recombinación entre estados en los bordes de las bandas de conducción y valencia requiere la participación de vibraciones de la estructura cristalina. Eso reduce la eficiencia del proceso y el SiC dejó de ser un candidato al reto de la tecnología de emisión azul. El seleniuro de zinc no presentaba esa desventaja, pero su vida útil como emisor de luz era muy efímera, debido a la migración electrónica del contacto metálico en el diodo, a la capa semiconductor (región activa) de emisión de luz.

Entonces, la ciencia y la tecnología japonesa apostaron por el GaN. El trabajo de investigación y desarrollo alrededor del GaN como base material de LED y LD se realizó prácticamente en paralelo en la Universidad de Nagoya y en el área de Innovación y Desarrollo (I+D) de la Nichia Chemical Industries, Ltd.; Akasaki y Amano en la Universidad de Nagoya y Nakamura en la Nichia Chemical Industries. Y en todo este trabajo científico y tecnológico se enfrentaron a los mismos problemas experimentales y de desarrollo tecnológico (Takeda Award, 2002).

El problema principal encontrado por Akasaki y Amano era la deposición (o crecimiento) de las capas de GaN sobre los sustratos o sobre capas con diferente tipo de dopaje. Desechando el método de epitaxia de hidruros en fase vapor HVPE (siglas en inglés de *hydride vapor phase epitaxy*) y, sustituyéndolo por el método de epitaxia por haces moleculares MBE (siglas en inglés de *molecular beam epitaxy*), se mejoraba la eficiencia óptica del LED. La eficiencia óptica usando el método HVPE era de un 0,12 %, bastante pobre, y con el método MBE se incrementaba algo, pero no sensiblemente diferente. La figura 8 muestra un esquema simplificado de aquellos LED de GaN.

Ambos métodos de deposición o crecimiento de capas de GaN presentaban desventajas considerables desde el punto de vista tecnológico. El método HVPE no aseguraba la cristalinidad de las capas a una alta velocidad de crecimiento. El método MBE acarrea problemas de estequiometría del compuesto (GaN), por la extracción

FIGURA 8. Esquema simplificado de un diodo emisor de luz de GaN, según patente US 6, 787, 435 B2 de septiembre 7 de 2004.



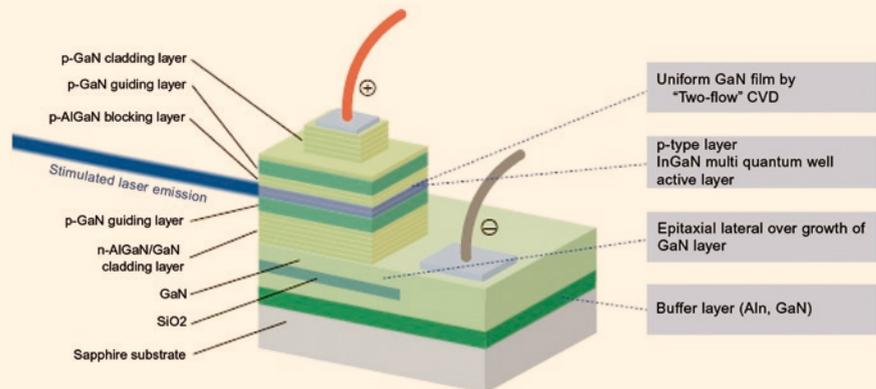
del nitrógeno en condiciones de ultra alto vacío. Finalmente, Akasaki y Amano diseñaron y desarrollaron un equipo de deposición de vapores químicos metalorgánicos, MOCVD (siglas en inglés de *metal organic chemical vapor deposition*) y con este método realizaron alrededor de 1500 experimentos en dos años. La buena calidad cristalina de las capas de GaN, así como la uniformidad de espesores fueron confirmadas con caracterizaciones ópticas, eléctricas y mecánicas. Con mucho esfuerzo experimental, lográndose capas de GaN tipo p con buena calidad y disminuyendo la región activa del diodo a espesores nanométricos, se aseguraba un LED azul de buen rendimiento óptico (Hiroshi Amano *et al.*, 1989). Akasaki y Amano llevaron a cabo el desarrollo tecnológico del LED azul en la empresa Toyoda Gosei Co. Ltd., y en 1992 lograron un LED azul de 1,0% de eficiencia, y Toyoda Gosei lanzó este producto al mercado en 1995. Por aquellos años, y simultáneamente con los estudios del LED azul, Akasaki y Amano habían emprendido también el estudio, diseño y construcción de un LD azul y sus positivos resultados fueron publicados en 1990 (ver Hiroshi Amano *et al.*, 1990). En estos estudios experimentales volvió a estar presente la nanotecnología: la región activa de recombinación del diodo láser estaba constituida por una estructura de pozos cuánticos múltiples. No obstante, los buenos resultados obtenidos, este diodo láser azul, diseñado y construido por Akasaki y Amano, no fue comercializado.

Nakamura también apostó por el GaN en la empresa Nichia Chemical Industries, Ltd. Y confrontó las mismas dificultades experimentales que Akasaki y Amano, hasta que llegó a la necesidad del uso del método MOCVD. La única diferencia en la utilización de este método de depositar o crecer capas de GaN, respecto a los trabajos de Akasaki y Amano, radicaba en que para lograr buena uniformidad de las capas, Nakamura se basaba en el control del esquema de flujos de gases durante la deposición, mientras que Akasaki y Amano se basaban en las condiciones de baja temperatura a que debía estar el sustrato y la capa amortiguadora o *buffer*. Parece ser que existe cierta solución de compromiso entre estos dos parámetros de deposición de capas,

pues un buen balance de ambas produce buenos resultados. Nakamura tuvo mejor suerte que Akasaki y Amano, con sólo 500 ensayos, logró un buen LED azul, con una buena eficiencia. Sin embargo, tuvo una idea novedosa: ¡sustituir la capa intermedia de región activa por una capa de InGaN! En 1992, logró una capa intermedia de InGaN de muy buena calidad que sirvió para optimizar la luz emitida y aumentar la eficiencia de emisión (Nakamura y Mukai, 1992). Nakamura también utilizó métodos muy novedosos para obtener capas de GaN con dopaje tipo p, que era ciertamente difícil, y logró sus primeros LED con eficiencia de 0.18 %; posteriormente con la introducción de las capas de InGaN en la región activa del diodo logró un 2,7% de eficiencia de emisión y esto fue suficiente para la Nichia Chemical Industries, Ltd., que lanzó su primer LED azul al mercado en 1993. Claro que los logros de la nanotecnología no se podían dejar de tener en cuenta: sustituyendo la capa intermedia de InGaN por una estructura de pozos cuánticos múltiples, Nakamura logró un LED azul de 9,2% de eficiencia de emisión y un tiempo de vida de 100 mil horas. Con todos estos resultados Nakamura se lanzó al diseño y construcción del LD azul. Su diseño de diodo láser tenía la particularidad de ser una extensión del diseño del diodo con región activa con base en una estructura de pozos cuánticos múltiples de InGaN. Su excelente resultado fue publicado en Nakamura, S. *et al.* (1996). En 1999 la Nichia Chemical Industries, Ltd., lanzó al mercado su primer LD azul con una eficiencia de más de 9% y un tiempo de vida estimado en más de 10 mil horas. La complicación del diseño y construcción tecnológica de estos dispositivos ha ido creciendo con los desarrollos y las innovaciones tecnológicas en universidades, centros de investigación y empresas. En la figura 9 se muestra el esquema del LED azul de Nakamura.

Nuevos modelos de LED y LD han sido desarrollados a partir de los éxitos en el conocimiento y aprovechamiento de las propiedades físicas del grafeno. Se trata de una monocapa atómica que entra en la composición del grafito, donde los enlaces entre los átomos de carbono imitan la geometría de un panel de abejas (*honeycomb*, en inglés). La novedad en los dispositivos radica en que el contacto metálico ha sido sustituido por capas de grafeno, mejorando considerablemente las propiedades electrónicas de estos dispositivos (G. Jo *et al.*, 2010).

FIGURA 9. Esquema del LED azul de Shuji Nakamura. Takeda Award (2002).



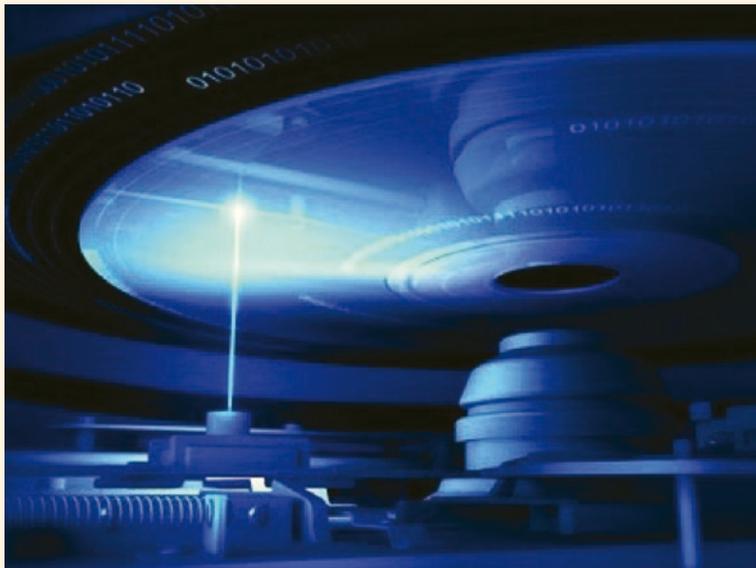
Fuente: Achievement Facts Sheet Techno-Entrepreneurial Achievements for Social/Economic Well-Being. The Development of Blue Light Emitting Semiconductor Devices.

¿Y TODO ESTO PARA QUÉ HA SERVIDO?

De manera ingenua, podíamos decir que el LED azul y el LD azul sirven para completar el espectro de dispositivos emisores de luz, junto con los LED y LD verdes y rojos. Pero esto va mucho más allá.

El nitruro de galio se ha convertido en el compuesto clave para la producción de emisores de luz ultravioleta, azul, verde y amarilla, con tan solo cambiar la composición del indio en la capa activa intermedia de los diodos. El desarrollo del LD azul permitió que en 2002 saliera al mercado la nueva generación de CDs y DVDs conocidos como los “Blu-ray Disc” (ver figura 10). Cada vez más se usan los LED azules con base en GaN, para reemplazar bombillas incandescentes domésticas y públicas, así como en señalizaciones de tránsito (ver figura 11). Ya en el año 2002, el Departamento de Transito de California había reemplazado 200 mil señales de tráfico por LED y en Japón un millón de señales de tránsito y 770 mil señales peatonales estaban basadas en la tecnología de los LED azules, y las combinaciones de colores que brinda la tecnología de los LED con base en el GaN. Claro que esto podría pensarse que se hace por novedad, pero no, gracias a las excelentes propiedades de estos dispositivos emisores de luz, su uso o remplazo de otras fuentes de luz permiten un millonario ahorro de energía eléctrica y una reducción de emisión de CO₂ de más de 110 mil toneladas anuales. Desde la primera comercialización de los LEDs de GaN de Shuji Nakamura, la comercialización ha aumentado en 400 mil millones de dólares en los EUA. Por otro lado, la industria de TV ha logrado éxitos inalcanzados anteriormente con el uso de las combinaciones de LEDs azules, rojos y verdes para lograr las pantallas planas de “full-color” que desde hace años ya se están comercializando.

FIGURA 10. Tecnología del Blu-ray Disc.



Tomado de: <<http://www.es.globaltalentnews.com/articles/328/la-revolucion-luminica.html>>.

FIGURA 11. Encendido navideño con LED azules en Tokio. 2008.



Tomado de: <www.eurotechnology.com/market_reports/lighting/>.

CONCLUSIONES

Ninguna conclusión podría ser mejor que la que se hizo cuando Akasaki, Amano y Nakamura fueron galardonados con el premio Takeda Award (2002). En este premio se concluyó que:

El desarrollo del diodo emisor de luz azul y el láser azul han completado el espectro de luz para los dispositivos semiconductores. La luz azul que emiten los dispositivos semiconductores se espera que permita una amplia gama de aplicaciones relacionadas con la electrónica (grandes y brillantes pantallas de televisores a todo color, señales de control de tráfico y las lámparas de alumbrado). De especial importancia, es el hecho de que se espera que los LED de luz blanca contribuyan a la reducción del consumo de energía eléctrica a través de un alto nivel de eficiencia de emisión de luz y la reducción de residuos contaminantes a través de su vida útil.

Akasaki, Amano, y Nakamura, respectivamente, lograron el desarrollo, a través de enfoques muy creativos, de dispositivos semiconductores emisores de luz azul, que permiten muchas aplicaciones en la vida humana, y extender el valor, la riqueza y la felicidad de las personas.

REFERENCIAS

- La Flecha. (2009). "El nitruro de galio podría revolucionar la iluminación a corto plazo". *Tu Diario de Ciencia y Tecnología*. 03 julio 2009.
- D. R. Hang, C. H. Chen, and Y. F. Chen, H. X. Jiang and J. Y. Lin. (2001). "Al_xGa_{1-x}N/GaN band offsets determined by deep-level emission". *Journal of Applied Physics*, vol. 90, núm. 4, agosto 2001.
- Rodríguez-Coppola, H., Tutor-Sánchez, J., Leite, JR., Scolfaro, LMR., García-Moliner, F. (2004). "The absorption coefficient of low dimensional semiconductor systems: The photoluminescence of InGaN quantum dot". *Microelectronics Journal*, 35 (2): 103-110, febrero.
- Takeda Award. (2002). Achievement Facts Sheet Techno-Entrepreneurial Achievements for Social/Economic Well-Being. The Development of Blue Light Emitting Semiconductor Devices. To Isamu Akasaki (Meijo University) and Hiroshi Amano (Meijo University) Shuji Nakamura (University of California, Santa Barbara).
- Hiroshi Amano, Masahiro Kito, Kazumasa Hiramatsu y Isamu Akasaki. (1989). "P-type conduction in Mg-Doped GaN treated with low-energy electron beam irradiation (LEE-BI)". *Japanese Journal of Applied Physics*. 28: L2112-L2114.
- Hiroshi Amano, Tsunemori Asahi y Isamu Akasaki. (1990). "Stimulated emission near ultraviolet at room temperature from a GaN film grown on sapphire by MOVPE using an AlN buffer layer". *Japanese Journal of Applied Physics*. 29: L205-L206.
- Nakamura, S. y Mukai, T. (1992). "High-quality InGaN films grown on GaN films". *Japanese Journal of Applied Physics*. 31, L1457 (1992).
- Nakamura, S. *et al.* (1996). "InGaN-based multiquantum-well-structure laser diode". *Japanese Journal of Applied Physics*. 35, L74 (1996).
- G. Jo *et al.* (2010). "Large-scale patterned multi-layer graphene films as transparent conducting electrodes for GaN light-emitting diodes". *Nanotechnology*. 21, 175201 (2010).