

La era de la fotón

TEXTO: MANUEL C. RUBIO FOTOGRAFÍA: ALBERTO G. IBÁÑEZ





AL ELECTRÓN, PROTAGONISTA INCUESTIONABLE DE LA REVOLUCIÓN MICROELECTRÓNICA VIVIDA DURANTE LA ÚLTIMA PARTE DEL SIGLO PASADO, LE HA SALIDO UN NUEVO Y SERIO COMPETIDOR: EL FOTÓN, una partícula que no tiene carga ni masa y que, por lo tanto, es mucho más eficiente y rápido en el transporte de la información. Pero aunque seguramente llegará un día en que los ordenadores sean totalmente fotónicos, hoy la sustitución de la tecnología electrónica por la fotónica sólo es un sueño. Mientras llega el momento de verlo cumplido, la ciencia se enfrenta al reto de combinar ambas formas, mediante el desarrollo de componentes que sean capaces de convertir la señal eléctrica de los sistemas electrónicos en señal óptica y ésta otra vez en eléctrica. Este campo de la investigación está actualmente en manos de la optoelectrónica, una disciplina con múltiples aplicaciones en sectores clave como la industria automovilística, la aeronáutica o las técnicas médicas y sin la que cual no existirían, por ejemplo, ni los lectores de discos compactos ni las comunicaciones ópticas, que hacen posible que hoy podamos visualizar una página de internet de cualquier parte del mundo.

Los grandes avances que se han producido a lo largo de la historia de la humanidad han correspondido con la introducción de tecnologías con un factor multiplicador relativamente reducido. Así, por ejemplo, se estima que en la agricultura el paso del arado convencional a la mecanización agrícola supuso un factor del orden de 100; en el caso de la revolución industrial, este factor sería de 1.000. En la segunda mitad del siglo pasado, algunos ingenios electrónicos, como el transistor o el chip, o las tecnologías de la información surgidas del encuentro entre la informática y las telecomunicaciones, dispararon en algunos casos estos factores multiplicadores hasta el orden de 10.000. Pero esta revolución microelectrónica, protagonizada por un ente minúsculo llamado electrón, que ha abierto nuevas posibilidades y ha cambiado nuestra forma de vivir y entender la realidad, puede experimentar aún un mayor impulso en los próximos años de la mano de la nanotecnología y otras ciencias asociadas, como la optoelectrónica, palabras hoy de moda en los ambientes científicos y universitarios de medio mundo, y de cuya investigación se podrían obtener en un futuro no muy lejano aplicaciones industriales que ahora no se pueden ni imaginar.

Y es que todo apunta a que en los desarrollos del siglo XXI las tecnologías ópticas jugarán un papel decisivo. La invención en los años sesenta del láser, primero, y de la fibra óptica después, dieron paso a un nuevo heraldo tecnológico para competir con el electrónico: el fotón. Así, esta partícula, que no tiene carga ni masa y que, por lo tanto, es mucho más eficiente y rápida en el transporte de información (no se "distrae", interactuando con otros portadores de su especie o con el medio) es cada vez un rival más importante para el electrónico, que hasta ahora había sido el mensajero de excepción y el protagonista incuestionable de la llamada era de la información. Desde hace años, el láser, cuyo principio fue establecido por Einstein en 1917, se ha convertido en la herramienta estándar de la fabricación industrial.

Pendientes de la luz

La palabra láser, acrónimo en inglés de "light amplification by stimulated emission of radiation", evoca sin duda imágenes de guerras galácticas y llamativos espectáculos de luz y sonido, pero es mucho más usual de lo que parece. Aunque no veamos su fino haz luminoso, es probable que todos los días hagamos algo con esta herramienta construida por primera vez por el esta-

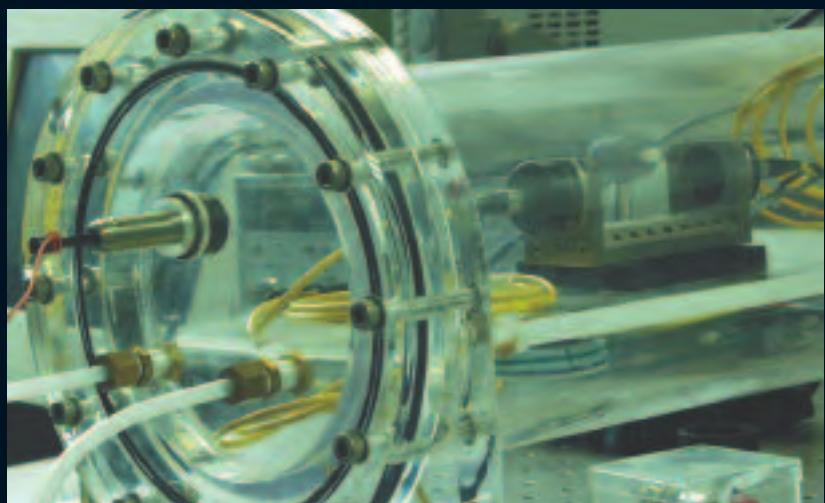
dounidense Theodore Harlod Maiman hace más de cuatro décadas: lo tenemos en casa –lector de CD's–, en el trabajo –impresoras–, en la compra –lector de códigos de barras–,... y es esencial en lugares tan diversos como quirófanos, industrias y talleres, laboratorios de investigación o hangares militares.

Casi al mismo tiempo que se introducía el láser, los investigadores se afanaban en descubrir cómo utilizar la luz para transmitir señales a larga distancia. Se trataba de perfeccionar una técnica que el hombre había utilizado desde los primeros tiempos de su existencia: primero, con hogueras; después, con faros o lámparas, pero de tal forma que elementos meteorológicos como la lluvia o la niebla no pudieran interrumpir la transmisión. En 1955, el doctor Narinder S. Kapany revolucionó el Imperial College de Londres, donde trabajaba, al fabricar un hilo de cristal capaz de conducir la luz a grandes distancias sin que la comunicación se viera afectada por las condiciones externas. A su descubrimiento lo llamó fibra óptica.

Al igual que en ambos inventos, en la optoelectrónica todos sus componentes viven pendientes de la luz.

La paternidad de esta tecnología, tal y como hoy se conoce, se atribuye a los

LA OPTOELECTRÓNICA
SE SITÚA A MEDIO
CAMINO ENTRE
LA ELECTRÓNICA
BASADA EN EL SILICIO,
QUE TRANSMITE
LA INFORMACIÓN EN
FORMA DE
ELECTRÓNOS
(SEÑAL ELÉCTRICA),
Y LA FOTÓNICA, QUE LO
HACE EN FORMA
DE FOTONES
(PARTÍCULAS DE LUZ)



Celda sensora de fibra óptica dentro de un tubo de laboratorio para medir metano, desarrollado por el Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria

científicos Zhores Alferov y Herbert Kroemer, galardonados hace dos años con el Premio Nobel de Física por sus importantes contribuciones a la moderna tecnología de la información, al crear dispositivos semiconductores de alta velocidad que sirven de base de los diodos electroluminiscentes, dispositivos que, como ya se ha dicho, se encuentran en aparatos tan cotidianos como los lectores de códigos de barras y de CD o las luces de frenos de los automóviles y que, como reflejó en su acta el jurado de este prestigioso premio, podrían sustituir en el futuro a las bombillas eléctricas.

Tal es la importancia que está adquiriendo esta tecnología que hoy en día parece imposible mirar cualquier aparato eléctrico y no ver un panel lleno de luces o dígitos más o menos espectaculares. Los mandos a distancia, los pilotos rojos de los walkman que nos avisan que las pilas se están agotando, los tubos de rayos catódicos con los que funcionan los oscilloscopios analógicos y los televisores, las pantallas de cristal líquido o los modernos sistemas de comunicaciones mediante fibra óptica son algunas de las aplicaciones de los componentes optoelectrónicos que están presentes en sectores clave de la tecnología de la información y la comunicación como la industria automovilística, la

aeronáutica y la astronáutica, y la técnica médica.

A medio camino

La versión actual de la optoelectrónica se sitúa a medio camino entre la electrónica basada en el silicio, que transmite la información en forma de electrones (señal eléctrica), y la fotónica, que lo hace en forma de fotones (partículas de luz). Porque aunque con toda probabilidad llegará un día en que los ordenadores sean totalmente fotónicos, hoy la sustitución de la tecnología electrónica por la fotónica sólo es un sueño y el electrón sigue ganando por goleada al fotón en el campo de la gestión de la información. La razón básica es que el silicio, la superestrella de la tecnología de la información y en el que se basa toda la electrónica, no puede emitir luz. Y ésta es una condición indispensable para obtener circuitos fotónicos.

Hasta entonces y mientras se extienden las redes de comunicación con fibra óptica, que permiten transportar millones de veces más información que los cables convencionales de cobre y a la velocidad de la luz, la optoelectrónica debe conformarse con ser una fase intermedia entre la electrónica y la futura fotónica e intentar combinar ambas formas.

De tal suerte que, por ahora, un mensaje eléctrico, por ejemplo, se convierte primero de formato electrónico a fotónico antes de ser transmitido, y la señal de luz que llega al otro lado se vuelve a convertir en formato electrónico antes de ser procesado por el ordenador del receptor.

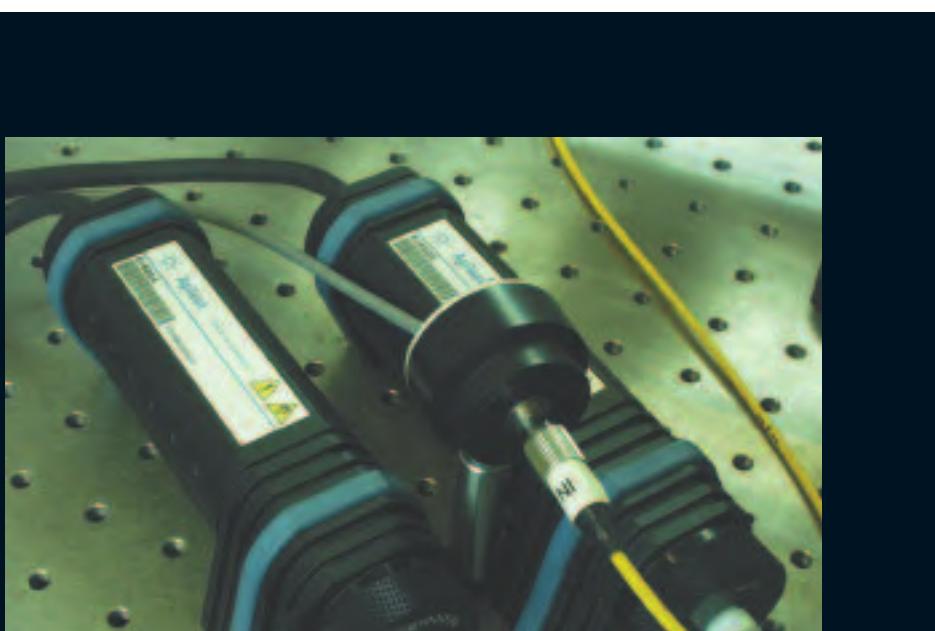
Unión a la fuerza

Pero lo cierto es que el desarrollo de componentes que, combinando diferentes materiales, sean capaces de convertir la señal eléctrica de los sistemas electrónicos en señal óptica y ésta otra vez en eléctrica no está resultando nada fácil. La principal dificultad radica en que ninguno de los materiales probados por los investigadores parece sentirse muy feliz en su particular viaje junto al silicio. En algunas aplicaciones, caso del CD-Rom y DVD, esta especie de unión a la fuerza ya ha sido posible combinando el silicio con arseniuro de galio, pero su fabricación resulta muy costosa y sólo se consiguen precios comerciales realizando una producción masiva en serie. Además, aparte del silicio, materiales como el arseniuro de galio no abundan en la naturaleza, por lo que su aplicación en mercados más reducidos no resulta viable económico.

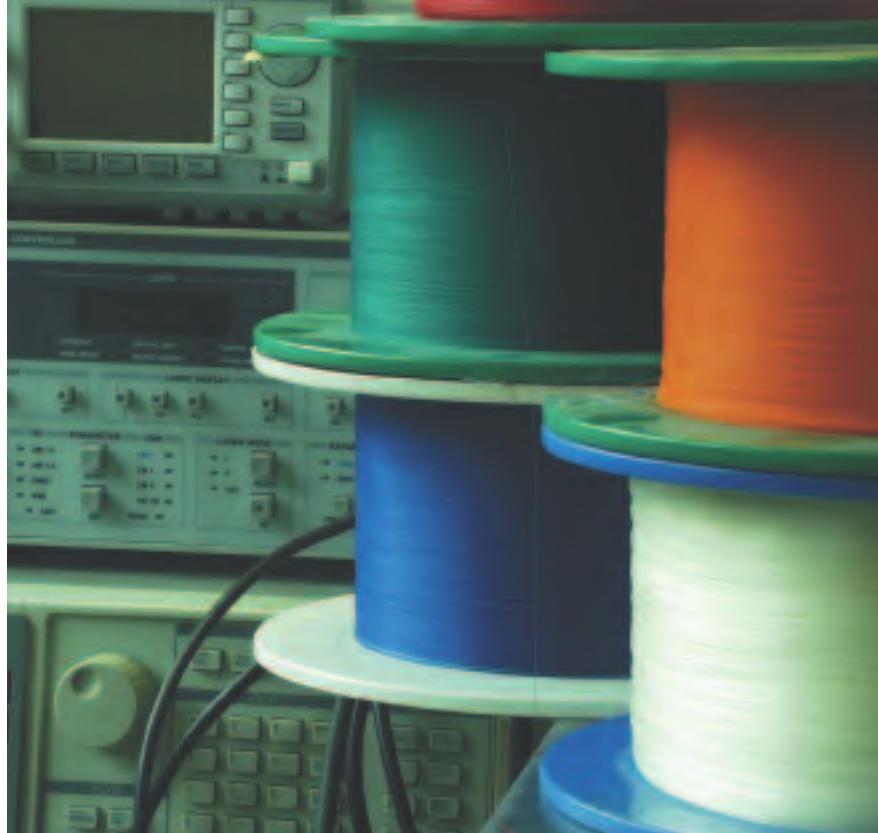
Este es el caso, por ejemplo, de las aplicaciones para el medio ambiente. O los sensores ópticos para controlar temperaturas soportando cientos de grados celsius; o sensores ópticos para medir la salinidad del agua en plantas desalinizadoras (un sensor de otro tipo no sopor taría la corrosión).

Sin duda, las cosas serían mucho más fáciles si el silicio se comportara como el arseniuro de galio, emitiendo luz cuando se le estimula electrónicamente. Pero no lo hace. Los científicos llevan más de una década intentando extraer luz del silicio para que la optoelectrónica pueda basarse en un solo material.

Varias son, en este sentido, las posibilidades que manejan los investigadores. Una idea es drogar al silicio con átomos que son buenos emisores de luz, como los del metal erbio. Esto funciona, pero no tan bien como para hacer aparatos prácticos: el silicio drogado con erbio emite una luz demasiado tenue. Otras opciones pasan por usar compuestos cristalinos del silicio emisores de luz y que se asienten con comodidad sobre aquél, o por tallar el silicio en estructuras tan



Juego de tres cabezas fotodetectoras optoelectrónicas (G.I.F. de la UC)



Fibra óptica e instrumentos optoelectrónicos

pequeñas que su comportamiento se altere por las leyes de la mecánica cuántica y así transformarlo de un mal emisor de luz en uno bueno.

Según explica Pablo Aitor Postigo, investigador del Grupo de Dispositivos del Instituto de Microelectrónica de Madrid (IMM) del Centro Superior de

Investigaciones Científicas (CSIC) "en España se lleva haciendo optoelectrónica desde hace más de 20 años". En la actualidad, tal y como se puso de manifiesto en la segunda reunión española de optoelectrónica (Optoel) celebrada el pasado año en Barcelona, en nuestro país existen cerca de una treintena de grupos perte-

LOS DISPOSITIVOS LÁSER DE SEMICONDUCTOR HAN REVOLUCIONADO LA INDUSTRIA DE LAS TELECOMUNICACIONES Y DE LA MICROELECTRÓNICA

necientes a distintos centros de investigación y universidades españolas que trabajan en el campo de la optoelectrónica, en áreas como los dispositivos sensores optoquímicos y fotónicos, el desarrollo de sistemas de commutación óptica, fibras ópticas de plástico, la aplicación de diodos láser a sensores o visualizadores de cristal líquido y dispositivos fotónicos para comunicaciones y aplicaciones industriales.

Postigo asegura que su grupo del IMM es el único del país que fabrica dispositivos optoelectrónicos láser basados en compuestos semiconductores III-V (como el arseniuro de galio, GaAs, o el fosfuro de indio, InP), los cuales, a diferencia del silicio, pueden emitir luz en

LOS CRISTALES FOTÓNICOS

Hace unos diez años los científicos Eli Yablonovitch y Sajeev John propusieron de forma casi simultánea aunque con distintos objetivos la idea de fabricar materiales ópticos que fuesen para los fotones lo que el silicio es para los electrones. Estos materiales son ahora denominados "cristales fotónicos" por semejanza a sus primos los típicos cristales electrónicos de toda la vida. Los cristales fotónicos, al igual que el silicio, están constituidos por unidades que se repiten en las tres dimensiones del espacio de forma periódica (por eso se denominan cristales). Como consecuencia directa de este hecho, estos materiales presentan rangos energéticos (bandas de frecuencia) prohibidos para la propagación de la luz (por esto se denominan fotónicos). Esto mismo ocurre en el silicio para la propagación (conducción) de electrones. En dos palabras, un material completamente opaco hecho de una sustancia transparente y que para Yablonovitch, uno de los inventores del concepto de brecha fotónica y director desde 1992 del grupo de optoelectrónica de la Universidad de California, "ven limitadas sus posibilidades únicamente por la imaginación humana".

Trabajos teóricos posteriores, basados en estos materiales, apuntaron la posibilidad de desarrollo del transistor fotónico. La enorme ventaja de este dispositivo frente a los clásicos transistores electrónicos no es sólo su abrumadora velocidad de

comutación, y por tanto la velocidad en el procesado de la información, sino su baja disipación de energía, verdadero cuello de botella de la integración a gran escala en la microelectrónica actual.

Se podría soñar entonces en un nuevo País de las Maravillas en el que tanto la transmisión como el procesado de la información fuesen realizados por la luz. Imaginense, por ejemplo, un ordenador sin cables eléctricos, que no se calentase y por tanto no necesitase ventiladores con una pantalla compuesta por millones de microláseres de cristal fotónico. El procesado de la información se realizaría mediante circuitos impresos y micro-procesadores totalmente ópticos. Este sería el nuevo ordenador fotónico; rapidísimo, silencioso, frío y plenamente integrado en la red de comunicaciones ópticas. Hubo un tiempo, sin embargo (entre 1990 y 1995), en el que, debido a la dificultad tecnológica, se puso en tela de juicio la capacidad de fabricación de dichos materiales, con ciertas especificaciones mínimas. Y, ciertamente, como explican los investigadores españoles Ceferino López y Francisco Mesa-guer, "muy pocos dábamos un duro por esos materiales. Teoría había mucha y muy buena, pero no se conseguía un material que, de forma semejante al silicio, tuviese una franja de frecuencias prohibidas (gap, en inglés) en la zona de la luz visible

amplios rangos del espectro. Para Postigo, "los dispositivos láser de semiconductor han revolucionado la industria de las telecomunicaciones y de la microelectrónica, hasta el punto de que, en la actualidad, este tipo de láseres (también denominados diodos láser) se utiliza desde en lectores de disco compacto hasta en instrumentos de cirugía oftalmológica, pasando por todo el rango de comunicaciones ópticas que hacen posible que podamos visualizar una página de Internet de cualquier sitio del mundo, mediante el uso de fibra óptica que transporta pulsos de luz generados por un diodo láser".

Los diodos láser

Un diodo láser consiste en la unión de dos materiales con dos tipos de conducción diferentes (uno que conduce mediante electrones, denominado material "tipo-n", y otro que lo hace mediante huecos, denominado "tipo-p") mediante una zona de baja conducción, denominada "región activa", en la cual se produce la recombinación de electrones y huecos para generar fotones. Por lo tanto, es evidente que para que el dispositivo funcione se

precisa de una fuente de alimentación que genere corriente eléctrica (como la pila de un puntero láser). En el proceso, los electrones generados por la pila se reconvertirán en el interior del diodo láser en fotones con una energía similar a la diferencia de potencial introducida por la pila multiplicada por la carga del electrón (si bien la energía exacta del fotón emitido depende del material del que esté constituido el diodo láser).

Postigo señala "que para fabricar un diodo láser que, entre otras ventajas, presenta la de su reducido tamaño –lo que permite tanto su fabricación en grandes cantidades como su agrupamiento en pequeños espacios–, son necesarias dos etapas fundamentales: la primera es la síntesis de material semiconductor y la segunda el procesado del material sintetizado".

Técnicas de fabricación

La síntesis del material semiconductor se logra mediante las denominadas técnicas de crecimiento epitaxial. Entre éstas, las más extendidas son la epitaxia por haces moleculares (MBE) y la epitaxia por fuentes metalorgánicas (MOCVD). Ambas técnicas permiten

obtener compuestos semiconductores III-V (como GaAs o InP) partiendo de los elementos de los grupos III y V de la tabla periódica (como galio (Ga), indio (In) o aluminio (Al), pertenecientes al grupo III, y arsénico (As), fósforo (P) o antimonio (Sb), pertenecientes al grupo V. También es posible sintetizar las aleaciones ternarias (como InGaAs, AlGaAs, InGaP) o cuaternarias (InGaAsP) de estos elementos. Este investigador asegura, en este sentido, "que el Grupo de Dispositivos del IMM ha sido pionero en el uso de la técnica de epitaxia por haces moleculares para sintetizar los compuestos semiconductores necesarios en la fabricación de diodos láser, habiendo alcanzado en la actualidad un profundo conocimiento del tema. Esto nos ha llevado a ser uno de los primeros grupos en fabricar diodos láser basados en InP mediante epitaxia de haces moleculares de fuentes sólidas, uno de los dispositivos optoelectrónicos emisores más utilizados actualmente en las comunicaciones ópticas".

Por su parte, en la segunda etapa para fabricar los diodos láser –el procesado tecnológico del material sintetizado–, se

o infrarroja. Y es que, en verdad, las dificultades tecnológicas eran formidables. Éste debía ser un material de alto índice de refracción (bien por encima de 2) y que estuviese lleno de agujeros microscópicos dispuestos periódicamente en las tres direcciones del espacio. Además, el volumen ocupado por los agujeros debía ser muy grande (superior al 75 %) Es decir una especie de esponja con todos los agujeros iguales, bien ordenados y del tamaño de la micra (una milésima de mm)".

Los primeros prototipos se realizaron en EEUU y Japón mediante técnicas complicadas de litografía que se usan corrientemente en microelectrónica. Dichas técnicas tienen enormes limitaciones en su uso para la fabricación de estos nuevos materiales. Nada más se pueden fabricar cristales fotónicos con un número muy limitado de capas y aún así la fabricación es tan laboriosa que no parece que pueda pasar del puro "interés académico" (que no es poco).

La aproximación emprendida por el grupo de López y Mesaguer era mucho más "natural" y no por ello menos atractiva: la naturaleza ofrece materiales como los ópalos que poseen propiedades de cristal fotónico. Y la razón estriba en que están formados por partículas micrométricas de vidrio bien ordenadas. "Se trataba, pues, en su opinión, "de imitar a la naturaleza y, si fuera posible, adaptar los ópalos a las necesidades científicas.

Recientemente el grupo de estos dos científicos españoles de la Unidad Asociada CSIC-Universidad Politécnica de Valencia y del Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, en colaboración con los profesores S. John, pionero en teoría de cristales fotónicos, y G. Ozin, uno de los mayores expertos en síntesis de materiales semiconductores, han conseguido obtener el primer material con este ansiado gap completo. "Es más –explican– hemos podido situarlo en la franja de frecuencias de más interés de las comunicaciones ópticas: 1.5 micras". Este material está compuesto íntegramente por silicio, el material por excelencia en electrónica.

El silicio se encuentra lleno de burbujas esféricas, de alrededor de 1 micra. Para López y Mesaguer la fabricación de este material "abre la puerta al desarrollo de nuevos dispositivos totalmente fotónicos como microláseres, transistores ópticos, etc. y a su integración con otros dispositivos y materiales como fibra óptica, y multiplexores. Creemos que este trabajo constituye una primera piedra en un nuevo cuerpo de conocimiento y tecnología que bien podría llamarse "fotrónica" donde se integrarán la electrónica y la fotónica. Sin embargo, aclaran, "aún será necesario recorrer un largo trecho hasta que dichos materiales pueblen el mercado tecnológico. Falta, principalmente, la realización del transistor fotónico".

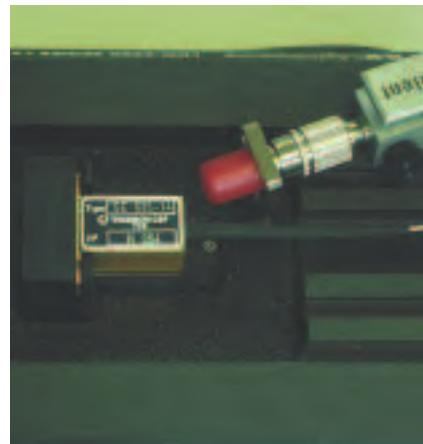
definen las formas físicas del dispositivo y las capas metálicas para el contacto eléctrico. Para ello, este investigador del IMM precisa "que son necesarias técnicas de microelectrónica como la litografía ultravioleta o el ataque mediante haces de iones reactivos, que permiten fabricar dispositivos láser de aproximadamente medio milímetro de longitud y altura (500 micras) y unas 50 micras de anchura, listos para ser encapsulados y distribuidos en el mercado". En el Instituto de Microelectrónica de Madrid se han fabricado una gran variedad de diodos láser basados en compuestos como AlGaAs, InP o InGaP, que emiten luz en la región del infrarrojo cercano, con longitudes de onda entre 1 y 1.5 micras, utilizados para las comunicaciones ópticas o para la detección en sensores ópticos, como la medida no invasiva del nivel de oxígeno contenido en sangre.

Puntos cuánticos

Hasta hace poco tiempo la mayoría de los diodos láser estaban basados en el uso de regiones activas denominadas de tipo "pozo cuántico". En estas regiones activas se hacía uso de su baja dimensionalidad en la dirección perpendicular a la emisión de luz para conseguir una eficiencia más elevada (es decir, conseguir el mayor número de electrones reconvertidos a fotones). Sin embargo, los

científicos han conseguido en los últimos años disminuir la dimensionalidad de las regiones activas no sólo en la dirección perpendicular a la emisión de luz, sino también en las otras dos direcciones del espacio, mediante las denominadas regiones activas de "puntos cuánticos", formadas por la distribución extendida de pequeñas nanopartículas de material semiconductor. Según explica Postigo, "estas regiones activas permiten incrementar la eficiencia de los dispositivos, por lo que existe un elevado interés en su estudio previo a su posible fabricación industrial".

En este campo, uno de los objetivos más interesantes actualmente consiste en



Diodo láser semiconductor sobre soporte de control (G.I.F. de la UC)

LOS INTERESES DE LA OPTOELECTRÓNICA ACTUAL SE CENTRAN EN DOS IMPORTANTES ASPECTOS: CONSEGUIR DISPOSITIVOS LÁSER MÁS VELOCES Y CONTROLAR LA LUZ DE LA FORMA ADECUADA

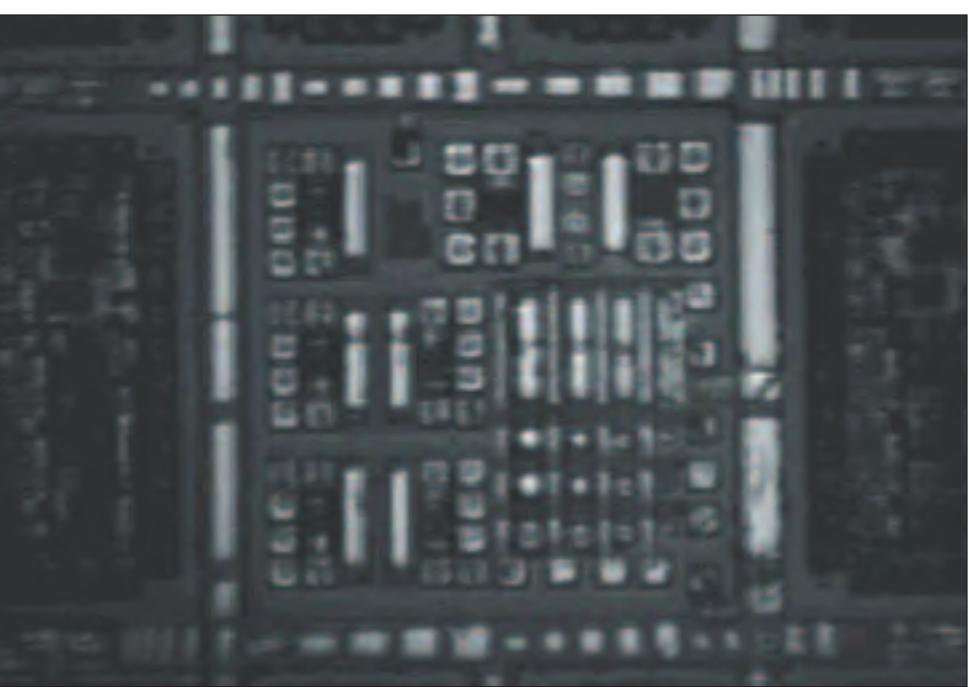
disponer de "chips ópticos" formados por el agrupamiento denso de diodos láser junto a receptores de luz (fotodetectores) y circuitos electrónicos para el procesado de la señal que permitan la emisión y detección de luz para comu-

nicaciones ópticas o para computación óptica. La fabricación de estos dispositivos optoelectrónicos integrados ha sido ya abordada desde diversas perspectivas, ya que mientras los dispositivos láser son elaborados mediante compuestos III-V, los circuitos electrónicos son fabricados principalmente sobre silicio, y la integración de ambos materiales ya se ha dicho que es complicada. Una de las mejores aproximaciones realizadas hasta el momento pasa por fabricar circuitos microelectrónicos sobre compuestos III-V, capaces a su vez de albergar diodos láser. Éste es un importante campo de desarrollo industrial, más que de investigación básica, en el que están trabajando importantes compañías del sector de las telecomunicaciones radicadas en el extranjero.

Una cuestión de velocidad

Para Postigo "los intereses de la optoelectrónica actual están centrados en dos importantes aspectos: de un lado, conseguir dispositivos láser más veloces y, de otro, conseguir controlar la luz de la forma adecuada.

Conseguir dispositivos láser más veloces significa que el dispositivo láser sea capaz de modularse (es decir, de emitir pulsos de luz) en frecuencias más altas



Micrografía de un chip de GaAs con 52 emisores láser fabricados en InGaP/GaAs/InGaAs integrados junto a fotodetectores y electrónica de procesado (P. A. Postigo et al. Applied Physics Letters. 77 2000)

INTERNET

(emitter un mayor número de pulsos de luz por segundo). Cuanto más elevada sea la frecuencia mayor será la velocidad de transmisión de información (si pensamos que un bit es un pulso de luz) y el número de canales de información disponibles (ancho de banda). En la actualidad existen diodos láser de emisión vertical que emiten con frecuencias cercanas a 10 GHz (unos 2 Gb/s), pero aún no se han alcanzado los límites teóricos y queda por delante una intensiva investigación en la llamada optoelectrónica de alta velocidad.

Controlar la luz

Por otro lado, existe un gran interés en controlar a voluntad la luz mediante dispositivos adecuados que permitan la fabricación de circuitos ópticos integrados, esto es, circuitos que funcionen con luz en lugar de electrones, que ofrecerían importantes ventajas como las de una mayor velocidad de cálculo y una baja disipación térmica. Este control de la luz puede lograrse de manera efectiva mediante los denominados dispositivos con banda prohibida para fotones. En este tipo de dispositivos se utilizan nanoestructuras ordenadas de al menos dos materiales con diferentes índices de refracción para conseguir controlar la propagación de fotones con energías específicas, impidiendo su paso o permitiéndolo. Aunque las predicciones teóricas para este tipo de dispositivos se conocían desde hace varios años, ha sido sólo recientemente cuando las técnicas de nanofabricación han avanzado lo suficiente como para fabricar los primeros ejemplos. Existen novedosos trabajos que ilustran cómo la luz proveniente de un láser puede girar bruscamente en un espacio de pocas micras dentro de uno de estos materiales nanoestructurados. Además, se esperan importantes avances en la selección, captura y liberación controlada de fotones que permitirían fabricar dispositivos fotónicos para comunicaciones por multiplexado de división de longitud de onda (WDM) o posibles transistores ópticos.

En el IMM se están actualmente desarrollando los primeros prototipos de dispositivos con ancho de banda prohibida para fotones basados en semiconductores III-V, que Postigo aventura "contribuirán a abrir nuevos caminos en el prometedor campo de la optoelectrónica y fotónica integrada".

Centro Nacional de Microelectrónica <http://www.cnm.es>

Desde esta página web se puede acceder a los Institutos de Microelectrónica de Barcelona, Madrid y Sevilla y conocer la actividad que se desarrolla en cada uno de ellos, centrada fundamentalmente en la investigación científica y el desarrollo tecnológico en el campo de la microelectrónica.

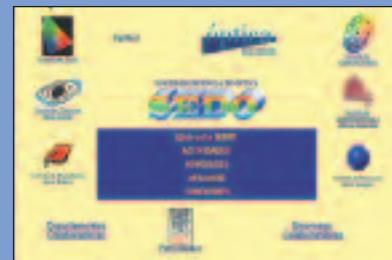


Consejo Superior de Investigaciones Científicas <http://www.csic.es>

El sitio web del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) ofrece una completa información sobre la actividad científica desarrollada en la principal institución de investigación de nuestro país, incluyendo una extensa relación de los centros de investigación españoles (clasificados por áreas científicas, por orden alfabético del nombre y las siglas, y por autonomías), entre los que se pueden visitar los Institutos de Ciencias de los Materiales de Aragón, Barcelona, Madrid y Sevilla.

Sociedad Española de Óptica <http://sedo.optica.csic.es>

La Sociedad Española de Óptica brinda, a través de su Comité de Optoelectrónica y Óptica Integrada, información detallada sobre los grupos de investigación, los congresos y reuniones que se van a celebrar en los próximos meses, así como enlaces con las empresas, recursos y sociedades relacionadas con la optoelectrónica. Incluye asimismo información sobre las actividades docentes de la Escuela de Verano para este año.



Otros sitios de interés http://www.mcyt.es/grupo_enlaces/htm

El Ministerio de Ciencia y Tecnología presenta enlaces con las principales instituciones españolas, europeas e internacionales; las administraciones de ciencia y tecnología en el mundo; las fuentes de información tecnológica y los centros de investigación nacionales, entre los que se encuentran todas las universidades españolas.

<http://www.io.cfmac.csic.es>

El Instituto de Óptica Daza Valdés del CSIC ofrece información sobre los programas y proyectos de investigación en los que participa, financiados tanto por fondos nacionales como por la UE o por programas de cooperación internacional.

<http://www.cordis.lu/es/home/html>

Sede web del Servicio de Información Comunitario sobre Investigación y Desarrollo, Cordis.

<http://www.rediris.es>

RedIRIS es la red académica y de investigación nacional, patrocinada por el Plan Nacional de I+D+I y gestionada por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

<http://www.aniel.es>

Sitio web de la Asociación Española de Industrias Electrónicas y de Telecomunicaciones (Aniel).