

Recibido: 05.07.2020 | Aceptado: 28.10.2020

Palabras clave: Fotónica, física cuántica, óptica, optoelectrónica, telecomunicaciones.

Fotónica y optoelectrónica: pasado clásico y futuro cuántico

EDGAR ARMANDO CERDA MÉNDEZ

edgar.cerda@uaslp.mx

OSVALDO DEL POZO ZAMUDIO

osvaldo.delpozo@uaslp.mx

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN COMUNICACIÓN
ÓPTICA, UASLP

La luz es parte integral de nuestra experiencia cotidiana y la óptica es la ciencia que la estudia, así como a los instrumentos para manipularla (lentes y espejos, por ejemplo), y es, tal vez, junto con la mecánica y las matemáticas, la disciplina científica más antigua. Por ejemplo, el uso de la luz como tecnología data probablemente del descubrimiento del fuego, mientras que la fabricación y uso de instrumentos ópticos puede ser rastreado hasta el año 2000 a. C. en Grecia, Mesopotamia y Egipto.

El primer tratado con un formalismo matemático documentado es *Óptica* de Euclides alrededor del año 300 a. C. Se considera, sin embargo, que la óptica moderna nació en 1637 con la publicación del ensayo *Dioptrica* acerca de la refracción por René Descartes. Siguieron los estudios de Newton que, en 1675 e inspirado en el trabajo de Pierre Gassendi, astrónomo y matemático francés (1592-1655), postuló que la luz estaba compuesta de partículas de materia de tamaño microscópico. Su teoría tuvo cierto impacto, pero el entendimiento de la luz como una onda fue impulsado por Robert Hooke, Christiaan Huygens, Thomas Young, Augustin-Jean Fresnel y otros a finales del siglo XII, XIII e inicios del XIX, respectivamente. El descubrimiento en 1845 por Michael Faraday de que un campo magnético puede cambiar la polarización de un rayo de luz inspiró a James Clerk Maxwell a formular su teoría de la luz como una forma de radiación electromagnética. La publicación de su *Tratado de electricidad y magnetismo* en 1873, que contiene las famosas ecuaciones que llevan su nombre y la fantástica comprobación experimental de su teoría por el físico alemán Heinrich Hertz con ondas de radio, cierran uno de los capítulos de la física clásica más brillantes. Estos trabajos sentaron las bases de las tecnologías modernas de radio, radar, televisión y comunicaciones inalámbricas.

El entendimiento de la luz se consideraba completo en aquella época, pero esto no duró mucho tiempo. En 1900, Max Planck, en un intento por explicar de forma completa la relación entre el color (espectro) de la luz emitida por un cuerpo y su temperatura (el famoso problema de cuerpo negro), introdujo el

concepto de cuantización de la energía. Esto es, que la luz no es una cantidad continua, si no que existe en paquetes indivisibles llamados cuantos, que contienen el mínimo de energía posible $h\nu$, donde h es la famosa constante de Planck ($\sim 6.626 \times 10^{-34}$ Joules segundo) y ν es la frecuencia de la luz (en unidades de segundo inverso). En 1905, Albert Einstein usó esta idea para explicar experimentos de efecto fotoeléctrico. En este se observaba que, al contrario de lo que predecía la física clásica, no era posible arrancar electrones de placas metálicas iluminándola con luz de cualquier color que uno escogiera, por muy potente que fuera la fuente usada. El desarrollo de la mecánica cuántica durante el siglo XX nos lleva hasta nuestros días, cuando entendemos la luz como compuesta por una multitud de paquetes irreductibles de energía (cuantos) llamados fotones, que presentan propiedades de partícula y onda simultáneamente (Zeilinger, 2010). Cabe mencionar que, aunque Newton postuló que la luz estaba formada por partículas, su teoría era puramente clásica y no contemplaba la naturaleza dual del fotón, como la mecánica cuántica moderna.

Fotónica y optoelectrónica

La electrónica moderna está basada en los elementos y compuestos conocidos como semiconductores, descubiertos en 1821 por Thomas Johann Seebeck, un médico y físico de Estonia. Los semiconductores, entre ellos el silicio, pueden modificarse químicamente para que se comporten como aislantes o conductores eléctricos, característica que los hace ideales para la implementación de dispositivos. Conceptos como el diodo, triodo y transistor nacieron a principios del siglo pasado, pero fue hasta la década de 1950, con el desarrollo de la

industria de materiales semiconductores, que tuvieron un impacto importante y se vio reflejado en el otorgamiento del Premio Nobel de Física a John Bardeen, Walter Brattain y William Shockley en 1956 por los avances que hicieron sobre semiconductores y la invención del transistor semiconductor. Entre los semiconductores, están aquellos capaces de emitir luz (no es el caso del silicio), con los que pueden fabricarse dispositivos como los láseres o los diodos emisores de luz. Ejemplos son los apuntadores láser que comúnmente se usan durante presentaciones visuales, que contienen un pequeño láser semiconductor.

Con la invención del diodo láser y las fibras ópticas en las décadas de 1960 y 1970, nació una nueva rama de la óptica: la fotónica, la cual plantea el uso y estudio de la luz para realizar funciones normalmente llevadas a cabo por medios electrónicos, como procesado y transmisión de información. La fotónica cambió completamente el paradigma de telecomunicaciones y sentó la base tecnológica del internet moderno. En la UASLP, el Instituto de Investigación en Comunicación Óptica (IICO) ofrece un excelente programa de fotónica en el Posgrado en Ciencias Aplicadas, clasificado por el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Conacyt como del más alto nivel en el ámbito internacional.

La optoelectrónica es una subrama de la fotónica que se dedica al estudio y aplicación de dispositivos electrónicos para la generación y manipulación de la luz (figura 1). Ejemplos son los fotodiodos, fototransistores, cámaras CCD (como las de las cámaras fotográficas modernas), diodos láser, diodos emisores de luz inorgánicos (LED)

y orgánicos (OLED) (como los de las pantallas planas), etcétera. Aunque las industrias de la fotónica y la optoelectrónica generan cientos de miles de millones de dólares por año en el mundo (Sociedad Internacional de Óptica y Fotónica, 2021), en México son casi inexistentes y sólo hay un puñado de empresas de este giro en el país. Sobre decir que se tiene un enorme potencial humano, el cual no ha podido cristalizarse en una industria nacional de fotónica significativa por diferentes causas. Esto, al mismo tiempo, representa una enorme área de oportunidad para las nuevas generaciones de físicos, ingenieros e ingenieros físicos.

En el IICO-UASLP hacemos investigación de frontera en fotónica y optoelectrónica en las áreas de crecimiento y caracterización de cristales semiconductores, fabricación de dispositivos optoelectrónicos como láseres, memorias, celdas fotovoltaicas, y también en fibras ópticas. En particular, las áreas que discutiremos en este artículo son el estudio y manipulación de los llamados fluidos cuánticos de luz, optoelectrónica con materiales bidimensionales y el desarrollo de fuentes de luz cuántica (fuentes de fotones individuales). Todos estos estudios tendrían un potencial impacto en el desarrollo de, por ejemplo, computadoras y simuladores cuánticos ópticos y de estado sólido.

El paradigma del cómputo y procesamiento de información cuánticos está en vías de convertirse, sin miedo a exagerar, en la siguiente revolución tecnológica (Arute *et al.*, 2019), y la fotónica y optoelectrónica jugarán un papel central en su desarrollo. Este paradigma, visualizado por primera vez en la década de 1980 por Paul Benioff (1980), Richard Feynmann (1982) y Yuri Manin (1980), ofrece capacidades de cómputo en

paralelo y encriptación de información sin contrapartes clásicas. Por ejemplo, un mensaje encriptado cuánticamente es imposible de interceptar sin alertar a las partes emisora y receptora.

Estos son solo algunos ejemplos y dejan claro que la fotónica y la optoelectrónica son campos de investigación de muy alto impacto social, económico y científico, así como altamente competitivos y en constante desarrollo. Debemos decir que también son multidisciplinarios, ya que conjuntan muy variadas disciplinas como ingeniería, diseño industrial, óptica, óptica no lineal y cuántica, física cuántica, física de semiconductores y ciencia de materiales.

Fluidos cuánticos de luz

Los llamados fluidos cuánticos o superfluidos difieren mucho de los fluidos comunes: poseen nula viscosidad, por lo que se propagan sin fricción, escalan las paredes de un contenedor o se filtran por poros por los que un líquido común y corriente como el agua no podría. El primer superfluido descubierto

fue el helio enfriado a una temperatura cercana al cero absoluto (-271 °C) en 1937, simultáneamente por los físicos Piotr Kapitza y John Frank Allen. Las propiedades de dichos fluidos solo pueden ser explicadas o predichas por medio de la mecánica cuántica; de ahí que se les llame cuánticos.

La idea de que la luz pueda comportarse como un fluido fue planteada por primera vez en 1991, cuando se describió el comportamiento de los fotones dentro de un láser por medio de ecuaciones hidrodinámicas (Brambilla, Lugiato, Penna, Prati, Tamm y Weiss, 1991). Este fenómeno no es parte de nuestra experiencia cotidiana: si uno cruza los haces de luz de dos (o más) lámparas o láseres, los haces no se ven afectados (como lo harían, por ejemplo, dos corrientes de agua que se cruzan), si no que siguen su trayectoria rectilínea, ya que los fotones no interactúan entre sí. Para que existan interacciones y los fotones puedan comportarse como un fluido deben “vestirse” de alguna forma con materia. Esto ocurre, por ejemplo, en cristales llamados no-lineales, donde las complejas interacciones de la luz con los electrones del cristal visten a los fotones.



Figura 1
La optoelectrónica es una rama de la fotónica, la cual a su vez es una rama de la óptica.

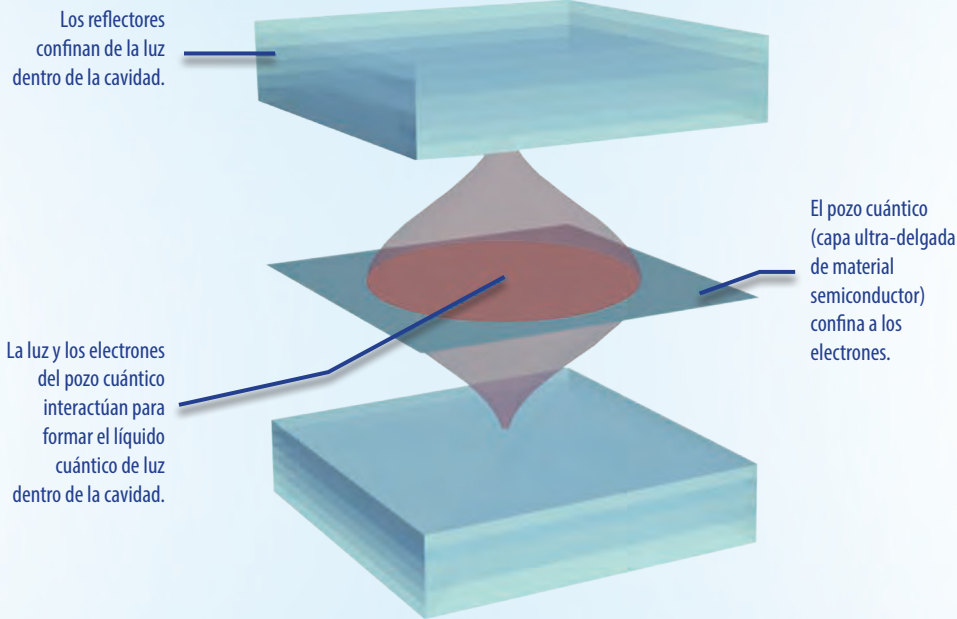


Figura 2. Dispositivo semiconductor en donde se atrapan fotones y se "visten" por electrones

Los fluidos de luz pueden ser creados y manipulados también en dispositivos semiconductores (Cerdeña-Mendez, Krizhanovskii, Skolnick y Santos, 2018). En el IICO-UASLP contamos con una línea de investigación dedicada al diseño, fabricación, caracterización y estudio de estos dispositivos, llamados de microcavidad. En la figura 2 se ilustra de manera esquemática uno de éstos, los cuales consisten en dos reflectores encontrados uno frente al otro y separados por una distancia muy pequeña (algunos cientos de nanómetros). En esta cavidad óptica se pueden atrapar fotones por una cantidad pequeña pero suficiente de tiempo (algunos picosegundos, que son la billonésima parte de un segundo), para que los fotones interactúen y sean "vestidos" por electrones atrapados en una capa ultradelgada (de 1 a 10 nanómetros) de material semiconductor dentro de la cavidad. Bajo condiciones adecuadas, el sistema luz-electrones forma un líquido cuántico con muy interesantes propiedades fundamentales.

El líquido cuántico podría ser usado, por ejemplo, para simular sistemas cuánticos complejos de electrones en cristales. Para esto, el líquido se somete a la influencia de algún grabado microscópico periódico (por ejemplo, en forma de cartón de huevos), así como a campos eléctricos o magnéticos. De especial interés es el estudio de las llamadas propiedades topológicas que abren el camino para la fabricación de dispositivos donde las partículas pueden ser transportadas con sus propiedades cuánticas intactas muy eficientemente, lo que es fundamental para el desarrollo de dispositivos cuánticos. La combinación de la fotónica con la teoría de cristales topológicos se denomina fotónica topológica (Lu, Joannopoulos y

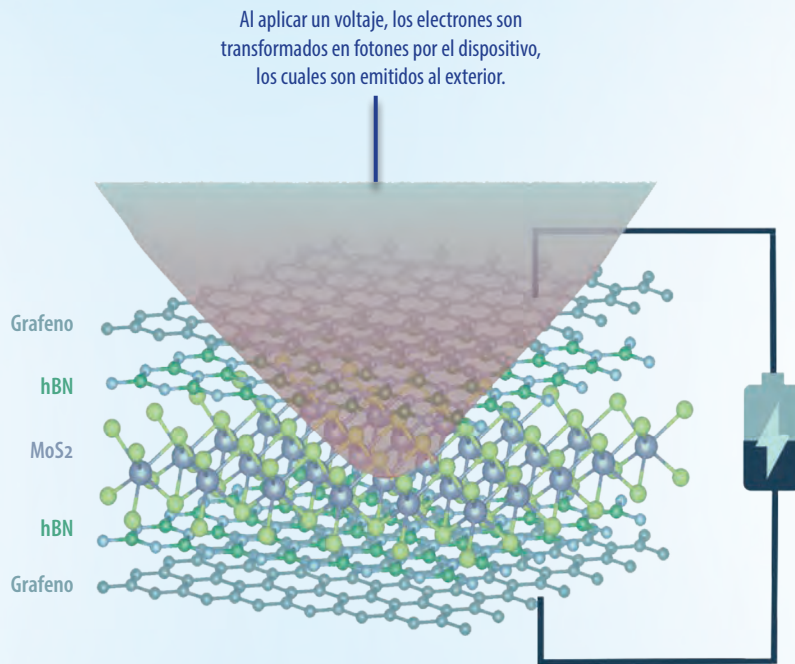


Figura 3. Heteroestructuras de capas ultradelgadas

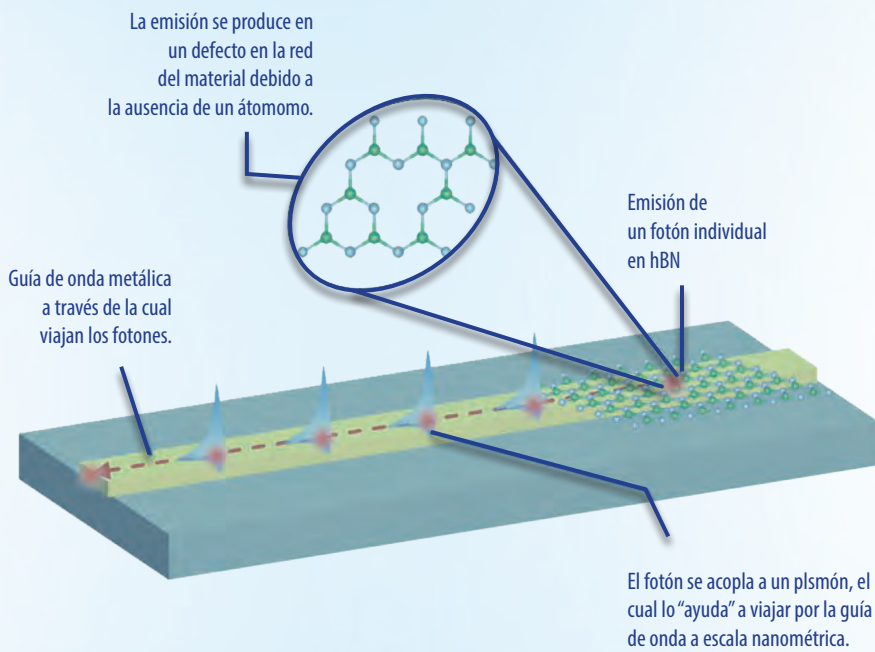


Figura 4. Guía de onda plasmónica

Soljačić, 2014), la cual estudiamos en el IICO-UASLP junto con otras universidades del país y del extranjero.

Optoelectrónica con materiales bidimensionales

En 2010 se otorgó el Premio Nobel de Física al profesor Andre Geim y a su entonces estudiante Konstantin Novoselov, por el aislamiento y estudio del material más delgado de la naturaleza: el grafeno, que es un arreglo hexagonal de átomos de carbono de un solo átomo de espesor. A pesar de sus excepcionales propiedades electrónicas en estado aislado, su uso en optoelectrónica es limitado, ya que dichas propiedades se ven afectadas al contacto con superficies, además de que no emiten luz de manera natural. Sin embargo, este descubrimiento motivó el de muchos otros materiales, en particular aquellos compuestos semiconductores (o sea, emisores de luz) ultradelgados con estructuras atómicas similares al grafeno. Esto ha abierto nuevos y excitantes horizontes para el desarrollo de novedosos dispositivos optoelectrónicos basados en ellos que incluyen detectores y emisores de luz y celdas solares, entre otros. La extrema delgadez de tales materiales permite fabricar dispositivos como pantallas desplegables y flexibles, así como celdas solares transparentes. La especial estructura cristalina de estos materiales da a los electrones las propiedades topológicas antes mencionadas, lo que abre nuevos horizontes para la optoelectrónica basada en efectos topológicos.

Con la utilización de técnicas especiales pero simples, es posible manipular estas ultradelgadas capas de material para fabricar dispositivos. Por ejemplo, apilar capas de diferentes materiales para formar un nuevo material: el mero hecho de que una capa esté encima de

otra puede cambiar el comportamiento de los electrones en ellas. De esta forma es posible, por ejemplo, fabricar diodos emisores de luz ultradelgados (Withers, *et al.* 2015). En el IICO-UASLP, investigamos y fabricamos dispositivos basados en estos materiales tanto en su forma de monocapas como en dichos dispositivos, llamados heteroestructuras de van der Waals. En la figura 3 se muestra una representación de una heteroestructura de varias capas ultradelgadas usada como dispositivo emisor de luz.

Fuentes emisoras de fotones individuales

Los fotones, por su naturaleza, tienden a existir y a ser emitidos en montones, es decir, muchos a la vez. Las fuentes emisoras de luz que los emiten, llamadas clásicas, como las lámparas o láseres son comunes y bien conocidas. Fuentes que emitan un solo fotón a la vez (o sea, de la más baja intensidad posible), por el contrario, no existen en la naturaleza. Estas pueden ser fabricadas con muy diversos sistemas como diamante, átomos, moléculas, nanotubos de carbono, nanoestructuras semiconductoras y, recientemente, en materiales bidimensionales (Toth y Aharonovich, 2019). Sin embargo, es difícil fabricar un dispositivo que emita un fotón individual de forma predeterminada y que además funcione a temperatura ambiente, lo que es necesario para su uso práctico. Además, para formar circuitos fotónicos (en lugar de eléctricos), se requiere que el emisor pueda integrarse en chips semiconductores junto con otros componentes para su manipulación, guiado y detección.

Para guiar a los fotones se usan las llamadas guías de onda. Un ejemplo común de éstas son las fibras ópticas, en donde la luz viaja dentro de la fibra porque se

refleja en el interior de la misma sin poder escapar de ella. Otro caso es el de las llamadas guías de onda plasmónicas (ver figura 4), las cuales emplean la interacción de los fotones con oscilaciones de electrones en la superficie de un metal. Esta interacción permite guiar la luz a escalas órdenes de magnitud menores a las de las fibras ópticas, lo que las haría en principio ideales para circuitos ópticos (Fang y Sun, 2015).

En el IICO-UASLP, en conjunto con otras universidades del país, investigamos la generación y manipulación de fotones individuales en micro y nanopartículas de un material semiconductor cristalino llamado nitruro de boro y su manipulación con guías de onda plasmónicas. El nitruro de boro en sí no genera fotones individuales: las fuentes son defectos (vacancias) nanoscópicos dentro de la red cristalina del material. Estos defectos, aunque existen aleatoriamente dentro del material y es necesario un amplio estudio de caracterización para encontrarlos, son altamente prometedores, ya que son muy estables y pueden emitir fotones individuales a temperatura ambiente. En combinación con técnicas de guiado de luz en la nanoescala, son candidatos prometedores para dispositivos optoelectrónicos cuánticos novedosos.

Conclusiones

La fotónica y la optoelectrónica son campos de investigación de alto impacto que mejoran nuestra vida cotidiana. La existencia de, por ejemplo, el internet moderno, sería impensable sin estas tecnologías. En el IICO-UASLP realizamos investigación de frontera en esta creciente área que integra muchas disciplinas desde ingeniería, electrónica y ciencia de materiales hasta física de semiconductores y física cuántica. **UP**



**EDGAR
ARMANDO
CERDA
MÉNDEZ**

Doctor en Ciencias Aplicadas por la Facultad de Ciencias de la UASLP. Es profesor investigador en el Instituto de Investigación en Comunicación Óptica de la UASLP, en donde desarrolla el proyecto "Estudio de líquidos cuánticos de polaritones excitónicos en microcavidades ópticas y fenómenos de interacción luz-materia en materiales bidimensionales en microcavidades ópticas".



Referencias bibliográficas:

- Arute F. *et al.* (2019). Quantum supremacy using a programmable superconducting processor, *Nature*, 574(7779), pp. 505-510. doi: 10.1038/s41586-019-1666-5.
- Cerda-Méndez, E. A., Krizhanovskii, D. N., Skolnick, M. S. y Santos, P. V. (2018) Quantum fluids of light in acoustic lattices, *Journal of Physics*. 51(3), p. 033001, doi: 10.1088/1361-6463/aa9ec7.
- Lu, L., Joannopoulos, J. D. y Soljačić, M. (2014) "Topological photonics," *Nature Photonics*, 8(11), pp. 821-829. doi: 10.1038/nphoton.2014.248.
- Withers, F. *et al.* (2015). Light-emitting diodes by band-structure engineering in van der Waals heterostructures, *Nature Material*, 14(3), pp. 301-306. doi: 10.1038/nmat4205.
- Zeilinger, A. (2010) Dance of the Photons: From Einstein to Quantum Teleportation, Farrar, Straus and Giroux.